



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΠΜΣ: ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

**Αριθμητική Προσομοίωση της επίδρασης Αστικής
Γεωμετρίας & Ατμοσφαιρικής Ευστάθειας στη Διασπορά
Ρύπων σε Αστικές Περιοχές : πείραμα MUST**

Μεταπτυχιακή Εργασία

Παππά Βασιλική

Επιβλέπων: Δ. Μπούρης

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Ρευστών: Εργαστήριο Τεχνολογικών
Καινοτομιών Προστασίας Περιβάλλοντος

ΑΘΗΝΑ 2016

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογικών Καινοτομιών Προστασίας Περιβάλλοντος της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κατά το ακαδημαϊκό έτος 2015-2016 υπό την επίβλεψη του Επίκουρου Καθηγητή Δημήτρη Μπούρη. Με την παρούσα εργασία περατώνονται οι σπουδές μου στο Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών Υπολογιστική Μηχανική. Σκοπός της εργασίας αποτελεί η αριθμητική προσομοίωση της επίδρασης αστικής γεωμετρίας και ατμοσφαιρικής ευστάθειας στη διασπορά ρύπων σε αστικές περιοχές.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στον Δρ. Δημήτριο Μπούρη, Επίκουρο Καθηγητή της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., για την ανάθεση της εν λόγω εργασίας, τη στήριξη και την καθοδήγησή του καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης και συγγραφής της παρούσας εργασίας. Η συμβολή του υπήρξε καθοριστική για την ολοκλήρωσή της. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους γονείς μου για την ηθική και οικονομική στήριξη όλα τα χρόνια των σπουδών μου, την αγαπημένη μου θεία Ντίνα καθώς επίσης την αδερφή μου Γιούλη, και τους φίλους Άγγελο, Βασιλική και Βαλάντη που επέμειναν να διαβάσουν τη συγκεκριμένη εργασία και να με στηρίζουν με τα εύστοχα σχόλια και τα γλυκά τους λόγια.

Παππά Βασιλική

Αθήνα, 02/10/2016

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο όρος ατμοσφαιρική ρύπανση αποδίδεται στην προσθήκη ουσιών (ρύπων) στην ατμόσφαιρα, ως αποτέλεσμα ανθρώπινης δραστηριότητας, που υπό φυσιολογικές συνθήκες δε θα υπήρχαν. Οι επιπτώσεις της στην υγεία του ανθρώπου και στο φυσικό περιβάλλον είναι καταστρεπτικές. Προτάσσεται λοιπόν η μελέτη των μηχανισμών διασποράς ρύπων ως μέσο βελτίωσης των συνθηκών διαβίωσης στις εστίες ρύπων, δηλαδή στα αστικά κέντρα. Η παρούσα εργασία έχει ως βασικό αντικείμενο τη διασπορά ενός παθητικού ρύπου σε ένα αστικό περιβάλλον.

Η διασπορά ρύπων εξαρτάται κυρίως από την τυρβώδη ροή. Η τελευταία περιγράφεται από τις άλυτες μαθηματικά εξισώσεις Navier-Stokes, επομένως η χρήση αριθμητικών μεθοδολογιών κρίνεται επιτακτική για την επίλυση του προβλήματος. Η μεθοδολογία RANS(Reynolds-Averaged Navier Stokes) προτιμήθηκε για την επίλυση της ατμοσφαιρικής ροής. Στην παρούσα εργασία ενσωματώθηκε και επιλύθηκε, σε ήδη υπάρχον υπολογιστικό εργαλείο, η κατά RANS εξίσωση συγκέντρωσης του ρύπου. Ο κώδικας δοκιμάστηκε και πιστοποιήθηκε σε εφαρμογή πρακτικού ενδιαφέροντος από την οποία εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα.

Η ακρίβεια του κώδικα εξασφαλίστηκε μέσω της προσομοίωσης του πειράματος πεδίου MUST(Mock Urban Setting Test).Μελετήθηκε η διασπορά της ρυπογόνου ουσίας του προπυλενίου υπό συνθήκες ευστάθειας. Η προσομοίωση αφορούσε τη δοκιμή 16 του πειράματος και αντιμετωπίστηκε ως ένα πρόβλημα μόνιμης κατάστασης(steady state). Οι εξισώσεις RANS επιλύθηκαν σε 3Δ καρτεσιανό υπολογιστικό πλέγμα και εφαρμόστηκε η μεθοδολογία της πολλαπλής τοπικής πύκνωσης.

Η εν λόγω δοκιμή υποβλήθηκε σε ποικίλες προσομοιώσεις που αφορούσαν το αριθμητικό και φυσικό κομμάτι του προβλήματος. Συγκεκριμένα εξετάστηκαν η εφαρμογή δύο αριθμητικών σχημάτων (υβριδικό & BSOU), τεσσάρων διαφορετικών μοντέλων τύρβης (k-ε, MMK k-ε, k-ω,SST k-ω), διαφορετικοί τυρβώδεις αριθμοί Schmidt,διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης του ανέμου, διαφορετικές καταστάσεις ατμόσφαιρας(ευστάθεια, ουδέτερη, αστάθεια) και διαφορετικές οριακές συνθήκες. Σε όλες τις δοκιμές έγινε επιτυχής σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα του MUST.

Η μελέτη και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων κατέδειξαν ότι η καλύτερη προσομοίωση αποτελεσμάτων επιτυγχάνεται με μοντέλο τύρβης k-ω. Η μεταβολή του σχήματος διακριτοποίησης δεν δείχνει σαφή υπεροχή του ενός έναντι του άλλου. Ο τυρβώδης αριθμός Schmidt με τιμή μεταξύ ≥ 0.9 , οδηγεί σε καλύτερη προσομοίωση, η διασπορά του ρύπου ευνοείται σε ασταθή ατμόσφαιρα και σε υψηλότερη θερμοκρασία περιβάλλοντος (302.15K). Τέλος συμπεραίνεται ότι η μέση συγκέντρωση του ρύπου είναι πολύ ευαίσθητη σε μικρές αποκλίσεις της προσπίπτουσας γωνίας του ανέμου.

Λέξεις κλειδιά: αστικές περιοχές, διασπορά ρύπου,RANS,πείραμα MUST,τοπική πύκνωση, μοντέλα τύρβης, αριθμός Schmidt, γωνίες ανέμου

ABSTRACT

Human activity during the last century aggravated the phenomenon of air pollution by increasing the number of substances (pollutants) in the atmosphere. The impact of such a critical change on human health and natural environment is devastating and it might be crucial in the forthcoming years. Thus, the improvement of the living conditions in urban centers via pollutants' dispersion mechanisms is of high research interest.

The current thesis primarily addresses and examines the dispersion of a passive pollutant in an urban environment. The dispersion of the pollutant substance mainly depends on the turbulent flow. The latter is described by the unsolved mathematical Navier-Stokes equations. Therefore, the use of a numerical technique is considered crucial to solve the aforementioned problem. In this study we used the RANS methodology (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) so as to interpret the atmospheric flow. The computational code was evaluated in an application of practical interest from which we exported fruitful results.

The accuracy of the adopted computational code was validated using the simulation of MUST (Mock Urban Setting Test) field experiment. Specifically, the dispersion of propylene pollutant was studied under stable conditions and the carried out simulation involved the trial 16 and considered as a steady-state problem. The RANS equations were solved using a 3D Cartesian, computational grid and applied to the methodology of Multi-Local Refinement (MLR).

This experiment was subjected to various tests related to the numerical and the physical part of the problem. Particularly, we examined the application of two numerical schemes (Hybrid & BSOU), four different turbulent models ($k-\epsilon$, MMK $k-\epsilon$, $k-\omega$, SST $k-\omega$), different turbulent Schmidt numbers, different incident wind angle deviations, different atmospheric conditions (stable, neutral, unstable) and different boundary conditions. All tests were compared to the experimental data of MUST.

The study and the analysis of the results showed that the best simulation results were achieved using the turbulence model $k-\omega$. The change of the numerical scheme doesn't clarify the superiority of one over the other. Furthermore, the turbulent Schmidt number with a value ≥ 0.9 leads to a better simulation comparatively to experimental data and the dispersion of the pollutant is propitious under unstable atmospheric conditions and at a higher air temperature (302.15K). Finally, it was shown that the average concentration of the pollutant is very sensitive to small variations of the incident wind angle.

Keywords: urban regions, pollutant dispersion, RANS, field experiment MUST, local refinement, turbulence models, Schmidt number, wind angle

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	ii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	iii
ABSTRACT.....	iv
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	v
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	vii
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	xii
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	1
1.1 Σύντομη εισαγωγή	1
1.2 Συνοπτική παρουσίαση της εργασίας	2
Κεφάλαιο 2: Μεθοδολογίες Υπολογιστικής Μηχανικής.....	4
2.1 Γενικά στοιχεία της Μεθοδολογίας Υπολογιστικής Μηχανικής.....	4
2.2 Μεθοδολογίες ΥΡ ως προς το βαθμό επίλυσης της τύρβης	4
2.2.1 Γενικά στοιχεία της μεθοδολογίας RANS	4
2.2.2 Μοντέλα τύρβης	5
2.2.2.1 Μοντέλα τύρβης 0 εξισώσεων	6
2.2.2.2 Μοντέλα τύρβης 1 εξίσωσης	6
2.2.2.3 Μοντέλα τύρβης 2 εξισώσεων	6
2.2.2.4 Μοντέλα τύρβης περισσότερων από 2 εξισώσεων/ μη γραμμικά ...	7
2.2.2.5 Μοντέλα τύρβης τάσεων Reynolds (RSM) & αλγεβρικά τάσεων Reynolds (ARSM).....	7
2.3 Οι εξισώσεις RANS	9
2.4 Μοντέλα τύρβης.....	10
2.4.1 Μοντέλο k-ε	10
2.4.2 Μοντέλο MMK k-ε	12
2.4.3 Μοντέλο k-ω	14
2.4.4 Μοντέλο SST k-ω	15
Κεφάλαιο 3: Ανάπτυξη της παρούσας μεθοδολογίας και του κώδικα μοντελοποίησης του προβλήματος	17
3.1 Εισαγωγή.....	17
3.2 Βασικές εξισώσεις RANS.....	18
3.3 Ολοκλήρωση των εξισώσεων	20
3.4 Αριθμητικό σχήμα	22
3.5 Διακριτοποιημένη μορφή εξίσωσης	24
3.6 Οριακές Συνθήκες	25
3.6.1 Οριακές συνθήκες τοιχώματος	25
3.7 Μέθοδος επίλυσης	28
3.8 Σύγκλιση.....	29
3.9 Τεχνική υποχαλάρωσης	29
3.10 Μεθοδολογία πολλαπλής τηλεσκοπικής τοπικής πύκνωσης (Multi - Local Refinement ,MLR)	30

3.11 Συμβολή στον κώδικα <i>caffca3d-mlr</i>	31
Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα & Συζήτηση αποτελεσμάτων	34
4.1 Εισαγωγή	34
4.2 Περιγραφή του πειράματος	36
4.3 Μεθοδολογία μοντελοποίησης υπολογιστικού προβλήματος.....	40
4.4 Αποτελέσματα μέσω των συγκεντρώσεων <i>Conc</i> για διαφορετικά μοντέλα τύρβης.....	51
4.5 Παραμετρική ανάλυση του μοντέλου τύρβης <i>k-ω</i> , για διαφορετικούς αριθμούς <i>Schmidt</i>	58
4.6 Παραμετρική ανάλυση του μοντέλου τύρβης <i>k-ω</i> , για διαφορετικές θερμοκρασίες εύρους 1°C έως 29°C [274.15K - 302.15K].....	68
4.7 Παραμετρική ανάλυση του μοντέλου τύρβης <i>k-ω</i> , για διαφορετικές γωνίες ανέμου	75
4.8 Παραμετρική ανάλυση του μοντέλου τύρβης <i>k-ω</i> , για διαφορετικές καταστάσεις ατμόσφαιρας.....	80
4.9 Επίδραση διαφορετικής οριακής συνθήκης (<i>IWALL=4</i>) και διαφορετικού μεγέθους πλέγματος (<i>Grid Test 3</i>) στη διασπορά του ρύπου.	87
Κεφάλαιο 5 : Συμπεράσματα	91
5.1 Συμπεράσματα	91
5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	94
Βιβλιογραφία	96

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 3.1: Υπολογιστική κυψέλη (όγκος αναφοράς)	20
Σχήμα 3.2: Οι περιοχές του τυρβώδους οριακού στρώματος	25
Σχήμα 3.3: α) Απεικόνιση τεσσάρων περιοχών ειδικού ενδιαφέροντος με 1, 2, 3 και 4 επίπεδα πύκνωσης. β) Απεικόνιση αραιού πλέγματος (συνεχής παχιά γραμμή) και του πυκνού πλέγματος (λεπτή συνεχή γραμμή). Αριστερά της κοινής διεπιφάνειας, με διακεκομμένη γραμμή απεικονίζονται τα ψευδοκελιά του πυκνού πλέγματος.	30
Σχήμα 4.1: Σχηματικό διάγραμμα του πειράματος πεδίου MUST. Διακρίνεται ο προσανατολισμός των κτιρίων όσον αφορά τη διεύθυνση του ανέμου των επιλεγμένων δοκιμών, η θέση των πηγών και η θέση των ανιχνευτών συγκέντρωσης (PID και UVIC)	37
Σχήμα 4.2 : Απεικόνιση της γεωμετρικής διάταξης των κοντέινερ κατά τη διάρκεια του πειράματος MUST	38
Σχήμα 4.3: Γραφική απεικόνιση του αντίστροφου μήκους Monin-Obukhov για τις δοκιμές του πειράματος από 20/09/2001 έως 26/09/2001	39
Σχήμα 4.4: Απεικόνιση των επεκτάσεων κατά x-άξονα και κατά z-άξονα του υπολογιστικού χωρίου, για τη γεωμετρία του πειράματος MUST	41
Σχήμα 4.5: Η γεωμετρία, το χωρίο υπολογισμού και το πλέγμα (Test Grid 1, $\approx 2.745 \cdot 10^6$ κελιά)	43
Σχήμα 4.6: Η γεωμετρία, το χωρίο υπολογισμού και το πλέγμα (Test Grid2, $\approx 3.213 \cdot 10^6$ κελιά, 2περιοχές τοπικής πύκνωσης)	44
Σχήμα 4.7: Λογαριθμικό προφίλ ταχύτητας ανέμου (ms^{-1}) συναρτήσει του ύψους y (m)	46
Σχήμα 4.8 : Απεικόνιση κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης $Conc$ (ppm) για μοντέλα τύρβης $k-\epsilon$, MMK $k-\epsilon$, για γωνία ανέμου - 48^0 , χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, για αριθμό $Sc=0.9$, με/χωρίς τοπική πύκνωση (No MLR- MLR), στο Main Tower	51
Σχήμα 4.9 : Απεικόνιση κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης $Conc$ (ppm) για μοντέλα τύρβης $k-\omega$, SST $k-\omega$, για γωνία ανέμου - 48^0 , χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, για αριθμό $Sc=0.9$, με/χωρίς τοπική πύκνωση (No MLR- MLR), στο Main Tower	52
Σχήμα 4.10 : Απεικόνιση κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης $Conc$ (ppm) για μοντέλα τύρβης $k-\epsilon$, MMK $k-\epsilon$, για γωνία ανέμου - 48^0 , χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, για αριθμό $Sc=0.9$, με/χωρίς τοπική πύκνωση (No MLR- MLR), στο Tower B	52
Σχήμα 4.11 : Απεικόνιση κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης $Conc$ (ppm) για μοντέλα τύρβης $k-\omega$, SST $k-\omega$, για γωνία ανέμου - 48^0 , χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, για αριθμό $Sc=0.9$, με/χωρίς τοπική πύκνωση (No MLR- MLR), στο Tower B	53
Σχήμα 4.12 : Απεικόνιση κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης $Conc$ (ppm) για μοντέλα τύρβης $k-\epsilon$, MMK $k-\epsilon$, για γωνία ανέμου - 48^0 , χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, για αριθμό $Sc=0.9$, με/χωρίς τοπική πύκνωση	

(No MLR- MLR), στο Tower D	53
Σχήμα 4.13 : Απεικόνιση κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm) για μοντέλα τύρβης k-ω, SST k-ω, για γωνία ανέμου - 48 ⁰ , χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, για αριθμό Sc=0.9, με/χωρίς τοπική πύκνωση (No MLR- MLR), στο Tower D	54
Σχήμα 4.14 : Απεικόνιση κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm) για μοντέλα τύρβης k-ε, MMK k-ε, για γωνία ανέμου - 48 ⁰ , χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, για αριθμό Sc=0.9, με/χωρίς τοπική πύκνωση (No MLR- MLR), στο Tower C.....	54
Σχήμα 4.15 : Απεικόνιση κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm) για μοντέλα τύρβης k-ω, SST k-ω, για γωνία ανέμου - 48 ⁰ , χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, για αριθμό Sc=0.9, με/χωρίς τοπική πύκνωση (No MLR- MLR), στο Tower C.....	55
Σχήμα 4.16 : Ισοϋψείς μέσης αδιάστατης συγκέντρωσης Conc σε xz-plane, γωνία ανέμου φ= - 48 ⁰ , αριθμητικό σχήμα Hybrid, για μοντέλα τύρβης : i) k-ε, No MLR, ii) k-ε, MLR iii) MMK k-ε, No MLR, iv) MMK k-ε, MLR v) k-ω, No MLR vi) k-ω, MLR ..	56
Σχήμα 4.17 : Ισοϋψείς μέσης αδιάστατης συγκέντρωσης Conc σε xz-plane, γωνία ανέμου φ= - 48 ⁰ , αριθμητικό σχήμα Hybrid, για μοντέλα τύρβης : vii) SST k-ω, No MLR viii) SST k-ω, MLR,	57
Σχήμα 4.18.: Ισοϋψείς μέσης TKE, σε z/h=0.63, γωνία ανέμου φ= - 48 ⁰ , αριθμητικό σχήμα Hybrid, για μοντέλα τύρβης : ix) k-ε, No MLR, x) k-ε, MLR xi) MMK k-ε, No MLR, xii) MMK k-ε, MLR, xiii) k-ω, No MLR xiv) k-ω, MLR, xv) SST k-ω, No MLR xvi) SST k-ω, MLR	58
Σχήμα 4.19: Απεικόνιση κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm), xz-plane, για μοντέλο τύρβης k-ω, με γωνία ανέμου φ= - 48 ⁰ , χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, για αριθμούς Sc=0.1# Sc=0.5#, Sc=0.9, #Sc=1.2, χωρίς τοπική πύκνωση, στο Main Tower.....	60
Σχήμα 4.20: Απεικόνιση κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm), xz-plane, για μοντέλο τύρβης k-ω, με γωνία ανέμου φ= - 48 ⁰ , χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, για αριθμούς Sc=0.1# Sc=0.5#, Sc=0.9, #Sc=1.2, με τοπική πύκνωση, στο Main Tower.....	60
Σχήμα 4.21: Απεικόνιση κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm), xz-plane, για μοντέλο τύρβης k-ω, με γωνία ανέμου φ= - 48 ⁰ , χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, για αριθμούς Sc=0.1# Sc=0.5#, Sc=0.9, #Sc=1.2, χωρίς τοπική πύκνωση, στο Tower B.....	61
Σχήμα 4.22: Απεικόνιση κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm), xz-plane, για μοντέλο τύρβης k-ω, με γωνία ανέμου φ= - 48 ⁰ , χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, για αριθμούς Sc=0.1# Sc=0.5#, Sc=0.9, #Sc=1.2, με τοπική πύκνωση, στο Tower B.....	61
Σχήμα 4.23: Απεικόνιση κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm), xz-plane, για μοντέλο τύρβης k-ω, με γωνία ανέμου φ= - 48 ⁰ , χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, για αριθμούς Sc=0.1# Sc=0.5#, Sc=0.9, #Sc=1.2, χωρίς τοπική πύκνωση, στο Tower D.....	62

Σχήμα 4.24: Απεικόνιση κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης <i>Conc</i> (<i>ppm</i>), <i>xz-plane</i> , για μοντέλο τύρβης <i>k-ω</i> , με γωνία ανέμου $\varphi = -48^{\circ}$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα <i>Hybrid & BSOU</i> , για αριθμούς $Sc=0.1\# Sc=0.5\#, Sc=0.9, \#Sc=1.2$, με τοπική πύκνωση, στο <i>Tower D</i>	62
Σχήμα 4.25: Απεικόνιση κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης <i>Conc</i> (<i>ppm</i>), <i>xz-plane</i> , για μοντέλο τύρβης <i>k-ω</i> , με γωνία ανέμου $\varphi = -48^{\circ}$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα <i>Hybrid & BSOU</i> , για αριθμούς $Sc=0.1\# Sc=0.5\#, Sc=0.9, \#Sc=1.2$, χωρίς τοπική πύκνωση, στο <i>Tower C</i>	63
Σχήμα 4.26: Απεικόνιση κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης <i>Conc</i> (<i>ppm</i>), <i>xz-plane</i> , για μοντέλο τύρβης <i>k-ω</i> , με γωνία ανέμου $\varphi = -48^{\circ}$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα <i>Hybrid & BSOU</i> , για αριθμούς $Sc=0.1\# Sc=0.5\#, Sc=0.9, \#Sc=1.2$, με τοπική πύκνωση, στο <i>Tower C</i>	63
Σχήμα 4.27: Ισοϋψείς μέσης αδιάστατης συγκέντρωσης <i>Conc</i> για μοντέλο τύρβης <i>k-ω</i> , <i>xz-plane</i> , γωνία ανέμου $\varphi = -48^{\circ}$, αριθμητικό σχήμα <i>Hybrid</i> για : α) $Sc=0.1, No MLR$, β) $Sc=0.1, MLR$, γ) $Sc=0.5, No MLR$, δ) $Sc=0.5, MLR$	64
Σχήμα 4.28: Ισοϋψείς μέσης αδιάστατης συγκέντρωσης <i>Conc</i> για μοντέλο τύρβης <i>k-ω</i> , <i>xz-plane</i> , γωνία ανέμου $\varphi = -48^{\circ}$, αριθμητικό σχήμα <i>Hybrid</i> για : ε) $Sc=0.9, No MLR$, ζ) $Sc=0.9, MLR$, η) $Sc=1.2, No MLR$, θ) $Sc=1.2, MLR$	65
Σχήμα 4.29: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης <i>Conc</i> (<i>ppm</i>), <i>xz-plane</i> , για μοντέλο τύρβης <i>k-ω</i> , με γωνία ανέμου $\varphi = -48^{\circ}$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα <i>Hybrid & BSOU</i> , με $Sc=0.9$, για $Temp=274.15K\# Temp=279.15K\#Temp=284.15K\#Temp=290K \# Temp=296.15K \# Temp=302.15K$, <i>No MLR</i> , στο <i>Main Tower</i>	69
Σχήμα 4.30: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης <i>Conc</i> (<i>ppm</i>), <i>xz-plane</i> , για μοντέλο τύρβης <i>k-ω</i> , με γωνία ανέμου $\varphi = -48^{\circ}$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα <i>Hybrid & BSOU</i> , με $Sc=0.9$, για $Temp=274.15K \# Temp=279.15K\#Temp=284.15K\#Temp=290K \# Temp=296.15K \# Temp=302.15K$, <i>MLR</i> , στο <i>Main Tower</i>	69
Σχήμα 4.31: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης <i>Conc</i> (<i>ppm</i>), <i>xz-plane</i> , για μοντέλο τύρβης <i>k-ω</i> , με γωνία ανέμου $\varphi = -48^{\circ}$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα <i>Hybrid & BSOU</i> , με $Sc=0.9$, για $Temp=274.15K \#Temp=279.15K \#Temp=284.15\#Temp=290K \# Temp=296.15K \# Temp=302.15K$, <i>No MLR</i> , στο <i>Tower B</i>	70
Σχήμα 4.32: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης <i>Conc</i> (<i>ppm</i>), <i>xz-plane</i> , για μοντέλο τύρβης <i>k-ω</i> , με γωνία ανέμου $\varphi = -48^{\circ}$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα <i>Hybrid & BSOU</i> , με $Sc=0.9$, για $Temp=274.15K \#Temp=279.15K \#Temp=284.15\#Temp=290K \# Temp=296.15K \# Temp=302.15K$, <i>MLR</i> , στο <i>Tower B</i>	70
Σχήμα 4.33: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης <i>Conc</i> (<i>ppm</i>), <i>xz-plane</i> , για μοντέλο τύρβης <i>k-ω</i> , με γωνία ανέμου $\varphi = -48^{\circ}$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα <i>Hybrid & BSOU</i> , με $Sc=0.9$, για $Temp=274.15K \#Temp=279.15K \#Temp=284.15\#Temp=290K \# Temp=296.15K \# Temp=302.15K$, <i>No MLR</i> , στο <i>Tower D</i>	71

Σχήμα 4.34: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης *Conc* (*ppm*), *xz-plane*, για μοντέλο τύρβης *k-ω*, με γωνία ανέμου $\varphi = -48^{\circ}$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα *Hybrid & BSOU*, με $Sc=0.9$, για *Temp=274.15K #Temp=279.15K #Temp=284.15K #Temp=290K #Temp=296.15K #Temp=302.15K*, *MLR*, στο *Tower D*..... 71

Σχήμα 4.35: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης *Conc* (*ppm*), *xz-plane*, για μοντέλο τύρβης *k-ω*, με γωνία ανέμου $\varphi = -48^{\circ}$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα *Hybrid & BSOU*, με $Sc=0.9$, για *Temp=274.15K #Temp=279.15K #Temp=284.15K #Temp=290K #Temp=296.15K #Temp=302.15K*, *No MLR*, στο *Tower C*..... 72

Σχήμα 4.36: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης *Conc* (*ppm*), *xz-plane*, για μοντέλο τύρβης *k-ω*, με γωνία ανέμου $\varphi = -48^{\circ}$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα *Hybrid & BSOU*, με $Sc=0.9$, για *Temp=274.15K #Temp=279.15K #Temp=284.15K #Temp=290K #Temp=296.15K #Temp=302.15K*, *MLR*, στο *Tower C*..... 72

Σχήμα 4.37: Ισοϋψείς μέσης αδιάστατης συγκέντρωσης *Conc* για μοντέλο τύρβης *k-ω*, *xz-plane*, γωνία ανέμου $\varphi = -48^{\circ}$, αριθμητικό σχήμα *Hybrid* για ι) *Temp=274.15*, *No MLR*, κ) *Temp=274.15*, *MLR* λ) *Temp=279.15*, *No MLR*, μ) *Temp=279.15*, *MLR*, ν) *Temp=284.15*, *No MLR*, ζ) *Temp=284.15*, *MLR*..... 73

Σχήμα 4.38: Ισοϋψείς μέσης αδιάστατης συγκέντρωσης *Conc* για μοντέλο τύρβης *k-ω*, *xz-plane*, γωνία ανέμου $\varphi = -48^{\circ}$, αριθμητικό σχήμα *Hybrid* για : a) *Temp=290K*, *No MLR*, b) *Temp=290K*, *MLR*, c) *Temp=296.15*, *No MLR*, d) *Temp=296.15*, *MLR* e) *Temp=302.15*, *No MLR*, f) *Temp=302.15*, *MLR*..... 74

Σχήμα 4.39: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης *Conc* (*ppm*), *xz-plane*, για μοντέλο τύρβης *k-ω*, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα *Hybrid & BSOU*, με $Sc=0.9$, για γωνίες ανέμου $\varphi = -42^{\circ}$, $\varphi = -48^{\circ}$, $\varphi = -54^{\circ}$, *No MLR-MLR*, στο *Main Tower* 75

Σχήμα 4.40: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης *Conc* (*ppm*), *xz-plane*, για μοντέλο τύρβης *k-ω*, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα *Hybrid & BSOU*, με $Sc=0.9$, για γωνίες ανέμου $\varphi = -42^{\circ}$, $\varphi = -48^{\circ}$, $\varphi = -54^{\circ}$, *No MLR-MLR*, στο *Tower B*..... 76

Σχήμα 4.41: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης *Conc* (*ppm*), *xz-plane*, για μοντέλο τύρβης *k-ω*, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα *Hybrid & BSOU*, με $Sc=0.9$, για γωνίες ανέμου $\varphi = -42^{\circ}$, $\varphi = -48^{\circ}$, $\varphi = -54^{\circ}$, *No MLR-MLR*, στο *Tower D*..... 76

Σχήμα 4.42: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης *Conc* (*ppm*), *xz-plane*, για μοντέλο τύρβης *k-ω*, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα *Hybrid & BSOU*, με $Sc=0.9$, για γωνίες ανέμου $\varphi = -42^{\circ}$, $\varphi = -48^{\circ}$, $\varphi = -54^{\circ}$, *No MLR-MLR*, στο *Tower C*..... 77

Σχήμα 4.43: Ισοϋψείς μέσης αδιάστατης συγκέντρωσης *Conc* για μοντέλο τύρβης *k-ω*, *xz-plane*, αριθμητικό σχήμα *Hybrid*, με $Sc=0.9$ για : g) $\varphi = -42^{\circ}$, *No MLR*, h) $\varphi = -42^{\circ}$, *MLR*, i) $\varphi = -48^{\circ}$, *No MLR*, j) $\varphi = -48^{\circ}$, *MLR*, k) $\varphi = -54^{\circ}$, *No MLR*, m) $\varphi = -54^{\circ}$, *MLR*..... 78

Σχήμα 4.44.: Μέσες συγκεντρώσεις κατά μήκος 8 ανιχνευτών PID που βρίσκονται στον πυρήνα του πλουμίου. Ο τύπος της ευκλείδειας απόστασης d , όπου X_S, Y_S : συντεταγμένες της πηγής εκπομπής και X_P, Y_P : συντεταγμένες των θέσεων κάθε ανιχνευτή.....	79
Σχήμα 4.45.: Λογαριθμικό προφίλ ταχύτητας ανέμου ($m s^{-1}$) συναρτήσει του ύψους y (m), για ευστάθεια, ουδέτερη, αστάθεια κατάσταση.....	83
Σχήμα 4.46.: Προφίλ εισόδου της τυρβώδους κινητικής ενέργειας ($m^2 s^{-2}$), συναρτήσει του ύψους y (m) για ευστάθεια, ουδέτερη, αστάθεια κατάσταση.....	84
Σχήμα 4.47.: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης $Conc$ (ppm), xz -plane, για μοντέλο τύρβης $k-\omega$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, με $Sc=0.9$, για καταστάσεις ευστάθειας, αστάθειας, ουδέτερη, No MLR-MLR, στο Main Tower.....	84
Σχήμα 4.48.: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης $Conc$ (ppm), xz -plane, για μοντέλο τύρβης $k-\omega$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, με $Sc=0.9$, για καταστάσεις ευστάθειας, αστάθειας, ουδέτερη, No MLR-MLR, Tower B.....	85
Σχήμα 4.49.: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης $Conc$ (ppm), xz -plane, για μοντέλο τύρβης $k-\omega$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, με $Sc=0.9$ για καταστάσεις ευστάθειας, αστάθειας, ουδέτερη, No MLR-MLR, Tower D.....	85
Σχήμα 4.50.: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης $Conc$ (ppm), xz -plane, για μοντέλο τύρβης $k-\omega$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, με $Sc=0.9$, για καταστάσεις ευστάθειας, αστάθειας, ουδέτερη, No MLR-MLR, Tower C.....	86
Σχήμα 4.51.: Ισοϋψείς μέσης αδιάστατης συγκέντρωσης $Conc$, xz -plane, για μοντέλο τύρβης $k-\omega$, αριθμητικό σχήμα Hybrid, με $Sc=0.9$ για : ο) ευστάθεια, No MLR, p) ευστάθεια, MLR, q) ουδέτερη, No MLR, r) ουδέτερη, MLR, s) ασταθή, No MLR, t) ασταθή, MLR.....	87
Σχήμα 4.52.: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης $Conc$ (ppm), xz -plane, για μοντέλο τύρβης $k-\omega$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, με $Sc=0.9$, για πλέγματα: No MLR, MLR, MLR (IWALL=4), Fine, Main Tower.....	88
Σχήμα 4.53.: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης $Conc$ (ppm), xz -plane, για μοντέλο τύρβης $k-\omega$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, με $Sc=0.9$, για πλέγματα: No MLR, MLR, MLR (IWALL=4), Fine, Tower B.....	89
Σχήμα 4.54.: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης $Conc$ (ppm), xz -plane, για μοντέλο τύρβης $k-\omega$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, με $Sc=0.9$, για πλέγματα: No MLR, MLR, MLR (IWALL=4), Fine, Tower D.....	89
Σχήμα 4.55.: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης $Conc$ (ppm), xz -plane, για μοντέλο τύρβης $k-\omega$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, με $Sc=0.9$, για πλέγματα: No MLR, MLR, MLR (IWALL=4), Fine, Tower C.....	90

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

<i>Πίνακας 3.1:</i> Οι τιμές του όρου πηγής S_Φ , ανά μεταβλητή Φ	20
<i>Πίνακας 3.2:</i> Γραμμικοποιημένοι όροι πηγής, ανά μεταβλητή Φ	23
<i>Πίνακας 4.1:</i> Συγκεντρωτικά δεδομένα μέσω των ταχυτήτων πειράματος <i>MUST</i> , στα 4m του υπήνεμου πύργου	40
<i>Πίνακας 4.2:</i> Τα πειραματικά χαρακτηριστικά της επιλεγείσας δοκιμής 16 του πειράματος <i>MUST</i>	41
<i>Πίνακας 4.3:</i> Χαρακτηριστικά πλεγμάτων	44
<i>Πίνακας 4.4:</i> Κατηγοριοποίηση της ατμοσφαιρικής κατάστασης με κριτήριο την τιμή του μήκους <i>Monin-Obukhov</i>	45
<i>Πίνακας 4.5:</i> Το προφίλ της ταχύτητας του ανέμου $u(y)$ (ms^{-1}) συναρτήσει του ύψους $y(m)$, και οι τιμές των συνιστωσών της ταχύτητας κατά x -άξονα και κατά z -άξονα .	46
<i>Πίνακας 4.6:</i> Υπολογισμός τυρβώδους κινητικής ενέργειας k με χρήση πειραματικών δεδομένων	48
<i>Πίνακας 4.7:</i> Τιμές των ε και ω υπολογισμένες σε διαφορετικά ύψη	48
<i>Πίνακας 4.8 :</i> Τιμές φυσικών παραμέτρων μεταβλητών προβλήματος	49
<i>Πίνακας 4.9:</i> Προτεινόμενες τιμές συντελεστών υποχαλάρωσης από τους <i>R.M. Barron & Ali A. Salehi Neyshabouri</i>	51
<i>Πίνακας 4.10:</i> Συντελεστές υποχαλάρωσης για προσομοιώσεις με υβριδικό σχήμα και σχήμα <i>BSOU</i>	51
<i>Πίνακας 4.11:</i> Ιδιότητες του αέρα για διαφορετικές θερμοκρασίες.....	68
<i>Πίνακας 4.12:</i> Αριθμητικά δεδομένα εισόδου για κάθε ατμοσφαιρική κατάσταση..	83

Κεφάλαιο 1

1.1 Εισαγωγή

Ατμοσφαιρική ρύπανση αποκαλείται η παρουσία παντός είδους ουσιών σε συγκέντρωση ή/και διάρκεια στην ατμόσφαιρα και η οποία μπορεί να προκαλέσει αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία, στους ζωντανούς οργανισμούς και στα οικοσυστήματα. Η ρύπανση της ατμόσφαιρας θεωρείται ότι προκαλεί εκατομμύρια θανάτους το χρόνο ενώ ταυτόχρονα αυξάνει την πιθανότητα για αναπνευστικές και καρδιακές παθήσεις.

Οι ανθρωπογενείς ρύποι προέρχονται κυρίως από τις διαδικασίες καύσης των οχημάτων, των σταθμών παραγωγής ενέργειας, των βιομηχανιών, των σκουπιδιών και άλλων διεργασιών. Οι σημαντικότεροι ρύποι εξ' αυτών, οι πρωτογενείς ρύποι - δηλαδή εκείνοι που εκπέμπονται απευθείας από τις πηγές, είναι :το διοξείδιο του θείου (SO_2), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), τα οξείδια του αζώτου (NO , NO_2) και οι άκαυτοι υδρογονάνθρακες (VOC). Οι δευτερογενείς ρύποι είναι εκείνοι που σχηματίζονται από τους πρωτογενείς κατόπιν χημικών αντιδράσεων, παρουσία φωτός που δρα ως καταλύτης. Οι κύριοι αέριοι δευτερογενείς ρύποι αποτελούνται από θειϊκές, αζωτούχες ή/και ανθρακικές ενώσεις.

Σε γενικές γραμμές, η ρύπανση στην ατμόσφαιρα των πόλεων τις τελευταίες δεκαετίες παρουσιάζει εμφανή μείωση και κρίνεται ως αποτέλεσμα των επιστημονικών και πολιτικών προσπαθειών για την εξασφάλιση καλύτερης ποιότητας ζωής και αειφόρου ανάπτυξης. Την παρούσα χρονική στιγμή, η πλειονότητα των ρύπων των ανεπτυγμένων κρατών βρίσκονται σε επιθυμητά όρια (δηλαδή, κάτω από τα προβλεπόμενα νομοθετικά όρια) με εξαίρεση ενώσεις όπως τα οξείδια του αζώτου (μονοξείδια και διοξείδια) και το όζον.

Για να φθάσει στο σημείο η ατμοσφαιρική ρύπανση να θεωρείται διαχειρίσιμη κατάσταση και να μπορεί να αντιμετωπιστεί, ο άνθρωπος στράφηκε στη μελέτη της ατμόσφαιρας και πιο συγκεκριμένα στην μελέτη της τυρβώδους ροής. Αποδείχθηκε

ότι για να προβλεφθούν με ακρίβεια οι όποιες μελέτες πραγματοποιούνταν για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων των ρύπων στο έδαφος, προερχόμενων από τις καμινάδες εργοστασίων, έπρεπε εξ αρχής να υπάρξει καλή γνώση των τυρβωδών χαρακτηριστικών της ροής. Έτσι λοιπόν, οι ερευνητές μελετούν αυτού του είδους τα φαινόμενα τόσο πειραματικά όσο και υπολογιστικά. Η υπολογιστική μελέτη είναι εκ των πραγμάτων πιο εύκολη, πιο γρήγορη, πιο οικονομική, πιο ασφαλής και πιο λεπτομερής, διότι μπορεί να εξετάσει περισσότερες φυσικές παραμέτρους του προβλήματος. Στην παρούσα εργασία, εξετάζεται υπολογιστικά το φυσικό πρόβλημα της διασποράς ρύπου σε αστική περιοχή, λαμβάνοντας δεδομένα τα οποία συγκρίνονται με τα αντίστοιχα πειραματικά.

Το βασικό αντικείμενο μελέτης της διασποράς ρύπου ή ρυπαντών αποτελεί η πρόβλεψη και κατ' επέκτασιν η αποφυγή της ρύπανσης. Μια τέτοιου είδους επιστημονική μελέτη δίνει πληροφορίες που αφορούν τις συγκεντρώσεις των ρύπων από τις εκάστοτε εκπεμπόμενες πηγές, την εκ των προτέρων γνωστή ή την υπολογιζόμενη ροή και τη γεωμετρία. Μελετώνται καθ' αυτόν τον τρόπο, εναλλακτικά σενάρια που οδηγούν στη μείωση της ρύπανσης μέσω μηχανισμών απαγωγής της ρύπανσης και στη τροποποίηση ή την αποφυγή συγκεκριμένων γεωμετριών που εγκλωβίζουν και ενισχύουν τον ρύπο. Σε γενικές γραμμές, οι δυνατότητες από την πρόβλεψη της ρύπανσης αλλά και την πρόληξη της ροής είναι απεριόριστες. Πλήθος επιστημονικών μελετών έχει καταλήξει ότι στο κάτω μέρος βαθιών οδικών χαραδρών, ο αερισμός είναι ελάχιστος. Γι' αυτό το λόγο τέτοιοι μηχανισμοί καλό θα είναι να αποφεύγονται σε πόλεις με δρόμους μεγάλης κυκλοφορίας όπου οι ταχύτητες κίνησης των αυτοκινήτων είναι ιδιαίτερα χαμηλές. Εναλλακτικά, η κατάλληλη ρύθμιση της κυκλοφορίας είναι μια εφικτή λύση σε τέτοιου είδους προβλήματα αλλά και η απομάκρυνση ανθρώπων με έντονα αναπνευστικά προβλήματα από τέτοιου είδους περιοχές, κρίνεται σκόπιμη. Γενικά λοιπόν, οι μελέτες που αφορούν διαφορετικούς γεωμετρικούς σχεδιασμούς, ταχύτητες και προσανατολισμούς ανέμων, η απουσία ή η ύπαρξη δέντρων, ταυτόχρονες εκπομπές πηγών διαφορετικών θέσεων και εντάσεων είναι υψίστης σημασίας. Απώτερος στόχος όλων άλλωστε είναι η συνεχής βελτίωση του βιοτικού επιπέδου του ανθρώπου.

1.2 Συνοπτική παρουσίαση της εργασίας

Η διάρθρωση της υπόλοιπης εργασίας, περιγράφεται περιληπτικά, ως ακολούθως:

Στο 2ο κεφάλαιο περιγράφονται οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία ενώ ταυτόχρονα γίνεται εκτενής ανασκόπηση της βιβλιογραφίας που σχετίζεται με την υπολογιστική ρευστομηχανική. Γίνεται συνοπτική αναφορά στη μεθοδολογία RANS, ενώ παρουσιάζονται οι κατηγορίες των μοντέλων τύρβης

και αναλύονται διεξοδικά τα μοντέλα τύρβης που εφαρμόστηκαν στην παρούσα εργασία.

Στο 3ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μαθηματική περιγραφή του προβλήματος. Πιο αναλυτικά, αναφέρονται οι μεταβλητές του προτεινόμενου μαθηματικού μοντέλου, οι διαφορικές εξισώσεις που διέπουν την τρισδιάστατη, κατάσταση ροής καθώς επίσης και οι παραδοχές. Δίνεται μια εισαγωγή στη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων ελέγχου, δηλαδή στην αριθμητική μέθοδο που εφαρμόστηκε για την επίλυση του προβλήματος και παρουσιάζονται τα αριθμητικά σχήματα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διακριτοποίηση των εξισώσεων και οι οριακές συνθήκες. Επιπρόσθετα, περιγράφονται οι αριθμητικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση των αλγεβρικών εξισώσεων και οι τεχνικές υποχαλάρωσης που εφαρμόστηκαν για τη βελτίωση της σύγκλισης. Εν συνεχεία, δίνεται μια συνοπτική περιγραφή της μεθοδολογίας πολλαπλής τηλεσκοπικής τοπικής πύκνωσης (Multi-Local Refinement, MLR) η οποία ενσωματώθηκε στο υπολογιστικό πλέγμα και χρησιμοποιήθηκε κατά τις προσομοιώσεις. Τέλος, αναφέρεται η προσωπική συμβολή στο ήδη υπάρχον υπολογιστικό εργαλείο (caffca3d-mlr).

Στο 4ο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Αρχικά περιγράφεται η μελέτη περίπτωσης (πείραμα MUST), τα χαρακτηριστικά των υπολογιστικών πλεγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν, οι συνθήκες εισόδου και οι οριακές συνθήκες. Στην πορεία, δίνονται τα διαγράμματα των κατακόρυφων τιμών συγκεντρώσεων και οι ισοϋψείς καμπύλες αδιάστατης συγκέντρωσης, για κάθε περίπτωση που εξετάστηκε και σχολιάζονται τα αποτελέσματα.

Το 5^ο κεφάλαιο συνοψίζει τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την υπολογιστική προσομοίωση της διασποράς του ρύπου και των επιμέρους παραμετρικών αναλύσεων της ενώ ταυτόχρονα παρατίθεται μια σειρά από προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 2

2.1 Υπολογιστική Ρευστομηχανική

Η Υπολογιστική Ρευστομηχανική (ΥΡ),(CFD:Computational Fluid Dynamics), αποτελεί την επιστημονική περιοχή η οποία επιχειρεί να λύσει αριθμητικά τις διακριτοποιημένες εξισώσεις της ροής στο υπολογιστικό χωρίο. Το υπολογιστικό χωρίο *απαρτίζεται* από υπολογιστικά κελιά τα οποία συνιστούν το πλέγμα. Οι μερικές διαφορικές εξισώσεις (ΜΔΕ) επιλύονται προσεγγιστικά σε κάθε κόμβο του πλέγματος, που αποτελούν τα διακριτά σημεία του υπολογιστικού χωρίου. Επιθυμείται η εύρεση της κάθε φυσικής παραμέτρου (ταχύτητας, συγκέντρωσης) σε κάθε κόμβο του υπολογιστικού χωρίου. Προκύπτει ένα σύστημα εξισώσεων με αγνώστους το οποίο επιλύεται με αριθμητικές μεθοδολογίες, υπολογίζοντας διακριτές τιμές στις άγνωστες μεταβλητές.

2.2 Μεθοδολογίες ΥΡ ως προς το βαθμό επίλυσης της τύρβης

Αρχικά, μιας πρώτης μορφής κατηγοριοποίηση των μεθοδολογιών Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής σχετίζεται με τον τρόπο προσέγγισης του προβλήματος της τύρβης όσον αφορά το ποσό της τύρβης που επιχειρείται να υπολογιστεί. Γίνεται η θεώρηση ότι οι εξισώσεις Navier-Stokes μπορούν να περιγράψουν την τύρβη.

Η πρώτη κατηγορία μεθοδολογίας ΥΡ αποτελεί η μεθοδολογία *άμεσης αριθμητικής επίλυσης (DNS)* κατά την οποία χρησιμοποιούνται οι πλήρεις εξισώσεις Navier-Stokes των οποίων η διακριτοποίηση γίνεται απευθείας επάνω σε αυτές χωρίς άλλη παραδοχή. Αποτελεί μια χρονοβόρα διαδικασία και κάποιες φορές άσκοπη διότι το ενδιαφέρον, τις περισσότερες φορές,εστιάζεται στις μέσες τιμές των προς υπολογισμό ποσοτήτων και όχι σε κάθε τιμή των τυρβωδών διακυμάνσεων τους. Εδώ υπάρχει η δυνατότητα επίλυσης ολόκληρης της τύρβης. Στη δεύτερη κατηγορία μεθοδολογίας ΥΡ, ανήκουν οι *εξισώσεις RANS* (Reynolds-averaged Navier-Stokes) των οποίων οι μεταβλητές έχουν μόνο μέσες τιμές. Η επίλυση δεν είναι τόσο λεπτομερής συγκριτικά με την DNS, μιας και δεν απαιτείται λεπτομερές πλέγμα που να επιλύει τη τύρβη στο χώρο και στο χρόνο. Η επίδραση της τύρβης στη μέση ροή παρέχεται από επιπλέον σχέσεις. Προτιμάται συχνά σε προβλήματα πρακτικών εφαρμογών. Τέλος, η τρίτη κατηγορία μεθοδολογίας ΥΡ, αποτελεί η μεθοδολογία **LES** η οποία βρίσκεται σε μια

ενδιάμεση θέση μεταξύ των δύο προαναφερθέντων, DNS & RANS. Στην περίπτωση αυτή, φιλτράρονται χωρικά οι εξισώσεις Navier-Stokes με αποτέλεσμα ένα ποσό της τύρβης να επιλύεται και ένα μικρό ποσό να μοντελοποιείται. Στην παρούσα εργασία, το δοθέν υπολογιστικό πρόβλημα προσεγγίστηκε με βάση την δεύτερη κατηγορία, δηλαδή τις εξισώσεις RANS, για αυτό και κρίνεται αναγκαίο για τη συνέχεια, μια πιο λεπτομερή αναφορά στην μεθοδολογία RANS. (Κουτσουράκης, 2014)

2.2.1 Γενικά στοιχεία της μεθοδολογίας RANS

Η RANS είναι η πιο κλασσική και ευρέως διαδεδομένη μεθοδολογία υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Σύμφωνα με αυτή, εφαρμόζεται η διαδικασία λήψης μέσων τιμών κατά Reynolds στις εξισώσεις Navier-Stokes. Έτσι προκύπτουν καινούργιες εξισώσεις που λέγονται RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) οι οποίες μοιάζουν με τις αρχικές εξισώσεις Navier-Stokes αλλά αφορούν χρονικά μέσες τιμές ποσοτήτων. Από τη διαδικασία λήψης μέσων τιμών προκύπτουν και επιπλέον όροι διπλών συσχετίσεων των διακυμάνσεων των ταχυτήτων που ονομάζονται *τάσεις Reynolds* και αντιπροσωπεύουν την επίδραση των διακυμάνσεων στη μέση ροή. Πράγματι, οι διακυμάνσεις εμφανίζονται μακροσκοπικά ως μια πρόσθετη τάση στη ροή, καθώς οι έντονες αλλαγές ταχύτητας ενός στοιχείου ρευστού, προκαλούν επιτάχυνση ή επιβράδυνση γειτονικών στοιχείων. Οι τάσεις Reynolds πρέπει να μοντελοποιηθούν, δηλαδή να εκφραστούν συναρτήσει γνωστών ποσοτήτων που αποτελεί και το δυσκολότερο κομμάτι της μεθοδολογίας.

2.2.2 Μοντέλα τύρβης

Τα μοντέλα τύρβης κατηγοριοποιούνται σε πρώτης τάξεως και σε δεύτερης τάξεως. Πιο αναλυτικά:

- Πρώτης τάξεως (εμπλέκονται ως διπλές συσχετίσεις διακυμάνσεων)
 - Μοντέλα 0 εξισώσεων (χρήση απλών αλγεβρικών σχέσεων)
 - Μοντέλα 1 εξίσωσης (επιλύουν μια επιπλέον εξίσωση μεταφοράς)
 - Μοντέλα 2 εξισώσεων (επιλύουν δύο επιπλέον εξισώσεις μεταφοράς)
 - Μοντέλα περισσότερων από 2 εξισώσεων / μη γραμμικά
- Δεύτερης τάξεως (εμπλέκονται έως τριπλές συσχετίσεις διακυμάνσεων)
 - Μοντέλα τάσεων Reynolds (RSM: Reynolds Stress Models)
 - Μοντέλα αλγεβρικά τάσεων Reynolds (ARSM: Algebraic Reynolds Stress Models)

Τα πρώτα και πιο απλά μοντέλα τύρβης που εμφανίστηκαν βασίστηκαν στην παρατήρηση ότι οι τάσεις Reynolds αυξάνουν μακροσκοπικά τη συνεκτικότητα του ρευστού. Γι' αυτό και θεωρείται ένας τυρβώδης συντελεστής συνεκτικότητας μ_t κατ' αναλογία του μοριακού συντελεστή συνεκτικότητας μ . Η θεώρηση αυτή ονομάζεται *υπόθεση Boussinesq* (1877). Συνήθως στα μοντέλα 1^{ης} τάξης γίνεται χρήση αυτής της υπόθεσης και τότε το πρόβλημα ανάγεται σε πρόβλημα προσδιορισμού του μ_t . Γενικά θεωρείται ανάλογος μιας χαρακτηριστικής ταχύτητας και ενός χαρακτηριστικού μήκους.

2.2.2.1 Μοντέλα τύρβης 0 εξισώσεων

Σε αυτήν την κατηγορία ανήκει το μοντέλο μήκους ανάμιξης του Prandtl (1925), στο οποίο ο συντελεστής τυρβώδους συνεκτικότητας μ_t θεωρείται ανάλογος ενός χαρακτηριστικού μήκους της τύρβης που δίδεται και μιας χαρακτηριστικής ταχύτητας που είναι ανάλογη της τοπικής κλίσεως της μέσης ταχύτητας. Βελτιωμένη εκδοχή του προαναφερθέντος μοντέλου, αποτελεί το μοντέλο του Van Driest (1956) κατά το οποίο μειώνεται ταχύτερα το μήκος ανάμιξης του Prandtl όσο πλησιάζει το στερεό όριο. Το μοντέλο των Cebeci-Smith (1974) χρησιμοποιεί διαφορετικές σχέσεις για το εσωτερικό και το εξωτερικό οριακό στρώμα ενώ η βελτιωμένη του εκδοχή, δηλαδή το μοντέλο των Baldwin-Lomax (1978) δεν απαιτεί σαν πληροφορία το πάχος του οριακού στρώματος δ . Ενδεικτικά αναφέρθηκαν αυτά τα μοντέλα τύρβης 0 εξισώσεων για λόγους πληρότητας μιας και δεν χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία λόγω της περιορισμένης τους ακρίβειας. (Κουτσουράκης, 2014)

2.2.2.2 Μοντέλα τύρβης 1 εξίσωσης

Στην κατηγορία αυτή, συνηθίζεται η τυρβώδης συνεκτικότητα μ_t να εκφράζεται ως μια χαρακτηριστική ταχύτητα επί ένα χαρακτηριστικό μήκος. Η χαρακτηριστική ταχύτητα λαμβάνεται με χρήση της εξίσωσης μεταφοράς της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k , συνήθως ως $k^{0.5}$. Στα μοντέλα αυτά υπάρχει το πλεονέκτημα της χρήσης της ακριβούς εξίσωσης του k , ωστόσο υπάρχει και το μειονέκτημα της χρήσης εμπειρικών σχέσεων για το χαρακτηριστικό μήκος, με αποτέλεσμα να υπάρχει μια κάποια βελτίωση συγκριτικά με τα μοντέλα 0 εξισώσεων, αλλά όχι τόσο θεαματική. Το πιο γνωστό μοντέλο 1 εξίσωσης είναι το μοντέλο Spalart-Allmaras (1992), όπου η εξίσωση μεταφοράς αφορά την τυρβώδη συνεκτικότητα, χρησιμοποιείται επιτυχώς σε υβριδικά μοντέλα RANS/LES. (Κουτσουράκης, 2014)

2.2.2.3 Μοντέλα τύρβης 2 εξισώσεων

Η κατηγορία αυτή απαρτίζεται από μοντέλα τύρβης δύο διαφορετικών εξισώσεων μεταφοράς τα οποία χρησιμεύουν για να εκφραστούν η χαρακτηριστική ταχύτητα και το χαρακτηριστικό μήκος. Η μία εκ των δύο εξισώσεων, είναι η εξίσωση μεταφοράς της τυρβώδους κινητικής ενέργειας ενώ η δεύτερη εκφράζει ποσότητες που στη γενική μορφή δίνεται από τη σχέση $k^m e^n$ όπου m, n εκθέτες. Η δεύτερη εξίσωση είναι στην ουσία και ο λόγος που διακρίνονται πολλαπλά μοντέλα σε αυτήν την κατηγορία. Το πιο ευρέως διαδεδομένο και εφαρμόσιμο μοντέλο αποτελεί το μοντέλο τύρβης $k-\epsilon$ (Jones & Launder, 1972, Launder & Spalding, 1974) στο οποίο η δεύτερη εξίσωση μεταφοράς ϵ μοντελοποιεί την καταστροφή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας. Παρά τις παραδοχές που γίνονται στην μοντελοποίηση της εξίσωσης του ϵ , το μοντέλο συμπεριφέρεται εντυπωσιακά καλά, σε σχέση με την απλότητά του ως προς την περιπλοκότητα της τύρβης, σε μεγάλο εύρος ροών. Το μοντέλο $k-\epsilon$ δεν παρέχει μεγάλη ακρίβεια σε περιπτώσεις όπως ελεύθερες ροές, ροές που προσκρούουν σε στερεό σώμα, ροές με αποκόλληση και γενικότερα ροές με μεγάλη ανισοτροπία τάσεων όπως ροές περιδίνησης. Επιπλέον, φαίνεται να υπερεκτιμά το ρυθμό

καταστροφής της τύρβης, δηλαδή παρατηρείται υψηλή τιμή υπολογισμού του τυρβώδους ιξώδους, καταπνίγοντας με αυτό τον τρόπο τις δίνες. Ωστόσο λόγω της ευρείας χρήσης του, αποτελεί αντικείμενο ενδιαφέροντος για την επιστημονική κοινότητα, καθώς η υπερανάλυσή του έχει κάνει σαφή τα τρωτά και άτρωτα σημεία του. Υπάρχουν και άλλα μοντέλα που χρησιμοποιούν την εξίσωση του ϵ ως δεύτερη εξίσωση και ανήκουν στην γενική κατηγορία *τροποποιημένα μοντέλα τύρβης k-ε*. Κάτωθεν αναφέρονται και περιγράφονται συνοπτικά τα κυριότερα εξ' αυτών:

- **RNG k-ε** (Yakhot & Orszag, 1986): θεωρείται ότι διορθώνει την ανεπάρκεια του k-ε στην υπερεκτίμηση του ρυθμού καταστροφής της τύρβης, καθώς έχει έναν επιπλέον όρο παραγωγής στην εξίσωση μεταφοράς του ϵ . Το μοντέλο παρατηρήθηκε ότι έχει καλύτερη συμπεριφορά σε αποκολλήσεις και επανακολλήσεις της ροής, όμοια συμπεριφορά με το k-ε για μικρές διατμητικές τάσεις και χειρότερη συμπεριφορά σε πίδακες και πλούμια.
- **MMK k-ε** (Tsuchiya et al., 1997): θεωρείται καταλληλότερο για περιπτώσεις ατμοσφαιρικών ροών, επιβάλλοντας έναν όρο διόρθωσης στην τυρβώδη συνεκτικότητα μ_t ώστε να περιορίζεται η υπερεκτίμηση σε περιοχές πρόσκρουσης.
- **Kato-Launder** (Kato & Launder, 1993): εδώ επιβάλλεται και πάλι μια διόρθωση σαν το μοντέλο MMK k-ε, μόνο που επιβάλλεται στον όρο παραγωγής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k.
- **Μικρού αριθμού Reynolds k-ε** (Jones & Launder, 1972): αυτού του είδους τα μοντέλα δεν χρησιμοποιούν συναρτήσεις τοίχου αλλά επιλύουν μέχρι το στερεό όριο, κάνοντας χρήση πυκνότερου υπολογιστικού πλέγματος.
- **Μοντέλο δύο στρωμάτων k-ε** (Rodi, 1991): αυτού του είδους τα μοντέλα χρησιμοποιούν άλλο μοντέλο κοντά στον τοίχο (συνηθέστερα μοντέλο 1 εξίσωσης) και άλλο μακριά από τον τοίχο (το κλασικό k-ε).
- **Ανισότροπα μοντέλα k-ε** : αυτού του είδους τα μοντέλα δεν περιορίζονται από την υπόθεση Boussinesq.
- **Μοντέλο k- ω** (Wilcox, 1988): θεωρείται και αυτό μοντέλο 2 εξισώσεων μόνο που στην περίπτωση της δεύτερης εξίσωσης χρησιμοποιείται άλλη ποσότητα από το ϵ (καταστροφή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας), το ω που αντιστοιχεί στον ειδικό ρυθμό καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και ισοδυναμεί με ϵ/k (t^{-1}). Το αντίστροφο του ω είναι η κλίμακα μήκους στην οποία συμβαίνει η καταστροφή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας. Το μοντέλο αυτό έχει αποδειχθεί επιτυχές τόσο σε ελεύθερες ροές όσο και σε ροές κοντά σε στερεά όρια, αλλά δεν υπάρχει εμπειρία από την χρήση του στην ατμόσφαιρα.
- **SST k- ω** (Menter, 1993): αποτελεί το τροποποιημένο μοντέλο k- ω , εκμεταλλευόμενο τα πλεονεκτήματα που παρέχει το απλό μοντέλο k- ω κοντά στο τοίχωμα και το μοντέλο k-ε στο υπόλοιπο πεδίο ροής. (Κουτσουράκης, 2014)

2.2.2.4 Μοντέλα τύρβης περισσοτέρων από 2 εξισώσεων / μη γραμμικά

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν μοντέλα τα οποία λύνουν 3 ή ακόμη και 4 εξισώσεις μεταφοράς. Χαρακτηριστικό μοντέλο αυτής της κατηγορίας αποτελεί το V2F (Durbin,1991) το οποίο εκτός από τις εξισώσεις μεταφοράς του k και του ε , λύνει άλλη μία για την ποσότητα ν^2 (που προσεγγιστικά αντιπροσωπεύει την κάθετη στο στερεό όριο ένταση τύρβης), καθώς και μια ελλειπτική εξίσωση για τον όρο ανακατανομής f που χρησιμοποιείται στην εξίσωση του ν^2 . Το μοντέλο αυτό είναι μικρού αριθμού Reynolds και μάλιστα δεν απαιτεί γνώση της απόστασης από τον τοίχο. Αν και έχει στοιχεία ανισοτροπίας κοντά στο στερεό όριο και χρησιμοποιεί για κλίμακα ταχύτητας το ν^2 αντί για το k , εξακολουθεί να βασίζεται στην υπόθεση Boussinesq. Τα μοντέλα που χρησιμοποιούν την υπόθεση Boussinesq, υποθέτουν ομοιομορφία των τάσεων Reynolds. Για να αρθεί αυτή η παραδοχή, πρέπει να χρησιμοποιήσει μοντέλα ανώτερης τάξης, ή να προσπαθήσει να τροποποιήσει κατάλληλα τα ήδη υπάρχοντα. Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα ανισότροπα ή μη γραμμικά μοντέλα (συνήθως k - ε) με χαρακτηριστικό παράδειγμα το μοντέλο του Speziale (1987), το οποίο απλοποιήθηκε από τους Gatski & Speziale (1993) για να έχει καλύτερη ευστάθεια. Στο μοντέλο αυτό, υπολογίζονται τα k και ε ενώ οι τάσεις Reynolds δίνονται από αλγεβρικές σχέσεις που εμπλέκουν τα k και ε μαζί με τετραγωνικούς όρους κλίσεων ταχυτήτων. Ενίοτε τα μοντέλα αυτά θεωρούνται 1.5 τάξεως και μοιάζουν πολύ με τα ARSM. (Κουτσουράκης, 2014)

2.2.2.5 Μοντέλα τύρβης τάσεων Reynolds (RSM) & αλγεβρικά τάσεων Reynolds (ARSM)

Στα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούνται εξισώσεις μεταφοράς των τάσεων Reynolds, που προκύπτουν από τις Navier-Stokes και εμπλέκουν τριπλές συσχετίσεις διακυμάνσεων. Πρόκειται δηλαδή για ανώτερου επιπέδου προσέγγιση και γι' αυτό λέγονται μοντέλα δεύτερης τάξεως. Ωστόσο οι όροι των εξισώσεων τους είναι δύσκολο να μοντελοποιηθούν.

Στα **RSM** δεν γίνεται χρήση της υπόθεσης Boussinesq. Η κάθε τάση υπολογίζεται χωριστά από τη δική της εξίσωση μεταφοράς, οπότε προκύπτουν 6 διαφορικές εξισώσεις για τις τάσεις και μια έβδομη για το ε . Έτσι στα RSM μοντέλα μπορούν να υπολογιστούν ανισοτροπίες των τάσεων και να προβλέψουν για παράδειγμα δευτερεύουσες ροές σε ένα κανάλι. Η χρήση τους είναι περιορισμένη, καθώς παρουσιάζουν δυσκολίες στη σύγκλιση και τα αποτελέσματά τους δεν είναι πάντα τόσο καλύτερα όσο θα περίμενε κανείς. Το μειονέκτημα των 7 διαφορικών εξισώσεων που θέλουν μεγάλο υπολογιστικό χρόνο, μετριάζεται κατά πολύ με τα αλγεβρικά μοντέλα τάσεων Reynolds (**ARSM**). Το πιο γνωστό μοντέλο είναι το μοντέλο του Rodi (1991) κατά το οποίο εκφράζονται οι όροι μεταφοράς και διάχυσης των εξισώσεων μεταφοράς των τάσεων Reynolds συναρτήσει γνωστών ποσοτήτων, υποθέτοντας ότι η μεταφορά των τάσεων Reynolds είναι ανάλογη της μεταφοράς της κινητικής ενέργειας. Το μειονέκτημα του μοντέλου είναι τα σοβαρά προβλήματα αριθμητικής αστάθειας. Τα ARSM οριακά θεωρούνται τα μοντέλα δεύτερης τάξης

και πολλοί ερευνητές τα θεωρούν 1.5 τάξεως, μαζί με τα μη γραμμικά μοντέλα δύο εξισώσεων, με τα οποία έχουν πάρα πολλά κοινά στοιχεία. (Κουτσουράκης, 2014)

Στην εργασία αυτή, χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία RANS για να προσομοιωθεί το πρόβλημα της διασποράς ρύπου. Γενικά η μεθοδολογία RANS προτιμάται σε προβλήματα steady state δηλαδή σε προβλήματα που δεν παρατηρείται χρονική μεταβολή των προς υπολογισμό ποσοτήτων. Ως τέτοιο πρόβλημα μόνιμης κατάστασης αντιμετωπίστηκε και το υπολογιστικό πρόβλημα της παρούσας εργασίας. Ωστόσο, δίνεται η δυνατότητα να προσεγγιστούν και ασταθή προβλήματα ροής, αντιμετωπίζοντάς τα σαν μια αλληλουχία σταθερών προβλημάτων. Η μεθοδολογία αυτή λέγεται Unsteady RANS (URANS). Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι ένα από τα βασικά πλεονεκτήματά της μεθοδολογίας RANS, είναι η ταχύτητα λήψης αποτελέσματος συγκριτικά πάντα με τις δύο προαναφερθείσες μεθοδολογίες, DNS και LES. Επίσης, το γεγονός ότι δεν έχει υψηλές απαιτήσεις και περιορισμούς ως προς την ποιότητα του πλέγματος αποτελεί θετικό στοιχείο καθώς συνδυάζεται με άκρως ικανοποιητικά αποτελέσματα σε μη χρονικά μεταβαλλόμενα πεδία. Από την άλλη μεριά, εμφανίζει και τρωτά σημεία. Βασικά της μειονεκτήματα είναι η ανάγκη μοντελοποίησης της τύρβης η οποία εξαρτάται από το φυσικό πρόβλημα, η αδυναμία υπολογισμού της τύρβης και των χαρακτηριστικών της καθώς επίσης η μειωμένη ακρίβεια της μεθόδου σε ασταθείς ροές. Στη συνέχεια θα γίνει μια παρουσίαση των μαθηματικών σχέσεων που διέπουν την μεθοδολογία RANS όπως επίσης και των 4 μοντέλων τύρβης που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία (k-ε,MMK k-ε, k-ω, SST k-ω)

2.3 Οι εξισώσεις RANS

Οι εξισώσεις RANS αποτελούν μια τροποποιημένη μορφή των εξισώσεων Navier-Stokes. Κάθε ποσότητα αναφέρεται ως άθροισμα μιας μέσης τιμής κατά Reynolds και μιας διακύμανσης που ωστόσο η χρήση των κατάλληλων παραδοχών και ο επιτυχής συνδυασμός πράξεων οδηγούν τις εξισώσεις σε μια νέα μορφή, περισσότερο πρακτική που αφορά τις μέσες τιμές των μεταβλητών. Σε περιπτώσεις ασυμπίεστης, ισόθερμης, μόνιμης ροής λαμβάνονται οι κάτωθεν εξισώσεις:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.1)$$

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i u_j} \right) \quad (2.2)$$

$$U_i = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u_i dt \quad (2.3)$$

$$u_i = U_i + u_i' \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U_j \frac{\partial C}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_j \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + Q_C \quad (2.5)$$

$$D_j = \nu_j / S_{C_j}$$

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_j \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad (2.6)$$

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i} \quad (2.7)$$

όπου ν : η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού, u_i' : η τυρβώδης διακύμανση της ταχύτητας, U_i : η μέση τιμή της ταχύτητας

Η μέση ταχύτητα λαμβάνεται από τον τύπο λήψης των μέσων τιμών των μεταβλητών κατά Reynolds :

$$U_i = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u_i dt \quad (2.8)$$

$$u_i = U_i + u_i' \quad (2.9)$$

Οι τελευταίες εξισώσεις (2.8) και (2.9), θυμίζουν πολύ τις εξισώσεις Navier-Stokes με τη διαφορά ότι αφορούν μέσες τιμές ποσοτήτων και έχουν ένα επιπλέον όρο στο τέλος που ονομάζεται *τάσεις Reynolds* και ο οποίος όρος εμπλέκει τις διακυμάνσεις της ταχύτητας. Ο όρος αυτός είναι άγνωστος και θα πρέπει να εκφραστεί μέσω γνωστών ποσοτήτων της μέσης ροής. Εδώ έγκειται και η δυσκολία μοντελοποίησης της τύρβης, που ταλανίζει την επιστήμη δεκαετίες, λόγω περιπλοκότητας της ίδιας της τύρβης.

2.4 Μοντέλα τύρβης

Όπως έγινε φανερό παραπάνω χρειάζονται κατάλληλα μοντέλα που να μπορούν να υπολογίζουν την συνεισφορά της τύρβης στις εξισώσεις RANS. Ακολούθως παρατίθενται οι βασικές θεωρητικές αρχές για τα τέσσερα μοντέλα τύρβης - k-ε, MMK k-ε, k-ω, SST k-ω -, που δοκιμάστηκαν στα πλαίσια της εργασίας.

2.4.1 Μοντέλο $k-\varepsilon$

Στην τυρβώδη ροή, φαινομενικά παρατηρείται μια αύξηση των διατμητικών τάσεων του ρευστού. Αυτή η παρατήρηση οδήγησε τον Boussinesq στην υπόθεση ότι προσεγγιστικά οι τάσεις Reynolds ή τυρβώδεις τάσεις μπορούν να περιγραφούν μακροσκοπικά με τρόπο αντίστοιχο που περιγράφονται οι στρωτές ροές, σαν το γινόμενο μιας συνεκτικότητας, της τυρβώδους συνεκτικότητας ν_t και των κλίσεων των μέσων ταχυτήτων. Η γενικευμένη μορφή της υπόθεσης Boussinesq δίνεται :

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad (2.10)$$

Ο τελευταίος όρος που μερικές φορές παραλείπεται, εξασφαλίζει ότι αθροίζοντας τις κύριες τάσεις λαμβάνεται η τυρβώδης κινητική ενέργεια k , από τη σχέση:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i} \quad (2.11)$$

Τα μοντέλα τύρβης δύο εξισώσεων κάνουν χρήση της υπόθεσης Boussinesq. Έτσι το πρόβλημα ανάγεται σε πρόβλημα προσδιορισμού της τυρβώδους συνεκτικότητας ν_t .

Το πιο καλά μελετημένο και ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο για τον προσδιορισμό του ν_t είναι το μοντέλο τύρβης $k-\varepsilon$. Το μοντέλο τύρβης $k-\varepsilon$ αποτελεί πλέον το μοντέλο «αναφοράς» για πρακτικούς υπολογισμούς στο χώρο της ρευστομηχανικής απ' όταν προτάθηκε από τους Spalding και Launder (1972). Η ευρωστία, η οικονομία και η εύλογη ακρίβειά του για ένα ευρύ φάσμα τυρβωδών φαινομένων εξηγεί τη δημοτικότητά του σε προσομοιώσεις μεταφοράς θερμότητας, ροών βιομηχανικού ενδιαφέροντος και αστικών ροών. Είναι ένα ημι-εμπειρικό μοντέλο και οι εξισώσεις που το περιγράφουν βασίστηκαν σε πειραματικές μετρήσεις και σε φαινομενολογικές εκτιμήσεις. Καθώς τα πλεονεκτήματα και οι αδυναμίες του $k-\varepsilon$ μοντέλου έχουν γίνει γνωστά, διάφορες βελτιώσεις έχουν προταθεί κατά καιρούς για να βελτιώσουν τις επιδόσεις του και την ακρίβεια υπολογισμού των τυρβωδών μεγεθών. Μία από αυτές τις παραλλαγές είναι και το MMK $k-\varepsilon$ μοντέλο. Χρησιμοποιούνται δύο εξισώσεις, από τις οποίες η εξίσωση για το k προέκυψε από ακριβείς μαθηματικές θεωρήσεις ενώ η εξίσωση μεταφοράς για το ε λήφθηκε με λογικούς συλλογισμούς και παρουσιάζει ομοιότητες με τη μαθηματικά ακριβή εξίσωση του k . Η βασική υπόθεση πάνω στην οποία βασίστηκε η ανάπτυξη του μοντέλου $k-\varepsilon$, έγκειται στο ότι η ροή είναι πλήρως τυρβώδης, και η επίδραση του μοριακού ιξώδους είναι αμελητέα. Επομένως η χρήση του μοντέλου $k-\varepsilon$ είναι έγκυρη μόνο για περιπτώσεις πλήρως τυρβώδους ροής. Στο μοντέλο αυτό επιλύονται διαφορικές εξισώσεις μεταφοράς για την τυρβώδη κινητική ενέργεια k και το ρυθμό καταστροφής τις κινητικής ενέργειας τις τύρβης ε και το ν_t προκύπτει από τον τύπο:

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.12)$$

Οι διαφορικές εξισώσεις για το k και το ε προκύπτουν με κατάλληλη επεξεργασία και μοντελοποίηση από τις εξισώσεις Navier-Stokes και είναι οι εξής :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G - \varepsilon \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.14)$$

όπου $G = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$

Οι σταθερές των εξισώσεων ισούνται με :

$$C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92, C_{\mu} = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_{\varepsilon} = 1.3$$

Οι όροι στις εξισώσεις μεταφοράς του k και του ε εκφράζουν αντίστοιχα ρυθμό αλλαγής (είναι μηδενικός για μόνιμη ροή), μεταφορά με συναγωγή, μεταφορά με διάχυση, ρυθμό παραγωγής και ρυθμό καταστροφής ή απορρόφησης.

Το μοντέλο k - ε έχει το μειονέκτημα να θεωρεί σχεδόν ισότροπη τύρβη και επιπλέον έχει ακρίβεια μόνο σε μεγάλους αριθμούς Re ($Re = U \cdot l / \nu$, όπου l χαρακτηριστικό μήκος), βάσει των παραδοχών που έγιναν και κατά την μοντελοποίηση των διαφορικών εξισώσεων. Απαιτεί μόνο αρχικές και οριακές συνθήκες, είναι αρκετά μελετημένο και δίνει πολύ καλά αποτελέσματα για μοντέλο δύο εξισώσεων. Αδυνατεί όμως να κάνει σωστή πρόβλεψη σε αρκετές ειδικές περιπτώσεις όπως: ελεύθερες ροές, ροές με μεγάλες πρόσθετες παραμορφώσεις (π.χ. καμπύλα οριακά στρώματα, ροές περιδίνησης), περιστρεφόμενες ροές, πλήρως ανεπτυγμένες ροές σε μη κυκλικούς αγωγούς, ροές πρόσκρουσης και άλλες. Τέλος το μοντέλο k - ε είναι γνωστό πως υπερεκτιμά το ρυθμό καταστροφής της τύρβης, δηλαδή σε περιπτώσεις ανακυκλοφορίας το τυρβώδες ιξώδες που υπολογίζει είναι πολύ υψηλό, καταπνίγοντας έτσι τις δίνες. (Versteeg H.K., Malalasekera W., 2007)

2.4.2 Μοντέλο MMK k - ε

Όπως πολλές φορές έχει προαναφερθεί, το k - ε μοντέλο πέρα από τα θετικά στοιχεία που παρουσιάζει, παρουσιάζει ταυτόχρονα και κάποιες αδυναμίες. Οι αδυναμίες αυτές σχετίζονται με την αστοχία του να προβλέψει το πεδίο ροής όταν περιλαμβάνονται πρόσκρουση, διαχωρισμός κλπ. Ως εκ τούτου, το μοντέλο k - ε δεν μπορεί να αναπαράγει επιτυχώς κατανομές πίεσης ανέμου που δρουν σε στέγες και σε τοιχώματα κτιρίων. Αυτό συμβαίνει διότι το κλασικό μοντέλο k - ε τείνει να υπερεκτιμά την παραγωγή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας (P_k) σε περιοχές σημείων ανακοπής. Τέτοιου είδους φαινόμενα δεν παρατηρούνται σε περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται οι μέθοδοι LES (Large Eddy Dissipation), ASM (Algebraic Stress Model) & DSM (Differential Stress Model) όμως αυτού του είδους τα μοντέλα παρουσιάζουν υψηλό υπολογιστικό κόστος και έντονη αστάθεια με αποτέλεσμα να

μην προτιμώνται. Για αυτό το λόγο και οι Launder – Kato πρότειναν ένα τροποποιημένο μοντέλο $k-\varepsilon$, το LK $k-\varepsilon$, το οποίο μοντέλο ελαχιστοποιεί την εκτεταμένη παραγωγή τύρβης γύρω από ένα σημείο ανακοπής, τροποποιώντας την έκφραση της παραγωγής τυρβώδους κινητικής ενέργειας (P_k). Αν και το LK $k-\varepsilon$ μοντέλο καταφέρνει να επανορθώσει την υπερεκτίμηση του k γύρω από την περιοχή πρόσκρουσης, ωστόσο το μοντέλο έχει μια ασυνέπεια στην μοντελοποίηση των τάσεων Reynolds ($-\overline{u_i u_j}$) και της παραγωγής τύρβης (P_k). Στην εξίσωση μεταφοράς της μέσης ενεργειακής ροής $K = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i}$, υπάρχει ένα όρος που έχει την ίδια μορφή με τον όρο (P_k), με αντίθετο ωστόσο πρόσημο. Ο όρος αυτός παίζει ρόλο στην μεταφορά της κινητικής ενέργειας από τη μέση ροή στην τύρβη. Στην περίπτωση όμως του LK $k-\varepsilon$ μοντέλου, ο όρος που αντιστοιχεί στην P_k στην εξίσωση του K δεν λαμβάνει την ίδια μορφή με την P_k . Αυτό συμβαίνει διότι το LK $k-\varepsilon$ μοντέλο αναθεωρεί την παραγωγή τυρβώδους κινητικής ενέργειας μόνο στην εξίσωση του k και χρησιμοποιεί τη συμβατική προσέγγιση του $-\overline{u_i u_j}$, βασισμένη στο κλασσικό μοντέλο $k-\varepsilon$ στην εξίσωση της ορμής. Εν ολίγοις ο όρος P_k που εμφανίζεται στη εξίσωση μέσης κινητικής ενέργειας K και στην εξίσωση τυρβώδους κινητικής ενέργειας k , δεν λαμβάνει την ίδια μορφή. Εντοπίζοντας αυτού του είδους την αστοχία στο μοντέλο LK $k-\varepsilon$, οι Murakami-Mochida-Kondo (MMK) πρότειναν ένα νέο τροποποιημένο μοντέλο $k-\varepsilon$, των οποίων η τροποποίηση δεν λαμβάνει χώρα στον όρο της παραγωγής τυρβώδους κινητικής ενέργειας P_k αλλά στον όρο της τυρβώδους συνεκτικότητας ν_t . (Tsuchiya et al.,1997)

Το LK $k-\varepsilon$ μοντέλο εκφράζει την παραγωγή τυρβώδους κινητικής ενέργειας P_k σαν μια συνάρτηση των S και Ω , όπου S είναι ο ρυθμός παραμόρφωσης, και Ω το μέτρο στροβιλότητας με στόχο να ελαχιστοποιηθεί η τυρβώδης κινητική ενέργεια k . Το MMK $k-\varepsilon$ μοντέλο άρει αυτή την αστοχία, τροποποιώντας την έκφραση της ν_t . Συγκεκριμένα ο συντελεστής C_μ που χρησιμοποιείται στον τύπο ορισμού της τυρβώδους συνεκτικότητας, ορίζεται σαν μια συνάρτηση των Ω/S . Αν και ο τύπος έκφρασης της P_k παραμένει ο ίδιος με τον αντίστοιχο του κλασσικού $k-\varepsilon$ μοντέλου, η τιμή της P_k που λαμβάνεται είναι μικρότερη από την αντίστοιχη ληφθείσα τιμή του $k-\varepsilon$ μοντέλου όταν $\Omega/S < 1$. Αναλυτικά, παρατίθενται οι τύποι για τα μοντέλα $k-\varepsilon$, LK $k-\varepsilon$ και MMK $k-\varepsilon$ έτσι ώστε να γίνουν κατανοητά (και με τύπους) όσα γράφηκαν και να διευκολυνθεί η μεταξύ τους σύγκριση. (Tsuchiya et al.,1997)

- Κλασσικό μοντέλο $k-\varepsilon$

$$P_k = \nu_t S^2 \quad (2.15) \quad \text{με} \quad \nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.16) \quad S = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2} \quad (2.17)$$

- Μοντέλο LK k - ε

$$P_k = \nu_t S \Omega \quad (2.18) \quad \text{με} \quad \nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.19) \quad \Omega = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2} \quad (2.20)$$

- Μοντέλο MMK k - ε

$$P_k = \nu_t S^2 \quad (2.21) \quad \text{με}$$

$$\nu_t = C_\mu^* \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{όπου} \quad C_\mu^* = C_\mu \frac{\Omega}{S} \quad \left(\frac{\Omega}{S} < 1 \right) \quad (2.22)$$

$$\nu_t = C_\mu^* \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{όπου} \quad C_\mu^* = C_\mu \quad \left(\frac{\Omega}{S} > 1 \right) \quad (2.23)$$

2.4.3 Μοντέλο k - ω

Το πιο σημαντικό εναλλακτικό μοντέλο 2 εξισώσεων -πλην του k - ε - αποτελεί το μοντέλο k - ω το οποίο μοντέλο προτάθηκε από τον Wilcox και το οποίο επιλύει ως δεύτερη εξίσωση, το ω που αντιστοιχεί στον ειδικό ρυθμό καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και ισοδυναμεί με ε/k (t^{-1}). Η τυρβώδης συνεκτικότητα δίνεται από τον τύπο :

$$\nu_t = \frac{k}{\omega} \quad (2.24)$$

Οι τάσεις Reynolds υπολογίζονται με βάση την υπόθεση Boussinesq όπως έχει αναλυθεί, με τύπους, προγενέστερα στο κείμενο (Κεφαλαίο 2).

Η εξίσωση μεταφοράς για την τυρβώδη κινητική ενέργεια k και για τον ειδικό ρυθμό καταστροφής της ω , για μεγάλους αριθμούς Reynolds, δίνεται από τους τύπους:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad}(k) \right] + P_k - \beta^* \rho k \omega \quad (2.25)$$

$$\text{όπου} \quad P_k = \left(2\mu_t S_{ij} S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) \quad P_k: \text{ρυθμός παραγωγής τυρβώδους κινητικής ενέργειας}$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \text{div}(\rho \omega U) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \text{grad}(\omega) \right] + \gamma_1 \left(2\rho S_{ij} S_{ij} - \frac{2}{3} \rho \omega \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) - \beta_1 \rho \omega^2 \quad (2.26)$$

Με άλλα λόγια για το k, ω ισχύουν :

Ρυθμός αλλαγής k ή ω	+	Μεταφορά με συναγωγή του k ή ω	=	Αδρανειακή μεταφορά του k ή ω με διάχυση	+	Ρυθμός Παραγωγής k ή ω	-	Ρυθμός απώλειας k ή ω
-------------------------------	---	---	---	---	---	---------------------------------	---	--------------------------------

Οι σταθερές τιμές των εξισώσεων του μοντέλου $k-\omega$ λαμβάνουν τιμές ίσες με :

$$\sigma_k = 2.0, \sigma_\omega = 2.0, \gamma_1 = 0.553, \beta_1 = 0.075, \beta^* = 0.09$$

Το μοντέλο $k-\omega$ προσέλκυσε το ερευνητικό ενδιαφέρον διότι η ολοκλήρωση στο τοίχωμα δεν απαιτεί wall-damping functions σε εφαρμογές χαμηλών αριθμών Reynolds. Η τιμή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k στο τοίχωμα είναι μηδενική. Ο ειδικός ρυθμός καταστροφής του ω απειρίζεται στο τοίχωμα αλλά συνηθίζεται να επιβάλλεται μια μεγάλη τιμή στο τοίχωμα ή ακολουθείται η πρόταση του Wilcox ο οποίος παρότρυνε την εφαρμογή υπερβολικής διακύμανσης $\omega_p = 6\nu / (\beta_1 y_p^2)$ στα σημεία του πλέγματος κοντά στο τοίχωμα. Ωστόσο η εμπειρία απέδειξε, ότι η επιβολή της μιας ή της άλλης μεθόδου κατά την εφαρμογή του μοντέλου $k-\omega$ δεν επηρεάζει σημαντικά τα τελικά αποτελέσματα. Στη είσοδο, οι τιμές των k και ω , πρέπει να προσδιορίζονται ενώ στην έξοδο, συνηθίζεται η επιβολή μηδενικών κλίσεων. Η οριακή συνθήκη του ω σε μια ελεύθερη ροή κατά την οποία η τυρβώδης κινητική ενέργεια k τείνει στο 0 ($k \rightarrow 0$) και το ω τείνει στο 0 ($\omega \rightarrow 0$), είναι ιδιαίτερος δύστροπη. Η εξίσωση (2.24) υποδηλώνει ότι η τυρβώδης συνεκτικότητα απειρίζεται όταν το ω τείνει στο 0 ($\omega \rightarrow 0$) γι' αυτό και θα πρέπει να καθορίζεται μια μικρή, μη μηδενική τιμή του ω . (Versteeg H.K., Malalasekera W., 2007), (Wilcox, 1998),

2.4.4 Μοντέλο SST $k-\omega$

Το (SST) $k-\omega$ μοντέλο αναπτύχθηκε από τον Menter με σκοπό να συνδυάσει την καλή συμπεριφορά του απλού μοντέλου $k-\omega$ για τυρβώδη φαινόμενα που εκδηλώνονται κοντά σε τοιχώματα, με την ακρίβεια του μοντέλου $k-\epsilon$ που δίνει άριστες προβλέψεις για πλήρως ανεπτυγμένες τύρβες σε ελεύθερο πεδίο. Διατηρώντας τον ίδιο τρόπο υπολογισμού των τάσεων Reynolds και την ίδια εξίσωση για την τυρβώδη κινητική ενέργεια k όπως στο μοντέλο $k-\omega$ του Wilcox, και τροποποιώντας την δεύτερη εξίσωση ω , λαμβάνονται τα εξής:

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \text{div}(\rho\omega U) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega,1}} \right) \text{grad}(\omega) \right] + \gamma_2 \left(2\rho S_{ij} \Omega_{ij} - \frac{2}{3} \rho \omega \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) - \beta_2 \rho \omega^2 + 2 \frac{\rho}{\sigma_{\omega,2}} \frac{\partial k}{\partial x_k} \frac{\partial \omega}{\partial x_k} \quad (2.27)$$

Η εξίσωση (2.27) συγκρινόμενη με την εξίσωση (2.26) του μοντέλου $k-\omega$, παρατηρείται ότι υπερτερεί μιας και έχει ένα επιπλέον όρο στο δεξί μέλος $\left\{ 2 \frac{\rho}{\sigma_{\omega,2}} \frac{\partial k}{\partial x_k} \frac{\partial \omega}{\partial x_k} \right\}$

που είναι ο επιπλέον όρος διάχυσης, ο οποίος προκύπτει κατά τη διάρκεια της $\epsilon=k\omega$

μεταμόρφωσης του όρου διάχυσης στην ε-εξίσωση. Εν συνεχεία, συνοψίζονται μια σειρά από τροποποιήσεις του Menter με σκοπό τη βελτιστοποίηση της επίδοσης του SST k- ω μοντέλου. Αναλυτικά:

- Διορθωμένες τιμές σταθερών

$$\sigma_k=1.0, \sigma_{\omega,1}=2.0, \sigma_{\omega,2}=1.17, \gamma_2=0.44, \beta_2=0.083, \beta^*=0.09$$

- Blending functions (Συνδυαστικές συναρτήσεις): Αριθμητικές αστάθειες δημιουργούνται εξαιτίας των διαφορών που παρατηρούνται στις υπολογιζόμενες τιμές της συνεκτικότητας με το μοντέλο k- ϵ στην περιοχή πλήρους τυρβώδους ροής και με το τροποποιημένο μοντέλο k- ϵ , κοντά στο τοίχωμα. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται συνδυαστικές συναρτήσεις με σκοπό την ομαλή μετάβαση μεταξύ των 2 μοντέλων. Οι συνδυαστικές συναρτήσεις εισάγονται στην εξίσωση για να τροποποιήσουν τον επιπλέον όρο διάχυσης και ταυτόχρονα χρησιμοποιούνται ως σταθερές μοντέλου, λαμβάνοντας την τιμή C_1 για το αρχικό k- ω μοντέλο και την τιμή C_2 στο τροποποιημένο κατά Menter k- ϵ μοντέλο:

$$C = F_C C_1 + (1 - F_C) C_2 \quad (2.28)$$

Τυπικά, μια συνδυαστική συνάρτηση $F_C = F_C(l_t/y, Re_y)$ είναι μια συνάρτηση του λόγου τύρβης, ($l_t = \sqrt{k}/\omega$) και απόσταση y από το τοίχωμα και από τον τυρβώδη αριθμό Reynolds ($Re_y = y^2 \omega/\nu$). Η F_C λήφθηκε ώστε :

- Να είναι μηδέν στο τοίχωμα
- Να τείνει στην μονάδα στο ανοιχτό πεδίο
- Να δημιουργεί μια ομαλή μετάβαση γύρω από μια ίση απόσταση μεταξύ τοιχώματος και αρχής οριακού στρώματος

Με αυτόν τον τρόπο συνδυάζονται αποτελεσματικά η καλή συμπεριφορά του μοντέλου k- ω κοντά στα τοιχώματα και η ευρωστία του k- ϵ μοντέλου στο ευρύτερο πεδίο κατά τρόπο, αριθμητικά ευσταθές. (Versteeg H.K., Malalasekera W., 2007), (Menter, F. R. 1993)

Κεφάλαιο 3

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια μεθοδολογία για την αριθμητική επίλυση των ρευστομηχανικών πεδίων ροής ασυμπίεστων ρευστών και των θερμικών πεδίων σε ρευστά και στερεά. Η εφαρμογή της μεθοδολογίας μπορεί να είναι ευρεία, από ροές σε κλειστούς χώρους όπως είναι αγωγοί μέχρι την ροή γύρω από στερεά σώματα, όπως είναι τα κτίρια. Η μεθοδολογία (και ο υπολογιστικός κώδικας σε fortran) που θα παρουσιαστεί είναι βασισμένη σε τρισδιάστατες (καρτεσιανές) συντεταγμένες. Τα πεδία ροής που αντιμετωπίζει μπορεί να είναι στρωτά ή τυρβώδη, με ή χωρίς μεταφορά θερμότητας. Υπάρχει η δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων μεταφοράς θερμότητας μέσα σε στερεό υλικό. Επιπλέον, μπορούν να γίνουν υπολογισμοί οι οποίοι να παρακολουθούν την χρονική εξέλιξη ενός φαινομένου ή να υπολογίζεται απευθείας η μόνιμη κατάσταση στην οποία μπορεί να καταλήξει το φαινόμενο αυτό. Η ανάπτυξη του κώδικα ξεκίνησε στο Εργαστήριο Αεροδυναμικής του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., βασίστηκε στη μεθοδολογία SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) των Patankar and Spalding (1972) αλλά διαφέρει ουσιαστικά από αυτήν ιδίως στον τρόπο αποθήκευσης των εξαρτημένων μεταβλητών και στην διαδικασία υπολογισμού της πίεσης. Στόχος εδώ είναι καταρχήν η περιγραφή της αριθμητικής προσέγγισης και στη συνέχεια η παρουσίαση του τρόπου χρήσης. Στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζεται καταρχήν η μαθηματική θεωρία στην οποία βασίζεται η επίλυση, δίνεται η βασική δομή του κώδικα ενώ ορίζονται και οι μεταβλητές που εμφανίζονται σε αυτόν. Αναλύονται τα αριθμητικά σχήματα, παρουσιάζεται η διακριτοποιημένη μορφή των προς επίλυση εξισώσεων, αναφέρονται οι οριακές συνθήκες, ο τρόπος επίλυσης των εξισώσεων και το κριτήριο σύγκλισης. Παρουσιάζεται η μεθοδολογία τοπικής πύκνωσης που αφορά το υπολογιστικό πλέγμα ενώ τέλος δίνεται και μια περιγραφή της προσωπικής συμβολής στην επέκταση του κώδικα `caffa3d_mlr`, με την ενσωμάτωση της εξίσωσης της συγκέντρωσης. (Μπούρης Δ., 2007)

3.2 Βασικές εξισώσεις RANS

Οι εξισώσεις που εκφράζουν το ρευστομηχανικό πεδίο ροής είναι οι εξισώσεις Reynolds για τυρβώδη πεδία ροής οι οποίες προκύπτουν από την χρονική ολοκλήρωση των εξισώσεων Navier-Stokes. Θεωρώντας ένα στοιχείο ρευστού που κινείται, οι εξισώσεις Reynolds, με πολύ απλά λόγια, εκφράζουν αφενός τον ρυθμό μεταβολής της ορμής του στοιχείου αυτού και αφετέρου όλες τις δυνάμεις που ασκούνται πάνω του, είτε λόγω πίεσης, είτε λόγω της συνεκτικότητας του ρευστού (μπορεί να προστεθούν, ανάλογα με την περίπτωση, και δυνάμεις άωσης, Coriolis κ.τ.λ.). Όταν η ροή που εξετάζεται είναι τυρβώδης (υπάρχουν υψηλόσυχνες χρονικές διαταραχές των μεγεθών γύρω από τη μέση τιμή τους), κατά την χρονική ολοκλήρωση προκύπτουν οι λεγόμενες τάσεις Reynolds οι οποίες είναι στατιστικές συσχετίσεις των διαταραχών των ρευστομηχανικών μεγεθών. Από το πλήθος των προσεγγίσεων που έχουν αναπτυχθεί στη βιβλιογραφία για την αντιμετώπιση των τάσεων Reynolds, ίσως η πιο διαδεδομένη είναι η υπόθεση Boussinesq, όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 2, η οποία συνδέει τις τάσεις Reynolds με τον τοπικό ρυθμό παραμόρφωσης του μέσου πεδίου μέσω του συντελεστή τυρβώδους συνεκτικότητας (μ_t):

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \quad (3.1)$$

όπου $i, j=1,2,3$ και υποδηλώνουν τις τρεις καρτεσιανές κατευθύνσεις ($x_i = x, y, z$) και τις αντίστοιχες συνιστώσες των ταχυτήτων ($u_i = u, v, w$). Το k είναι η τυρβώδης κινητική ενέργεια στην οποία θα γίνει αναφορά και στη συνέχεια. Η τυρβώδης συνεκτικότητα μ_t έρχεται να προστεθεί στην συνεκτικότητα του ρευστού μ , η οποία είναι φυσική ιδιότητά του, και εκφράζει την αυξημένη διάχυση που παρατηρείται στα τυρβώδη πεδία ροής. Για τον υπολογισμό όμως της τυρβώδους συνεκτικότητας απαιτείται επίλυση επιπλέον διαφορικών εξισώσεων μιας και δεν είναι ιδιότητα του ρευστού αλλά εξαρτάται από το πεδίο ροής και μεταβάλλεται τοπικά. Οι εξισώσεις που επιλύονται είναι οι διαφορικές εξισώσεις μεταφοράς για την τυρβώδη κινητική ενέργεια k , τυρβώδης κινητική ενέργεια μπορεί να θεωρηθεί η συνολική κινητική ενέργεια που αντιπροσωπεύεται από τις υψηλόσυχνες διαταραχές των ταχυτήτων - και τον ρυθμό απορρόφησής της ε . Έτσι, οι εξισώσεις που επιλύονται τελικά εκφράζουν την διατήρηση της μάζας, ορμής, τυρβώδους κινητικής ενέργειας k , του ρυθμού καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας ε ή της σκέδασης ανά μονάδα τυρβώδους κινητικής ενέργειας ω (το αν θα επιλυθεί η εξίσωση του ε ή του ω εξαρτάται από το είδος του μοντέλου τύρβης που χρησιμοποιείται κατά την προσομοίωση), της θερμοκρασίας T και της συγκέντρωσης C_{conc} . Οι εξισώσεις έχουν όλες την ίδια μορφή εμφανίζοντας όρους μεταφοράς (συναγωγής) και διάχυσης καθώς και έναν όρο πηγής S_ϕ , ο οποίος είναι ο μόνος όρος στην γενική μορφή των εξισώσεων που αλλάζει ανάλογα με την μεταβλητή Φ . Η γενική μορφή των εξισώσεων φαίνεται παρακάτω :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\Phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v\Phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w\Phi) - \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_{\Phi} \frac{\partial\Phi}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_{\Phi} \frac{\partial\Phi}{\partial y}\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma_{\Phi} \frac{\partial\Phi}{\partial z}\right) = S_{\Phi} \quad (3.2)$$

όπου η μεταβλητή Φ μπορεί να πάρει τις τιμές: 1 επιλύοντας την εξίσωση συνέχειας, u για την αξονική συνιστώσα της ταχύτητας, v για την ακτινική συνιστώσα της ταχύτητας, T για τη θερμοκρασία (ή h -ενθαλπία), k για την τυρβώδη κινητική ενέργεια και ε -ρυθμός καταστροφής της (δύο μεταβλητές για το μοντέλο τύρβης). Στον πίνακα 2.1 απεικονίζονται οι τιμές που λαμβάνει ο όρος πηγής ανάλογα με την μεταβλητή. (Μπούρης Δ., 2007)

Πίνακας 3.1: Οι τιμές του όρου πηγής S_{Φ} , ανά μεταβλητή Φ

-Φ-	-S_{Φ}-
1	0
u	$-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial w}{\partial x}\right)$
v	$-\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial w}{\partial y}\right)$
w	$-\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial w}{\partial z}\right)$
T	0
C	Q_{source} (τιμή ορίζουσα από το χρήστη, δοθέν πρόβλημα: $0.0067875 \text{ kg s}^{-1}$)
k	$G - \rho\varepsilon$
ε	$(C_1\varepsilon G - C_2\rho\varepsilon^2)/k$
	$G = \mu \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\}$

Επίσης ορίζονται και οι υπόλοιπες μεταβλητές με βάση το μοντέλο τύρβης k - ε , ως εξής :

$$\Gamma_{\Phi} = \frac{\mu}{\sigma_{\Phi}} \quad , \quad \mu_t = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad , \quad \mu = \mu_t + \mu_l \quad (3.3)$$

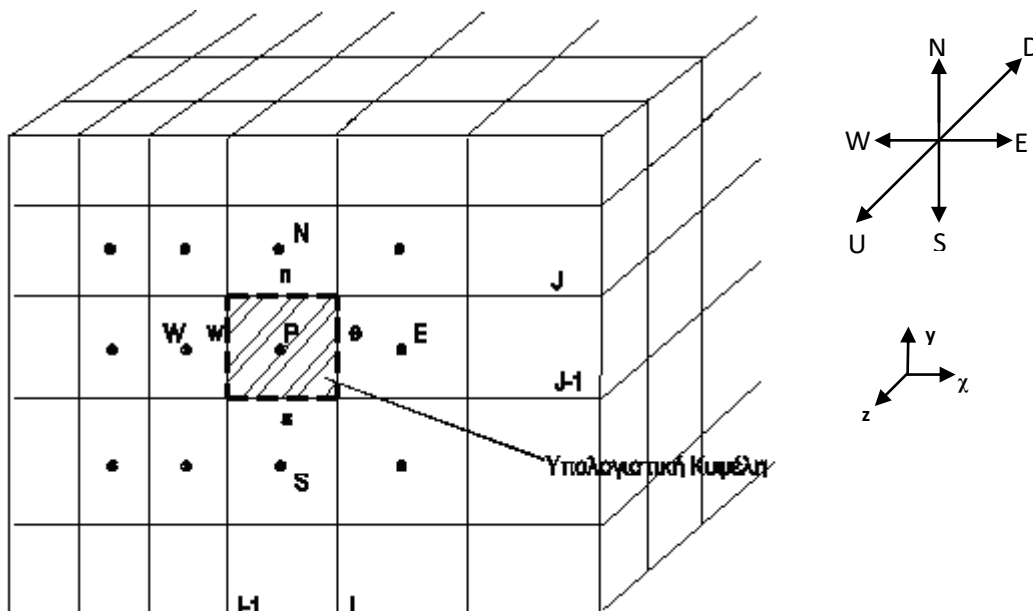
όπου μ είναι η ενεργός συνεκτικότητα που ορίζεται ως το άθροισμα της μ_l που είναι η δυναμική συνεκτικότητα του ρευστού και της μ_t , που είναι η τυρβώδης συνεκτικότητα όπως ορίζεται από την υπόθεση του Boussinesq. Οι σταθερές για το μοντέλο τύρβης k - ε είναι: $C_1=1.44$, $C_2=1.92$, $C_{\mu}=0.09$, $\sigma_{(u,v)}=1.0$, $\sigma_k=0.9$ και $\sigma_{\varepsilon}=1.3$.

Επιλύοντας τις άνωθεν εξισώσεις λαμβάνονται οι χρονικές μέσες τιμές των μεταβλητών και με αυτές το πεδίο ροής θεωρείται γνωστό. Ωστόσο επειδή, το προς

επίλυση πρόβλημα της παρούσας εργασίας θεωρείται πρόβλημα μόνιμης κατάστασης (steady state), οι εξισώσεις υπολογίζουν τις χωρικές μέσες τιμές των μεταβλητών. Παρατηρώντας τις εξισώσεις των διαφορών μεταβλητών, εντοπίζονται να είναι στενά δεμένες μεταξύ τους (με την εμφάνιση των αγνώστων μεταβλητών σε όλες σχεδόν τις εξισώσεις), προσδίνοντας στο πρόβλημα έναν ισχυρά μη-γραμμικό χαρακτήρα. Για την επίλυση ενός προβλήματος, είναι απαραίτητες οι αρχικές και οριακές συνθήκες, οι οποίες θα αναλυθούν σε επόμενη ενότητα κεφαλαίου. Η μεγαλύτερη δυσκολία κατά την διαδικασία επίλυσης των εξισώσεων έγκειται σε αυτήν ακριβώς την εξάρτηση των εξισώσεων μεταξύ τους και κυρίως, όσον αφορά στις εξισώσεις ορμής, τις συνιστώσες της ταχύτητας. Στις εξισώσεις αυτές περιέχεται η άγνωστη κλίση της πίεσης που έχει συγχωνευτεί στους όρους πηγής S_Φ , ενώ οι αντίστοιχες μεταβλητές συνδέονται και μέσω της εξίσωσης της συνέχειας στην οποία δεν εμφανίζεται καν η πίεση. Μία σωστή επίλυση του συστήματος των εξισώσεων θα πρέπει να λαμβάνει υπόψιν της την αλληλεξάρτηση των μεταβλητών, έτσι ώστε κατά την διάρκεια της επίλυσης να γίνονται διαδοχικές διορθώσεις στις μεταβλητές και να οδηγείται το σύστημα στην σύγκλιση (λύση). (Μπούρης Δ., 2007)

3.3 Ολοκλήρωση των εξισώσεων

Αρχικά, αξίζει να αναφερθεί ότι όλες οι μεταβλητές αποθηκεύονται στα κέντρα των πλεγματικών κυψελών, δηλαδή πίσω και κάτω από τον κόμβο των πλεγματικών γραμμών i,j,k. Ακολουθείται δηλαδή, ο ομόθετος τρόπος αποθήκευσής τους. Ο τρόπος αποθήκευσης πρακτικά, παριστάνεται στο σχήμα 3.1, όπου απεικονίζεται μια υπολογιστική κυψέλη, της οποίας κέντρο είναι ο κόμβος P. Στον κόμβο αυτό αποθηκεύεται το σύνολο των προς επίλυση μεταβλητών.



Σχήμα 3.1: Υπολογιστική κυψέλη (όγκος αναφοράς)

Οι εξισώσεις πεπερασμένων διαφορών για κάθε μεταβλητή Φ προκύπτουν, ολοκληρώνοντας τις εξισώσεις 3.2 πάνω στον όγκο αναφοράς που ορίζεται από τις

πλεγματικές κυψέλες (στην ουσία πρόκειται για εφαρμογή του θεωρήματος του Gauss ή του Green στο χώρο) και εκφράζοντας το αποτέλεσμα ως συνάρτηση των τιμών της μεταβλητής στα γειτονικά πλεγματικά σημεία. Ο όγκος αναφοράς που χρησιμοποιείται είναι ο ίδιος για όλες τις μεταβλητές και φαίνεται, μαζί με τους απαιτούμενους συμβολισμούς, στο σχήμα 3.1. Οι όροι μεταφοράς και διάχυσης μετατρέπονται σε επιφανειακά ολοκληρώματα πάνω στις έξι επιφάνειες: north (n), south (s), east (e), west (w), up (u) και down (d), όπως φαίνονται και στο σχήμα 3.1 ενώ ο όρος πηγής γραμμικοποιείται έτσι ώστε οι εξισώσεις 3.2, να γίνουν:

$$\begin{aligned} & \left(\rho u \Phi - \Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)_e A_e - \left(\rho u \Phi - \Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)_w A_w + \\ & \left(\rho v \Phi - \Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)_n A_n - \left(\rho v \Phi - \Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)_s A_s + \\ & \left(\rho w \Phi - \Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)_D A_D - \left(\rho w \Phi - \Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)_U A_U = (S_P \Phi_P + S_U) Vol \end{aligned} \quad (3.4)$$

Στην εξίσωση 3.4, οι δείκτες των παρενθέσεων δηλώνουν μέση τιμή της εντός παρενθέσεως ποσότητας πάνω στην αντίστοιχη επιφάνεια, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3.1 και με Vol (Volume), συμβολίζεται ο όγκος της υπολογιστικής κυψέλης ή διαφορετικά, όγκος αναφοράς. Ο όγκος αναφοράς υπολογίζεται ως: $Vol = \delta x \cdot \delta y \cdot \delta z$. Οι γραμμικοποιημένοι όροι πηγής της εξίσωσης 3.4, κάθε μεταβλητής Φ , δίνονται στον πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2.: Γραμμικοποιημένοι όροι πηγής, ανά μεταβλητή Φ .

-Φ-	$-S_P^{\Phi}$-	$-S_U^{\Phi}$-
1	0	$-\frac{\partial \rho}{\partial t}$
u	$-\frac{\rho}{\delta t}$	$\frac{(\rho u)^{n-1}}{\delta t} - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right)$
v	$-\frac{\rho}{\delta t}$	$\frac{(\rho v)^{n-1}}{\delta t} - \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right)$
w	$-\frac{\rho}{\delta t}$	$\frac{(\rho w)^{n-1}}{\delta t} - \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right)$
T	$-\frac{\rho}{\delta t}$	$\frac{(\rho T)^{n-1}}{\delta t} + G$
C	$-\frac{\rho}{\delta t}$	$\frac{(\rho C)^{n-1}}{\delta t} + G$

k	$-\frac{\rho}{\delta t} + C_\mu \frac{k\rho^2}{\mu_t}$	$\frac{(\rho k)^{n-1}}{\delta t} + G$
ε	$-\frac{\rho}{\delta t} + C_2 \frac{\varepsilon\rho}{k}$	$\frac{(\rho\varepsilon)^{n-1}}{\delta t} + C_1 C_\mu \frac{\rho k}{\mu_t} G$

Οι χρονικοί όροι που είναι εκφρασμένοι στα S_U και S_P , στην περίπτωση του δικού μας, μη χρονικά μεταβαλλόμενου προβλήματος, είναι μηδενικοί. Για να αποφευχθεί ασταθής συμπεριφορά στη σύγκλιση της μεθόδου μόνο όροι οι οποίοι είναι πάντα αρνητικοί πρέπει να περιληφθούν στον παράγοντα S_P έτσι ώστε να γίνεται πιο ισχυρή η διαγώνια μορφή του πίνακα των συντελεστών των αγνώστων του συστήματος που επιλύεται σε κάθε επανάληψη. Οι υπόλοιπες σταθερές έχουν ήδη οριστεί. Τέλος γίνεται χρήση και ενός ακόμη όρου στους όρους πηγής, ο οποίος δεν φαίνεται πιο πάνω επειδή δεν προκύπτει από τις εξισώσεις. Ο όρος αυτός έχει σταθεροποιητικό ρόλο (για τη σύγκλιση), δεν επιδρά στην τελική λύση και προκύπτει ως το γινόμενο του υπολοίπου μάζας μέσα από μία υπολογιστική κυψέλη με τη διαφορά της καινούργιας και της παλιάς τιμής της υπολογιζόμενης μεταβλητής:

$$S_+ = |\dot{m}_{net}| (\Phi_P^{prev} - \Phi_P) \quad (3.5)$$

Είναι προφανές ότι και οι δύο πολλαπλασιαζόμενες ποσότητες θα είναι μηδενικές όταν η μέθοδος θα έχει συγκλίνει. (Μπούρης Δ., 2007)

3.4 Αριθμητικό σχήμα

Για την αντιπροσώπευση των όρων μεταφοράς και διάχυσης, δηλαδή των όρων της αριστερής πλευράς της εξίσωσης 3.2, χρησιμοποιούνται αριθμητικά σχήματα ανάντη παραγωγίσιμης. Τα διαθέσιμα αριθμητικά σχήματα είναι τα εξής 2: το υβριδικό σχήμα (Hybrid scheme) και το σχήμα BSOU (Bounded Second Order Upwind scheme). Για το πώς επιδρά το κάθε αριθμητικό σχήμα στους όρους μεταφορά και διάχυσης, θα αποδοθεί μέσα από ένα παράδειγμα.

Έστω η μεταφορά ποσότητας μέσα από μία από τις τέσσερις επιφάνειες, για παράδειγμα της επιφάνειας east, A_e , η οποία βρίσκεται μεταξύ των κόμβων E και P του πλέγματος, σύμφωνα με το σχήμα 3.2. Η συνεισφορά στο επιφανειακό ολοκλήρωμα στη πλευρά e είναι :

$$\underbrace{(\rho u)_e \Phi_e A_e}_{\text{συναγωγή}} - \Gamma_{\Phi,e} \underbrace{\frac{\Phi_E - \Phi_P}{\delta x_{PE}} A_e}_{\text{διάχυση}} \quad (3.6)$$

ο Υβριδικό σχήμα (Hybrid Scheme)

Η χρήση του υβριδικού σχήματος, που είναι συνδυασμός κεντρικής και ανάντη παραγωγίσης, καθώς επίσης και ότι είναι πρώτης τάξης ακρίβειας ($\mathcal{O}(\delta x)$), θα ισχύει :

$$\begin{aligned} \Phi_e &= \Phi_P & Pe_e &> 2 \\ \Phi_e &= f\Phi_E + (1-f)\Phi_P & -2 < Pe_e < 2 & \quad (3.7) \\ \Phi_e &= \Phi_E & Pe_e &< -2 \end{aligned}$$

όπου Pe_e : είναι ο αριθμός Peclet στην ανατολική πλευρά (επιφάνεια) της υπολογιστικής κυψέλης και f : είναι συντελεστής που ορίζεται από τη γεωμετρία του πλέγματος για τη γραμμική παρεμβολή

$$Pe_e = \left(\frac{\rho u \Delta x}{\Gamma_\Phi} \right)_e, \quad f = \frac{\delta x_{Pe}}{\delta x_{PE}} \quad (3.8)$$

Συνήθως, όταν $|Pe_e| \leq 2$, ο όρος διάχυσης είναι αμελητέος και λαμβάνεται μόνο η συναγωγή από τις σχέσεις του υβριδικού σχήματος (3.7). Με παρόμοιες εκφράσεις αντιμετωπίζονται και οι υπόλοιπες τρεις πλευρές. Η χρήση όμως του υβριδικού σχήματος είναι δυνατόν να εμφανίσει προβλήματα αριθμητικής διάχυσης. Αριθμητική διάχυση εμφανίζεται λόγω των προσεγγιστικών λύσεων των διαφορικών εξισώσεων με πεπερασμένες διαφορές, οπότε τυχόν σφάλμα σε κάποιο σημείο του πεδίου μεταφέρεται ανεξάρτητα από το πεδίο ταχυτήτων (αριθμητικά) στους γειτονικούς κόμβους. (Μπούρης Δ., 2007)

ο Σχήμα BSOU (Bounded Second Order Upwind scheme)

Το σχήμα BSOU είναι ένας συνδυασμός της ανάντη παραγωγίσης πρώτης (First Order Upwind) και δεύτερης τάξης (Second Order Upwind) και γενικά εισάγει μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με το υβριδικό ενώ περιορίζει τα προβλήματα αριθμητικής διάχυσης. Γενικά το BSOU κάνει χρήση κάποιων μη γραμμικών συντελεστών ανάμιξης μεταξύ των δύο ανάντη παραγωγίσεων (FOU και SOU). Ορίζονται τα μεγέθη:

$$\hat{\Phi}_P = \frac{(\Phi_P - \Phi_W)}{(\Phi_E - \Phi_W)} \quad \text{και} \quad \gamma_e = \frac{(\Phi_E - \Phi_P)/(\Phi_P - \Phi_W)}{\Delta \xi_{Pe}^\xi / \Delta \xi_{WP}^\xi} \quad (3.9)$$

και για την επιφάνεια (e) του όγκου ολοκλήρωσης με $u_e \geq 0$ είναι :

$$\Phi_e = \begin{cases} \Phi_p & \hat{\Phi}_p < 0 \\ \Phi_w + \left(1 + \frac{\Delta \xi_{Pe}}{\Delta \xi_{WP}}\right) (\Phi_p - \Phi_w) & 0 < \hat{\Phi}_p < (\Delta \xi_{WP} / \Delta \xi_{We}) \\ \Phi_w + \left(1 + \gamma_e \frac{\Delta \xi_{Pe}}{\Delta \xi_{WP}}\right) (\Phi_p - \Phi_w) & (\Delta \xi_{WP} / \Delta \xi_{We}) < \hat{\Phi}_p < 1 \\ \Phi_p & \hat{\Phi}_p > 1 \end{cases} \quad (3.10)$$

Το σχήμα αυτό κάνει χρήση και των κόμβων που εκτείνονται πέρα από τους αμέσως γειτονικούς όγκους ολοκλήρωσης. Δηλαδή για την υπό εξέταση περίπτωση όπου $u_e < 0$, χρειάζεται και το Φ_{ww} και επομένως περιπλέκει κάπως την διακριτοποίηση, ωστόσο έχει το πλεονέκτημα της μεγαλύτερης τάξης ακρίβειας ενώ σε σχέση με άλλα σχήματα ανώτερης τάξης (π.χ. QUICK) είναι επιπλέον φραγμένο.

3.5 Διακριτοποιημένη μορφή εξίσωσης

Τέλος, η χρήση των προαναφερθέντων αριθμητικών σχημάτων θα οδηγήσει στην διακριτοποίηση της εξίσωσης (3.4), επομένως η εξίσωση θα λάβει τη μορφή :

$$(\alpha_p^\Phi - S_p^\Phi) \Phi_p = \alpha_N^\Phi \Phi_N + \alpha_S^\Phi \Phi_S + \alpha_E^\Phi \Phi_E + \alpha_W^\Phi \Phi_W + \alpha_D^\Phi \Phi_D + \alpha_U^\Phi \Phi_U + S_U^\Phi \quad (3.11)$$

$$\alpha_p^\Phi = \alpha_N^\Phi + \alpha_S^\Phi + \alpha_E^\Phi + \alpha_W^\Phi + \alpha_D^\Phi + \alpha_U^\Phi$$

συνδέοντας έτσι την μεταβλητή Φ , σε κάθε σημείο, με τις τιμές της στα έξι γειτονικά σημεία N,S,E,W,U,D.

Οι όροι πηγής έχουν ήδη οριστεί στον πίνακα 3.2 ενώ οι συντελεστές α_j , όπου $j = N,S,E,W,U,D$ προκύπτουν από την διακριτοποίηση του αριστερού μέρους των εξισώσεων 3.2 και εξαρτώνται από το σχήμα διαφορίσης. Ενδεικτικά παρουσιάζονται μόνο ορισμένοι συντελεστές με σχήμα διακριτοποίησης το BSOU, όπου όλοι οι όροι που σχετίζονται με τους πιο απομακρυσμένους κόμβους (WW, EE, NN, SS, UU, DD) προστίθενται τελικά στους όρους πηγής S_U . Έτσι, για τους συντελεστές E,W και με την συμβολή του BSOU στους όρους πηγής από την επιφάνεια (e), προκύπτει:

$$\alpha_w = \max\left(0, (\rho u \delta y)_w \left(+ \frac{\Gamma_{\Phi,w}}{\delta x_{WP}} \delta y_w\right)\right), \quad \alpha_e = \max\left(0, -(\rho u \delta y)_e \left(+ \frac{\Gamma_{\Phi,e}}{\delta x_{EP}} \delta y_e\right)\right)$$

$$S_{U,e}^{BSOU} = -\max\left(0, -(\rho u \delta y)_e \frac{\delta x_{eE}}{\delta x_{E-EE}} \gamma_e \left((\Phi_{EE} - \Phi_E) + \max\left(0, -(\rho u \delta y)_w \frac{\delta x_{wP}}{\delta x_{PE}} \gamma_w \left((\Phi_E - \Phi_p)\right)\right)\right)\right) \quad (3.12)$$

Κατά παρόμοιο τρόπο προκύπτουν και οι συντελεστές για N, S, U, D και για τις συμβολές στους όρους πηγής από τις επιφάνειες n, s, u, d. Αν ληφθεί η εξίσωση κατά μήκος μίας I γραμμής τότε θεωρώντας γνωστά τα μεγέθη στην προηγούμενη και επόμενη γραμμή η εξίσωση (3.12) παίρνει τη μορφή τριδιαγώνιου συστήματος που επιλύεται με αλγόριθμο TDMA. (Μπούρης Δ., 2007)

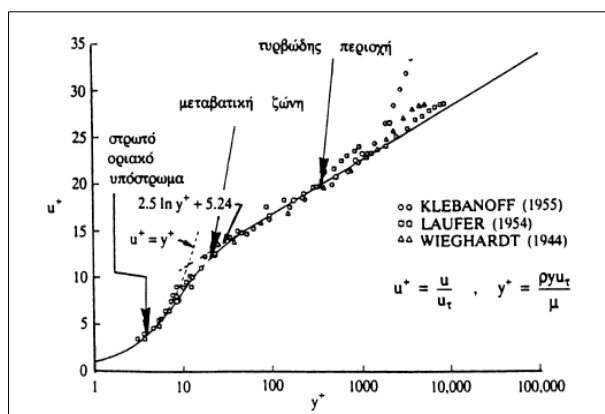
3.6 Οριακές Συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι συνθήκες Dirichlet για όλες τις μεταβλητές στην είσοδο του πεδίου και συνθήκη Neumann για όλες τις μεταβλητές στην έξοδο. Οι u και v ταχύτητες μπορούν να τεθούν και μηδέν στην έξοδο, εφόσον το όριο είναι τέτοιο που να επιτρέπει την θεώρηση πλήρως ανεπτυγμένης ροής. Η w ταχύτητα στην έξοδο υφίσταται κάποιον ισολογισμό μάζας ως προς την είσοδο και διορθώνεται αναλόγως σε κάθε επανάληψη. Στον άξονα συμμετρίας θεωρείται Neumann συνθήκη εκτός των ταχυτήτων που είναι κάθετες στο όριο οι οποίες θεωρούνται μηδενικές. Σε βόρειο τοίχωμα η πίεση και η v ταχύτητα επιδέχονται Neumann οριακές συνθήκες όπως και η k . Για τις u και w ταχύτητες παράλληλη σε τοίχωμα εφαρμόζονται οι συναρτήσεις τοιχώματος. Σε ανατολικό ή δυτικό τοίχωμα ισχύουν συνθήκες Neumann για τη πίεση και τη k καθώς και για τη u ταχύτητα. Οι συνθήκες τοιχώματος εφαρμόζονται για τις v και w ταχύτητες που είναι παράλληλες στο τοίχωμα. Για την διεπιφάνεια στερεού-ρευστού δεν απαιτείται καμία παρέμβαση του χρήστη αφού επιβάλλεται αυτόματα με τον ορισμό στερεών τοιχωμάτων όπου επιλύεται και η εξίσωση θερμοκρασίας. Τέλος η πίεση επιλύεται με Neumann συνθήκες παντού εκτός της εισόδου όπου θεωρείται μηδενική (πίεση αναφοράς). Υπενθυμίζεται ότι η μεθοδολογία λύνει σχετικές πιέσεις και επομένως θα μπορούσε να τεθεί οποιαδήποτε τιμή για την πίεση στην είσοδο χωρίς καμία επίδραση στην λύση αφού οι κλίσεις πίεσης θα μείνουν ούτως ή άλλως ανεπηρέαστες. (Μπούρης Δ., 2007)

3.6.1 Οριακές συνθήκες τοιχώματος

Όπως είναι ήδη γνωστό, κοντά στα τοιχώματα ενός στερεού που περιρρέεται από ρευστό, αναπτύσσεται μια περιοχή χαμηλών ταχυτήτων, το οριακό στρώμα. Σε αυτήν βρέθηκε ότι η ταχύτητα παρουσιάζει συγκεκριμένη κατανομή, όταν η ροή είναι τυρβώδης. Όταν το υπολογιστικό πεδίο της ροής περικλείει στερεά όρια, η περιοχή κοντά στο τοίχωμα μπορεί να υπολογιστεί κάνοντας χρήση των νόμων αυτών. Πιο συγκεκριμένα:

Στο τυρβώδες οριακό στρώμα διακρίνονται οι εξής περιοχές:



Σχήμα 3.2: Οι περιοχές του τυρβώδους οριακού στρώματος

- Η εσωτερική περιοχή (τάξη μεγέθους του 10% του πάχους του τυρβώδους οριακού στρώματος δ). Αυτή αποτελείται από:
 - Το στρωτό οριακό υπόστρωμα
 - Τη μεταβατική περιοχή
 - Την πλήρως τυρβώδη περιοχή

- Η εξωτερική περιοχή (από το $y^+ = 500$ και πάνω στο σχήμα)

Όπως φαίνεται, στην εσωτερική περιοχή τα πολλά πειράματα έχουν δείξει μια νομοτέλεια η οποία μάλιστα προκύπτει και από διαστατική ανάλυση και είναι της μορφής :

$$U^+ = f(y^+) \quad (3.13)$$

Δηλαδή η αδιάστατη ταχύτητα U^+ είναι μονοσήμαντη συνάρτηση της αδιάστατης απόστασης από τον τοίχο (στερεό όριο) y^+ . Οι αδιάστατες αυτές ποσότητες ορίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned} U^+ &= \frac{U}{U_*}, \\ y^+ &= \frac{U_* y}{\nu}, \\ U_* &= \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}, \\ \tau_w &= \mu \left. \frac{\partial U}{\partial y} \right|_{y=0} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Η ταχύτητα τριβής U_* μπορεί να συμβολίζεται και ως U_τ . Με τ_w ορίζεται η διατμητική τάση στον τοίχο. Ανάλογα με την υποπεριοχή της εσωτερικής περιοχής ισχύει πιο συγκεκριμένα:

- Στο στρωτό οριακό στρώμα ($0 < y^+ < 11.63$):

$$U^+ = y^+ \quad (3.15)$$

Το στρωτό οριακό υπόστρωμα είναι μια πολύ λεπτή περιοχή κοντά στο στερεό όριο, με πάχος τάξης μεγέθους το ένα χιλιοστό του πάχους του οριακού στρώματος. Στην περιοχή αυτή οι διαταραχές ταχύτητας δε μπορούν ν' αποκτήσουν μεγάλη πλάτη, επειδή αποσβέννυνται από την παρουσία του τοίχου. Έτσι οι τάσεις Reynolds μπορούν ν' αγνοηθούν και το ρευστό ελέγχεται από τις ιξώδεις τάσεις. Στο στρώμα αυτό η διατμητική τάση είναι σταθερή, ίση με την διατμητική τάση στον τοίχο τ_w .

- Στην πλήρως τυρβώδη περιοχή ($11.63 < y^+ < 500$):

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) \quad (3.16)$$

Το E είναι μια σταθερά που εξαρτάται από την τραχύτητα του στερεού τοιχώματος και για λείο τοίχο έχει την τιμή 9.8. Η σταθερά von Karman κ έχει τιμή 0.41. Ο λογαριθμικός νόμος μπορεί να διατυπωθεί και ως εξής:

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{y_0}, \quad (3.17)$$

που χρησιμοποιείται κυρίως για ροές πάνω από μεγάλες τραχύτητες, όπως για παράδειγμα στις ατμοσφαιρικές ροές. Η αεροδυναμική τραχύτητα y_0 μπορεί να εκτιμηθεί χοντρικά ως το 1/10 του ύψους των στοιχείων τραχύτητας (ή του μέγιστου ύψους των στοιχείων τραχύτητας, αν υπάρχει στερεό όριο με διάφορες τραχύτητες). Η εξίσωση (3.17) είναι ο γνωστός λογαριθμικός νόμος που έχει μεγάλη σημασία καθώς αποτελεί τη βασική σχέση για τις λεγόμενες «συναρτήσεις τοίχου» που χρησιμοποιούνται ως οριακές συνθήκες για πολλούς κώδικες υπολογισμού της ροής.

Η βασική ιδέα πίσω από τη χρήση των συναρτήσεων τοίχου προκύπτει από το γεγονός ότι η επίλυση του πεδίου ροής πολύ κοντά στο στερεό όριο θα απαιτούσε πολύ πυκνό πλέγμα εκεί, αφού οι μεταβολές των ποσοτήτων είναι πολύ μεγάλες. Για να αποφευχθεί αυτό γίνεται χρήση του λογαριθμικού νόμου και επιλύεται η ροή μέχρι την περιοχή που ισχύει αυτός και όχι πιο κοντά στον τοίχο. Αντίστοιχες συναρτήσεις τοίχου υπάρχουν και για τα k και ε στην περίπτωση που χρησιμοποιείται μοντέλο τύρβης k - ε :

$$k = \frac{U_*^2}{\sqrt{C_\mu}}, \quad \varepsilon = \frac{C_\mu^{0.75} k^{3/2}}{\kappa y} \quad (3.18)$$

Μια διαδικασία υπολογισμού των μεταβλητών με χρήση των συναρτήσεων τοίχου έχει ως εξής: η ταχύτητα U υπολογίζεται από την αριθμητική επίλυση, η ταχύτητα τριβής U^* υπολογίζεται από το λογαριθμικό νόμο με την εξής επαναληπτική διαδικασία:

$$U_* = s^{1/2} U,$$

$$s = \left(\frac{\kappa}{\ln(E \operatorname{Re} s^{1/2})} \right)^2, \quad (3.19)$$

$$\operatorname{Re} = \frac{U y}{\nu}$$

Υπολογίζονται τα k και ε από τις προαναφερθείσες εξισώσεις. Για να είναι σωστή με ακρίβεια η εφαρμογή των συναρτήσεων τοίχου, πρέπει ο πρώτος κόμβος του πλέγματος να βρίσκεται σε απόσταση y τέτοια ώστε να ισχύει: $30 < y^+ < 13$, ή $20 < y^+ < 500$. Επίσης πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι όλα αυτά ισχύουν για επίπεδη πλάκα και σε άλλες περιπτώσεις εφαρμογής η χρήση γίνεται προσεγγιστικά επειδή δεν υπάρχει κάποια καλύτερη προσέγγιση. (Κουτσουράκης, 2014), (Μαρκάτος, 2014)

3.7 Μέθοδος επίλυσης

Η μεθοδολογία που θα παρουσιαστεί βασίζεται στην μέθοδο SIMPLE και τον αλγόριθμο TDMA για την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων. Πιο αναλυτικά η μέθοδος απαρτίζεται από τα εξής στάδια:

- Γίνεται χρήση ενός σχήματος πεπερασμένων διαφορών όπου οι εξαρτημένες μεταβλητές είναι οι ταχύτητες και η πίεση καθώς και οι μεταβλητές k , ε του μοντέλου τύρβης, η θερμοκρασία T , η συγκέντρωση C κ.α
- Η πίεση προκύπτει από μία εξίσωση η οποία είναι συνδυασμός της εξίσωσης της συνέχειας και των εξισώσεων διατήρησης της ορμής, δίνοντας τη γνωστή εξίσωση Poisson για την πίεση
- Γίνεται μία αρχική υπόθεση για όλες τις μεταβλητές σε όλο το πεδίο ροής. Σε αυτό το στάδιο βοηθάει πολύ η ύπαρξη προηγούμενων υπολογισμών για παρόμοια προβλήματα οπότε και οι λύσεις αυτές θεωρούνται ως αρχικές τιμές για την υπολογιζόμενη. Μαζί με τις αρχικές τιμές είναι προφανές ότι υποτίθεται και μία αρχική τιμή για το πεδίο πίεσης.
- Επιλύονται οι εξισώσεις ορμής με το δεδομένο πεδίο πίεσης. Όμως, οι ταχύτητες που υπολογίζονται από τις εξισώσεις ορμής δεν ικανοποιούν την εξίσωση διατήρησης της μάζας (ή την εξίσωση Poisson για την πίεση) και είναι απαραίτητη κάποια διόρθωσή τους. Η διόρθωση του πεδίου των ταχυτήτων γίνεται μέσω μιας αντίστοιχης διόρθωσης στο πεδίο της πίεσης έτσι ώστε τελικά να ικανοποιείται η εξίσωση της συνέχειας. Μετά από τις διορθώσεις αυτές, η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι οι λύσεις πεδίου ταχυτήτων και πίεσης να ικανοποιούν όλες τις εξισώσεις (ορμής και συνέχειας).
- Η μεθοδολογία εφαρμόζεται σε ομόθετο (collocated) πλέγμα όπου όλες οι μεταβλητές αποθηκεύονται στο κέντρο των πλεγματικών κυψελών. Εδώ συνίσταται και η διαφορά από τον αλγόριθμο SIMPLE που χρησιμοποιεί μετατοπισμένο (staggered) πλέγμα.
- Κατά την επίλυση όλων των εξισώσεων, εφαρμόζεται η μέθοδος TDMA για την επίλυση τριδιαγώνιου συστήματος συντεταγμένων με τη μέθοδο εναλλαγής κατεύθυνσης. Θεωρούνται λοιπόν ως άγνωστες οι τιμές της προς επίλυση μεταβλητής κατά μία πλεγματική γραμμή. Φυσικά οι μεταβλητές αυτές εξαρτώνται και από τις αντίστοιχες μεταβλητές της προηγούμενης και επόμενης πλεγματικής γραμμής. Αυτές λαμβάνονται ίσες με τις πιο πρόσφατα υπολογισμένες τιμές τους. Με αυτό τον τρόπο βρίσκονται οι νέες τιμές της μεταβλητής κατά μήκος πλεγματικών γραμμών σε μία κατεύθυνση. Επαναλαμβάνεται η επίλυση και στην άλλη κατεύθυνση. Σημειώνεται ότι το σύστημα που επιλύεται σε κάθε γραμμή πλέγματος αποτελείται από όλα τα εσωτερικά σημεία του πεδίου πάνω στη γραμμή αυτή. (Μπούρης Δ., 2007)

3.8 Σύγκλιση

Στόχος είναι η λήψη ικανοποιητικών και ρεαλιστικών αποτελεσμάτων όσον αφορά τα φυσικά μεγέθη που διέπουν το φαινόμενο και τις εξισώσεις που επιλύονται. Προϋπόθεση της επιτυχούς λύσης του εκάστοτε προβλήματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων ελέγχου είναι η επίτευξη σύγκλισης. Η σύγκλιση είναι το αποτέλεσμα της μετάθεσης του λάθους και της εξάλειψής του στα όρια. Το αριθμητικό πρόβλημα θεωρείται ότι έχει συγκλίνει όταν:

- Έχει επιτευχθεί η απαιτούμενη ακρίβεια, δηλαδή η πτώση των υπολοίπων (residuals) κάτω από μία τιμή που έχει προεπιλεχθεί από το χρήστη και εκφράζει την απαιτούμενη ακρίβεια της σύγκλισης. Τα υπόλοιπα καθορίζονται για κάθε μεταβλητή που επιλύεται στο σύνολο των κόμβων του πλέγματος.
- Έχει επιτευχθεί η σταθεροποίηση της τιμής της μεταβλητής που επιλύεται, σε συγκεκριμένο σημείο κατά τη διάρκεια των διαδοχικών επαναλήψεων.
- Υπάρχει ανεξαρτησία λύσης από το πλέγμα και από το χρόνο, που σημαίνει ότι η λύση έχει επιτευχθεί για κάποιο πλέγμα και χρόνο αν αυτή δε μεταβάλλεται κατά την περαιτέρω πυκνωση του πλέγματος και των χρονικών βημάτων, αντίστοιχα.
- Ικανοποιούνται τα ισοζύγια μάζας, ορμής και ενέργειας, συνολικά σε όλο το πεδίο ροής. Το κριτήριο αυτό είναι η απαίτηση για τη σωστή επίλυση των εξισώσεων.

3.9 Τεχνική υποχαλάρωσης

Για την καλύτερη σύγκλιση και την αποφυγή μεγάλων διακυμάνσεων των μεταβλητών ανάμεσα σε δύο διαδοχικές επαναλήψεις, που θα μπορούσαν να προκαλέσουν απόκλιση της λύσης, χρησιμοποιείται η τεχνική της υποχαλάρωσης. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η γραμμική υποχαλάρωση. Η τεχνική της υποχαλάρωσης βασίζεται στο γεγονός ότι για να επιτευχθεί σύγκλιση, χρησιμοποιείται μόνο ένα ποσοστό της τιμής μίας μεταβλητής που υπολογίστηκε, ως αρχική τιμή της επόμενης επανάληψης. Το υπόλοιπο μέρος της τιμής αυτής λαμβάνεται από την προηγούμενη επανάληψη. Δηλαδή:

$$\Phi_p^{new} = \omega \Phi_p^{new} + (1 - \omega) \Phi_p^{old} \quad (3.20)$$

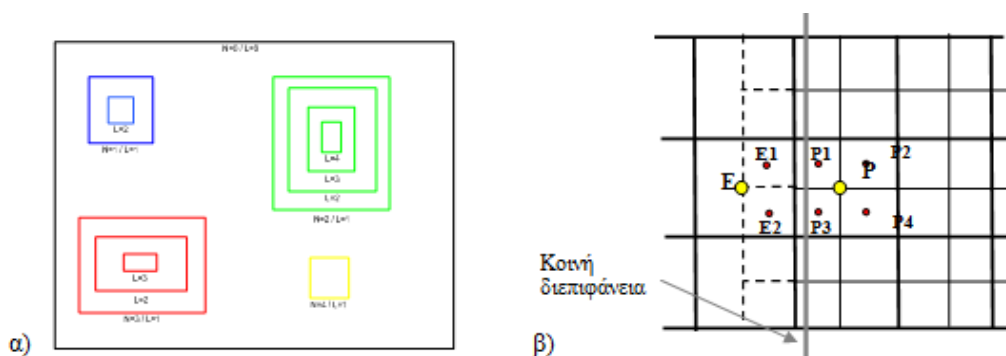
Φ_p^{new} : η νέα τιμή της μεταβλητής Φ στους κόμβους του πλέγματος

Φ_p^{old} : η τιμή της μεταβλητής Φ στην προηγούμενη επανάληψη στον ίδιο κόμβο του πλέγματος

ω : ο συντελεστής υποχαλάρωσης $\omega \in [0,1]$

3.10 Μεθοδολογία πολλαπλής τηλεσκοπικής τοπικής πύκνωσης (Multi - Local Refinement / MLR)

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, το υπολογιστικό εργαλείο `caffca3d_mlr`, στηρίζεται στην αριθμητική επίλυση των εξισώσεων Reynolds σε καρτεσιανούς όγκους αναφοράς με τη μέθοδο SIMPLE. Επίσης έχει αναπτυχθεί με τρόπο που ενσωματώνει και τη μεθοδολογία πολλαπλής τοπικής πύκνωσης (Multi-Local Refinement, MLR). Πιο συγκεκριμένα, στο αρχικό βασικό πλέγμα, που αφορά σε ολόκληρο τον υπολογιστικό χώρο, καθορίζονται περιοχές ειδικού ενδιαφέροντος όπου δημιουργείται υποπλέγμα μεγαλύτερης πυκνότητας με ακέραια διαμέριση των κελιών του βασικού πλέγματος σε κάθε διεύθυνση - χωρίς να είναι απαραίτητα ίδια για κάθε διεύθυνση. Ο αριθμός των περιοχών ενδιαφέροντος είναι ελεύθερος αλλά η κάθε περιοχή μπορεί να εμπεριέχει μέχρι τέσσερα περαιτέρω επίπεδα πύκνωσης.



Σχήμα 3.3: α) Απεικόνιση τεσσάρων περιοχών ειδικού ενδιαφέροντος με 1, 2, 3 και 4 επίπεδα πύκνωσης. β) Απεικόνιση αραιού πλέγματος (συνεχής παχιά γραμμή) και του πυκνού πλέγματος (λεπτή συνεχής γραμμή). Αριστερά της κοινής διεπιφάνειας, με διακεκομμένη γραμμή απεικονίζονται τα ψευδοκελιά του πυκνού πλέγματος.

Η επικοινωνία ανάμεσα στα πλέγματα γίνεται μεταξύ των κελιών που βρίσκονται εκατέρωθεν της κοινής τους διεπιφάνειας. Κάθε υποπλέγμα διαθέτει ένα επιπλέον ψευδοκελί στην άλλη πλευρά της, οπότε τα γειτονικά πλέγματα υπερκαλύπτονται. Η επικοινωνία μεταξύ των πλεγμάτων γίνεται με επιβολή οριακών συνθηκών για όλες τις μεταβλητές ως εξής:

- Πληροφορία από το αραιό στο πυκνό πλέγμα : ο κεντρικός κόμβος P του αραιού πλέγματος χωρίζεται στους P1-P4 του πυκνού (Σχήμα 3.2β). Αριστερά των κόμβων P1 και P3 θεωρούνται ψευδοκελιά E1, E2, από την άλλη μεριά της διεπιφάνειας. Οι τιμές στα E1 και E2 είναι ίσες με την τιμή στο E του αραιού πλέγματος και παραμένουν σταθερές κατά την επίλυση του πυκνού.
- Πληροφορία από το πυκνό στο αραιό πλέγμα: κατά την επίλυση του αραιού πλέγματος, ο κόμβος P αποτελεί το ψευδοκελί στην άλλη πλευρά της διεπιφάνειας με σταθερή τιμή που προκύπτει από τις πιο πρόσφατες στα σημεία P1, P2, P3, P4 του πυκνού πλέγματος. (Πετρίδου,2009)

Σημειώνεται ότι πέραν της ανταλλαγής συνοριακών συνθηκών για όλες τις μεταβλητές, στις κοινές διεπιφάνειες επιβάλλεται επιπλέον και διατήρηση των παροχών.

Αρχικά επιλύεται μόνο το βασικό πλέγμα για προκαθορισμένο αριθμό επαναλήψεων αλλά οι εξισώσεις δεν επιλύονται για τα κελιά που ανήκουν σε περιοχή ειδικού ενδιαφέροντος αφού σε αυτά διατηρούνται σταθερές τιμές που προκύπτουν από το πυκνότερο πλέγμα. Αμέσως μετά, ενσωματώνονται στους υπολογισμούς τα επίπεδα τοπικής πύκνωσης και κάθε επίπεδο πλέγματος επιλύεται χωριστά, ανταλλάσσοντας πληροφορίες με το βασικό πλέγμα μέσω των ψευδοκελιών στις διεπιφάνειες. Επιστρέφοντας δεδομένα στο βασικό πλέγμα, η επαναληπτική διαδικασία πραγματοποιείται για προκαθορισμένο αριθμό επαναλήψεων και η σύγκλιση επέρχεται όταν το σύνολο των υπολοίπων των εξισώσεων σε όλα τα επίπεδα και σε όλες τις περιοχές φτάσει το επίπεδο σύγκλισης που έχει προκαθοριστεί ($\approx 5 \times 10^{-3}$). Οι τιμές εκκίνησης για όλες τις μεταβλητές των νεοεισελθέντων υποπλεγμάτων προκύπτουν από απλές παρεμβολές των πλέον πρόσφατων τιμών του αμέσως αραιότερου πλέγματος. Με τον τρόπο αυτό, δεν μειώνονται δραματικά τα υπόλοιπα σύγκλισης όταν ενσωματώνονται για πρώτη φορά νέα πλέγματα. (Πετρίδου, 2009)

3.11 Συμβολή στον κώδικα

- ο Ενσωμάτωση της εξίσωσης συγκέντρωσης [Conc] στο βασικό πλέγμα και στις περιοχές πολλαπλής τοπικής πύκνωσης (4 επίπεδα πύκνωσης σε κάθε περιοχή)

Για να επιτευχθεί η μελέτη της διασπορά μια ρυπογόνου ουσίας στο αστικό περιβάλλον, που ήταν και ο σκοπός της εργασίας θα έπρεπε αρχικά να ενσωματωθεί προγραμματιστικά, στο υπολογιστικό εργαλείο `caffca3d_mlr`, η εξίσωση της συγκέντρωσης και εν συνεχεία να επιλυθεί. Η εξίσωση λοιπόν της συγκέντρωσης θα έπρεπε να ακολουθήσει το ίδιο μοτίβο με τις υπόλοιπες μεταβλητές, δηλαδή να υπολογισθεί η κατά RANS μέση τιμή της συγκέντρωσης.

Η εξίσωση μεταφοράς της μέσης συγκέντρωσης C ενός παθητικού ρύπου δίνεται από την εξίσωση :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U_j \frac{\partial C}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_t \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + Q_C \quad (3.21)$$

όπου $j=1,2,3$ και υποδηλώνονται τις τρεις καρτεσιανές κατευθύνσεις ($x_i = x, y, z$)

Q_C : όρος πηγής , D_t : ο συντελεστής τυρβώδους διάχυσης (turbulent diffusivity coefficient) και υπολογίζεται από τον τύπο $D_t = \nu_t / S_{C_i}$ όπου S_{C_i} : ο τυρβώδης αριθμός Schmidt που θεωρείται σταθερός και λαμβάνει τιμές από 0.3 έως 1.3

Ο συντελεστής μοριακής διάχυσης θεωρείται πρακτικά αμελητέος. Η επίλυση του βαθμωτού μεγέθους της συγκέντρωσης λαμβάνει υπόψιν τον ισοτροπικό χαρακτήρα της δυναμικής συνεκτικότητας ν_i που εισάγεται μέσω του συντελεστή τυρβώδους διάχυσης.

ο Πυκνότητα

Η συγκέντρωση μάζας ή μερική πυκνότητα συστατικού σε μίγμα (ρ_i) ορίζεται από

$$\text{την παρακάτω εξίσωση: } \rho_i = \frac{m_i}{V}, \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \quad (3.22)$$

όπου : m_i είναι η μάζα του συστατικού i και V είναι ο όγκος του μίγματος.

Συνεπώς, η πυκνότητα του μίγματος δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\rho = \sum_i \rho_i = \frac{m}{V} \quad (3.23) \quad \text{όπου } m = \sum_i m_i \text{ είναι η μάζα του μίγματος}$$

Το κλάσμα μάζας εκφράζει το σχετικό ποσό του συστατικού i στο μίγμα και ορίζεται

$$\text{από την σχέση: } w_i = \frac{m_i}{m} \quad (3.24)$$

Εκ του ορισμού, προκύπτει ότι σε κάθε μίγμα : $0 \leq w_i \leq 1$

Το γραμμομοριακό κλάσμα εκφράζει το σχετικό ποσό του συστατικού i στο μίγμα και

$$\text{ορίζεται από τη παρακάτω σχέση : } x_i = \frac{n_i}{n_o} = \frac{\frac{n_i}{V}}{\frac{n}{V}} = \frac{C_i}{C} \quad (3.25)$$

Εκ του ορισμού, προκύπτει ότι σε κάθε μίγμα : $0 \leq x_i \leq 1$

Τέλος, το γραμμομοριακό κλάσμα συστατικού συνδέεται με το κλάσμα μάζας του μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$\left. \begin{aligned} w_i &= \frac{x_i \cdot M_i}{M} \\ M &= \sum_I x_i \cdot M_i \end{aligned} \right\} \Rightarrow w_i = \frac{x_i \cdot M_i}{\sum_I x_i \cdot M_i} \Rightarrow x_i = \frac{w_i / M_i}{\sum_i w_i / M_i} \quad (3.26)$$

$$\text{Με σωστή αντικατάσταση προκύπτει ότι : } \rho_{\text{μίγματος}} = \sum \frac{\left(\frac{w_i}{M_i} \right) \cdot \rho_i}{\sum_i \left(\frac{w_i}{M_i} \right)} \quad (3.27)$$

$$\text{Για μίγμα 2 συστατικών η (3.27) δίνει: } \rho_{\text{μίγματος}} = x_1 \cdot \rho_1 + (1 - x_1) \cdot \rho_2 \quad (3.28)$$

Η προαναφερθείσα εισαγωγή στις εκφράσεις συστατικών μιγμάτων έγινε με σκοπό την κατάλληλη τροποποίηση της σχέσης υπολογισμού της πυκνότητας συναρτήσει των συγκεντρώσεων. Συγκεκριμένα, το μίγμα στο φυσικό πρόβλημα απαρτίζεται από τον αέρα και το προπυλένιο. Ορίζοντας τη συγκέντρωση κατά τα πρότυπα του κλάσματος μάζας, δηλαδή $C_i = \frac{m_i}{m}$ (3.29) και λαμβάνοντας υπόψιν τις σχέσεις (3.27), (3.28) προκύπτει η σχέση υπολογισμού της πυκνότητας του μίγματος (αέρα /ρύπου) έχοντας λάβει υπόψη τη συγκέντρωση του ρύπου. Δηλαδή:

$$\rho_{\text{μίγματος}} = C \cdot \rho_{\text{air}} + (1 - C) \cdot \rho_{\text{ρύπου}} \quad (3.30)$$

Οι τιμές των συγκεντρώσεων στα διαγράμματα δίνονται σε ppm. Στην ουσία οι συγκεντρώσεις όπως λαμβάνονται από το υπολογιστικό εργαλείο `caffca3d-mlr`, πολλαπλασιάζονται επί τον λόγο των πυκνοτήτων αέρα/ρύπου. Δηλαδή :

$$\text{Conc} \times \frac{\rho_{\text{air}}}{\rho_{\text{ρύπου}}} \Rightarrow \text{Conc} \times \frac{1.2035}{1.8} \Rightarrow \text{Conc} \times 0.66$$

- Είσοδος

Θεωρείται ότι η συγκέντρωση του ρύπου αρχικά στην ατμόσφαιρα είναι μηδενική ($\text{Conc}=0.00$) και εισάγεται από το αντίστοιχο αρχείο εισόδου στον κώδικα `caffca3d-mlr`.

- Οριακές συνθήκες

Για τη συγκέντρωση έχουν οριστεί στα : βόρειο, νότιο, ανατολικό, δυτικό, ανάντη, κατάντη όρια του πεδίου συνθήκες Neumann, δηλαδή: $\frac{\partial C}{\partial x} = 0$, $\frac{\partial C}{\partial y} = 0$, $\frac{\partial C}{\partial z} = 0$

Στα τοιχώματα η συγκέντρωση ορίζονταν ίση με το μηδέν.

- Ενσωμάτωση των γεωμετρικών συντεταγμένων της πηγής εκπομπής και του όρου πηγής Q_{SOURCE} εντός του υπολογιστικού εργαλείου `caffca3d-mlr`
- Περιοχές τοπικής πύκνωσης

Επιλέχθηκε η κατασκευή υπολογιστικού πλέγματος με ενσωμάτωση της μεθοδολογίας τοπικών περιοχών πύκνωσης . Για το δοθέν πρόβλημα διασποράς του ρύπου σε αστικό περιβάλλον η ενσωμάτωση περιοχών τοπικής πύκνωσης κρίνεται ως μια απαιτητική και με δυσκολίες διαδικασία. Αρχικά θα έπρεπε να επιλεγούν οι περιοχές στις οποίες ο χρήστης επιθυμούσε την περαιτέρω πύκνωση του πλέγματος. Αυτό βασίζεται στη φυσική πραγματικότητα του εκάστοτε προβλήματος. Στην περίπτωση μας επιθυμούνταν οι περαιτέρω πυκνώσεις στα σημεία όπου υπήρχε η εκπομπή του ρύπου (εκατέρωθεν του κοντέινερ πηγής εκπομπής) και εκατέρωθεν των πύργων που λειτουργούσαν ως σημεία καταγραφής των κατακόρυφων τιμών συγκεντρώσεων. Βασικό σημείο προσοχής κατά την εισαγωγή περιοχής τοπικής

πύκνωσης σε προβλήματα που αφορούν αστική γεωμετρία, είναι η επιλογή περιοχής πύκνωσης κατά την οποία περιλαμβάνονται κατά πλάτος, κατά μήκος και καθ' ύψος ολόκληρα τα κτίρια ή κτίριο αντίστοιχα (εδώ κοντέινερ) διότι δημιουργείται επιπλοκή με τις οριακές συνθήκες και ως επί το πλείστον επέρχεται σφάλμα στον κώδικα. Επίσης, προτιμάται η επιλογή περισσότερων περιοχών πύκνωσης αλλά μικρότερου μεγέθους από την επιλογή μιας μεγάλης περιοχής που θα περιλαμβάνει περισσότερα κτίρια. Με βάση την τελευταία παρατήρηση, επιλέχθηκαν 2 περιοχές τοπικής πύκνωσης όπου και οι δύο περιοχές περιελάμβαναν 4 κτίρια (κοντέινερ). Η περιοχή τοπικής πύκνωσης κατασκευάζεται με κατάλληλη ρύθμιση από το αρχείο εισόδου με βάση το οποίο γίνεται απλή διαμέριση των κελιών του βασικού πλέγματος σε κάθε διεύθυνση. Η διαμέριση δεν είναι κατ' ανάγκη ίδια σε όλες τις διευθύνσεις αρκεί να γίνεται με ακέραια διαίρεση του βασικού πλέγματος. Το κάθε υποπλέγμα που κατασκευάζεται με αυτόν τον τρόπο είναι ανεξάρτητο του βασικού. Ο μόνος περιορισμός στη διαδικασία αυτή είναι ότι οι γεωμετρικοί κόμβοι του βασικού πλέγματος που ανήκουν στη διεπιφάνεια των πλεγμάτων πρέπει να αποτελούν γεωμετρικούς κόμβους και του υποπλέγματος. Όσον αφορά το προγραμματιστικό κομμάτι της ενσωμάτωσης της συγκέντρωσης στις περιοχές τοπικής πύκνωσης, οι εξισώσεις και οι οριακές συνθήκες επιβλήθηκαν κατά τον ίδιο τρόπο που ενσωματώθηκαν στο βασικό υπολογιστικό πλέγμα.

Κεφάλαιο 4

4.1 Εισαγωγή

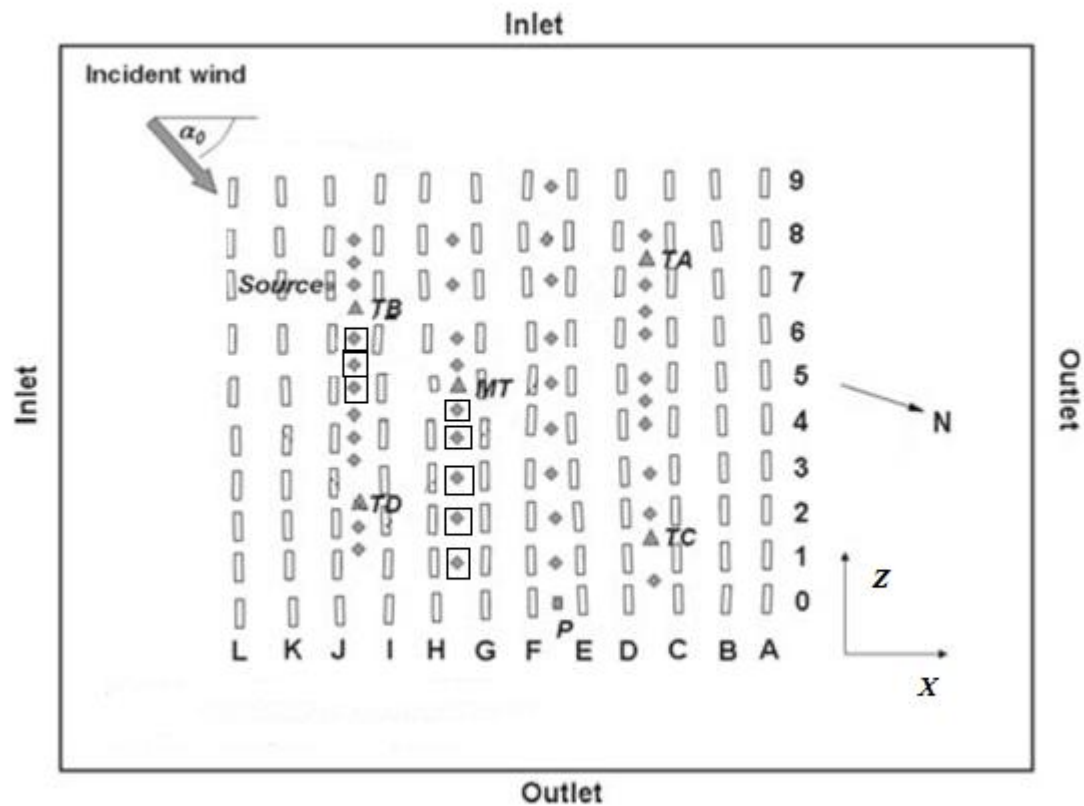
Η ποιότητα του αέρα στο αστικό περιβάλλον, υπό την έννοια της ακριβούς πρόβλεψης της μεταφοράς και της διασποράς των ρύπων, είναι ένα θέμα ύψιστης σημασίας και αυξανόμενου ενδιαφέροντος για την επιστημονική κοινότητα, στρέφοντας την προσοχή της προς την κατεύθυνση αυτή. Οι περίπλοκες γεωμετρίες των κτιρίων και άλλων «εμποδίων» που απαρτίζουν την αστική χαράδρα (urban canopy) δυσχεραίνει την μελέτη μιας τέτοιας φυσικής διαδικασίας. Η αλληλεπίδραση μεταξύ ατμοσφαιρικού τυρβώδους οριακού στρώματος και αστικής γεωμετρίας γεννά περίπλοκα σχήματα ροής που καθορίζουν την κατανομή των συγκεντρώσεων των αστικών ρύπων. Μετρήσεις διασποράς ρύπων σε αστικές περιοχές ή γύρω από εμπόδια έχουν πραγματοποιηθεί αρκετά συχνά τόσο σε αεροσήραγγες (wind-tunnel) και υδραυλικές σήραγγες (water-tunnel) όσο και σε πειράματα πεδίου. Απλά μοντέλα όπως τα Γκαουσιανά μοντέλα πλουμίου, ευρέως χρησιμοποιούμενα σε εφαρμογές απλού εδάφους, παρουσιάζουν «κακές» επιδόσεις στην πρόβλεψη της αστικής διασποράς διότι η πολύπλοκη γεωμετρία των κτιρίων πρέπει να μοντελοποιηθεί ρητά έτσι ώστε να αντιπροσωπεύει επιτυχώς την αλληλεπίδραση μεταξύ αστικής χαράδρας και ατμοσφαιρικής ροής. Λεπτομέρειες της ροής γύρω από κτίρια μπορούν να αντιμετωπιστούν με τη χρήση της υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD), η οποία μεθοδολογία χρησιμοποιείται κατά κόρον σε περιπτώσεις προσομοίωσης φαινομένων διασποράς σε αστικά περιβάλλοντα. Μια «ακριβής» αριθμητική προσέγγιση η οποία στηρίζεται στη χρήση άμεσης αριθμητικής προσομοίωσης (DNS) επιτρέπει την επίλυση όλων των κλιμάκων της τύρβης, εξάγοντας λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με το πεδίο ροής. Ωστόσο εξαιτίας του υψηλού υπολογιστικού κόστους, η μέθοδος DNS περιορίζεται σε μελέτες τυρβώδους ροής εκατέρωθεν ένα απομονωμένο κτίριο ή γύρω από ένα περιορισμένο αριθμό εμποδίων. Από την άλλη μεριά, η κατά RANS προσέγγιση αποτελεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για όλο το φάσμα της τύρβης κατά την οποία εξάγονται συμπεράσματα για τις στατιστικά μέσες τιμές των υπολογιζόμενων μεταβλητών άρα και της τύρβης. Αυτού του είδους η προσέγγιση δεν απαιτεί υψηλό υπολογιστικό κόστος για αυτό και κατατάσσεται στην κατηγορία της πιο συχνά χρησιμοποιούμενης μεθόδου. Πολλοί ερευνητές όπως οι Kim & Baik (2004), Santiago et al. (2007), και Milliez & Carissimo (2007) χρησιμοποίησαν την εν λόγω προσέγγιση για τον υπολογισμό της ροής γύρω από

ιδανικές αστικές γεωμετρίες, ενώ οι Flaherty et al. (2007) και Michioka & Sato (2009) έκαναν χρήση της RANS προσέγγισης για την προσομοίωση πραγματικών αστικών περιοχών. Μια ενδιάμεση προσέγγιση αποτελεί η μεθοδολογία LES στην οποία μοντελοποίηση επιχειρείται να επιλυθούν πλήρως χωρικά και χρονικά οι μεγάλες δίνες, ενώ οι μικρές, που επηρεάζουν πολύ λιγότερο τη μέση ροή και τα τυρβώδη χαρακτηριστικά της, μοντελοποιούνται με απλά μοντέλα, καθώς είναι ισότροπες. Εφαρμογές της μεθοδολογίας LES σε αστικό περιβάλλον έχουν πραγματοποιηθεί από τους Hanna et al (2002), Cheng et al. (2003), και Xie & Castro (2006) για ροές γύρω από συστοιχίες κύβων ενώ από τους Camelli et al. (2005), Tseng et al. (2006) Michioka & Sato (2009) και Xie & Castro (2009) για ροές πραγματικών πεδίων. Δυνητικά οι δυνατότητες της μεθοδολογίας LES για την προσομοίωση ενός αστικού περιβάλλοντος είναι ανώτερες από αυτές της μεθόδου RANS ωστόσο η δυνατότητα εφαρμογής τους είναι και πάλι περιορισμένη, όπως και στην DNS διότι το υπολογιστικό κόστος των προσομοιώσεων διατηρείται υψηλό όπως επίσης και η αδυναμία εφαρμογής, σε κάποιες περιπτώσεις, συναρτήσεων τοιχώματος και συνθηκών εισόδου. Ένα πολύ ενδιαφέρον πείραμα πεδίου για προσομοίωση διασποράς αστικού περιβάλλοντος αποτελεί το πείραμα MUST (Mock Urban Setting Test), πείραμα το οποίο διεξήχθη στην Great Desert (USA) με σκοπό τη διερεύνηση της διασποράς ενός παθητικού ρύπου μέσα σε μια συστοιχία κοντέινερ. Η διαμόρφωση της ροής μελετήθηκε επίσης σε πειράματα αεροσήραγγας και σε πειράματα υδραυλικής σήραγγας. Επιπλέον, λόγω της σχετικά απλής γεωμετρικής διάταξης, χρησιμοποιήθηκε εκτεταμένα για την αξιολόγηση μοντέλων υπολογιστικής ρευστομηχανικής, κάνοντας χρήση RANS προσεγγίσεων και σε μικρότερο βαθμό LES προσεγγίσεων. Στην παρούσα εργασία, εξετάστηκε η προσομοίωση του πειράματος MUST με χρήση μεθοδολογίας RANS. Επιλέχθηκε μια δοκιμή από τις πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά το χρονικό διάστημα διεξαγωγής του πειράματος MUST, η οποία δοκιμή αφορά ροή η οποία εισέρχεται στη γεωμετρία του πειράματος, όχι κάθετα αλλά υπό γωνία κλίσης. Η δοκιμή αυτή προσομοιώθηκε χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία RANS, και εξετάστηκαν διαφορετικά μοντέλα προσομοίωσης της τύρβης, με στόχο την επίτευξη εκείνης της προσομοίωσης που θα δώσει τα πιο κοντινά αποτελέσματα στις πειραματικές τιμές των μέσων συγκεντρώσεων. Επιπλέον, λόγω της επιλογής εκπομπής ρύπου υπό γωνία κλίσης, πραγματοποιήθηκε μια ανάλυση ευαισθησίας σε μικρές διακυμάνσεις της γωνίας από τη κύρια κατεύθυνση πρόσπτωσης του ανέμου. Ακόμη πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις για τον τυρβώδη αριθμό Schmidt, (κατά πόσο μια αλλαγή της τιμής του θα επηρέαζε τη διασπορά του ρύπου), για την θερμοκρασιακή τιμή του αέρα (τυχόν αυξομειώσεις της θερμοκρασίας του αέρα, τι επίπτωση θα είχε στις τιμές των συγκεντρώσεων) και για διαφορετικές ατμοσφαιρικές καταστάσεις (καταστάσεις ευστάθειας, ουδέτερης κατάστασης και ασταθούς κατάστασης). Συνοψίζοντας, το κεφάλαιο 4 οργανώνεται ως εξής : ακολουθεί μια αναλυτική περιγραφή του πειράματος MUST για να γίνει πλήρως κατανοητή στον αναγνώστη η γεωμετρική διάταξη, περιγραφή του υπολογιστικού πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του υπολογιστικού χωρίου σε

συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά του, συνθήκες εισόδου και οριακές συνθήκες και τέλος τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. (Santiago et al.,2010)

4.2 Περιγραφή του πειράματος

Το πείραμα MUST (Mock Urban Setting Test) είναι ένα καλά οργανωμένο πείραμα πεδίου που έλαβε χώρα σε στρατιωτική βάση των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής κατά τη διάρκεια του μήνα Σεπτεμβρίου, του έτους 2001 (13/9/2001 έως 26/9/2001). Λεπτομερής περιγραφή της περιοχής που διεξήχθη το πείραμα δίνεται στα άρθρα των Yee & Biltoft, των βασικών επιστημόνων που πραγματοποίησαν το πείραμα. Το πείραμα MUST πραγματοποιήθηκε για τη δημιουργία μιας βάσης δεδομένων συγκέντρωσης με σκοπό να προωθήσει την ανάπτυξη και την αξιολόγηση υπολογιστικών μοντέλων διασποράς ώστε να ξεπεραστούν οι περιορισμοί της κλίμακας που εμφανίζονται στα πειράματα αεροδυναμικής ή υδροδυναμικής σήραγγας. Επίσης ένας βασικός στόχος του πειράματος ήταν να γίνει κατανοητή η μεταβολή της δομής του πλουμίου καθώς αυτό μεταφέρεται με συναγωγή και διάχυση ανάμεσα στη διάταξη των εμποδίων. Το αστικό περιβάλλον μοντελοποιήθηκε με 120 κοντέινερ πλάτους 2.42 m, μήκους 12.2 m και ύψους 2.54 m που ήταν τοποθετημένα σε μία διάταξη 12 γραμμών των 10 κοντέινερ, καλύπτοντας μία περιοχή περίπου 200 x 200m. Ένας φορητός καταγραφέας τύπου βαν ήταν τοποθετημένος κοντά στο κέντρο της διάταξης για τη συλλογή των μετεωρολογικών δεδομένων και δεδομένων συγκέντρωσης. Το μέγεθος του βαν διέφερε αρκετά από το μέγεθος των κοντέινερ (πλάτος: 2.44 m, μήκος: 6.1 m, ύψος: 3.51 m). Τα κοντέινερ δεν ήταν παρατεταγμένα σε τέλεια διάταξη, αλλά μικρές μετατοπίσεις τους ήταν αναγκαίες για την αποφυγή επαφής τους με τα καλώδια και τα δίκτυα μετρήσεων. Κατά τη διάρκεια του πειράματος πραγματοποιήθηκαν εκπομπές προπυλενίου (C_3H_6) διάρκειας 15 min για διαφορετικές συνθήκες ανέμου και θέσεις των πηγών. Οι πηγές εκπομπών ήταν τοποθετημένες, ανάλογα με τη διεύθυνση του ανέμου, εσωτερικά ή εξωτερικά από τη διάταξη και σε διάφορα ύψη (0.15 m, 1.3 m, 1.8 m, 2.54 m και 5.2 m.). Ο ρύπος εκπέμπεται από ένα σωλήνα διαμέτρου 0.05 m. Στο σχήμα 4.1, παρουσιάζονται οι θέσεις των οργάνων μέτρησης της συγκέντρωσης. Τα όργανα μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ανιχνευτές τύπου PID (fast-response photoionization detectors) με χρονική ανάλυση $\Delta t = 0.02s$ και ανιχνευτές τύπου UVIC (Ultraviolet Ion Collectors) με χρονική ανάλυση $\Delta t = 0.01 s$. Ανάμεσα στους 48 αισθητήρες PID, οι 40 είναι τοποθετημένοι σε ύψος 1.6 m σε τέσσερις οριζόντιες γραμμές δειγματοληψίας ενώ οι 8 αισθητήρες PID είναι τοποθετημένοι σε ύψη 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12 και 16 m σε έναν κεντρικό πύργο (Main Tower, MT). Οι 24 αισθητήρες UVIC είναι τοποθετημένοι σε ύψη 1, 2, 3, 4, 5 και 5.9 m σε τέσσερις πύργους που βρίσκονται στα τέσσερα τεταρτημόρια του πεδίου (Tower B ή συντομογραφικά TB, Tower C ή TC, Tower D ή TD, Tower A ή TA). Όπως προαναφέρθηκε ο συνολικός αριθμός των δοκιμών είναι 81. Στο κάτωθεν σχήμα παριστάνονται αναλυτικά τα όσα προαναφέρθηκαν για να αποκτήσει ο αναγνώστης κα μια οπτική εικόνα των όσων διατυπώθηκαν. (ΕυθυμίουΓ.Χ,2012),(Biltoft,C.A.,2001)



Source: Θέση της πηγής για την δοκιμή 16

◆ Ανιχνευτές PID κατά μήκος των 4 γραμμών δειγματοληψίας

▲ Ανιχνευτές PID στο Main Tower, MT σε ύψη: 1m, 2m, 4m, 6m, 8m, 10m, 12m και 16m

▲ Ανιχνευτές UVIC στους πύργους: TB, TD, TA, TC σε ύψη : 1m, 2m, 3m, 4m, 5m, 5.9m

Σχήμα 4.1.: Σχηματικό διάγραμμα του πειράματος πεδίου MUST. Διακρίνεται ο προσανατολισμός των κτιρίων όσον αφορά τη διεύθυνση του ανέμου των επιλεγμένων δοκιμών, η θέση των πηγών και η θέση των ανιχνευτών συγκέντρωσης (PID και UVIC).



Σχήμα 4.2. : Απεικόνιση της γεωμετρικής διάταξης των κοντέινερ κατά τη διάρκεια του πειράματος MUST. (Ευθυμίου Γ.Χ, 2012)

Κατά τη διάρκεια του πειράματος πραγματοποιήθηκαν εκπομπές προπυλενίου (C_3H_6) διάρκειας 15min, για διαφορετικές θέσεις πηγών (επιφάνεια εδάφους, οροφές κοντέινερ) και για διαφορετικές κατευθύνσεις ανέμου και ατμοσφαιρικές συνθήκες (ευστάθειας, ουδέτερες). Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζεται το αντίστροφο μήκος Monin-Obukhov για τον αισθητήρα που βρίσκεται στον Main Tower, σε ύψος 4m, για τη χρονική περίοδο 20/9/2001 με 26/09/2001. Το μήκος Monin-Obukhov υπολογίζεται από τη σχέση:

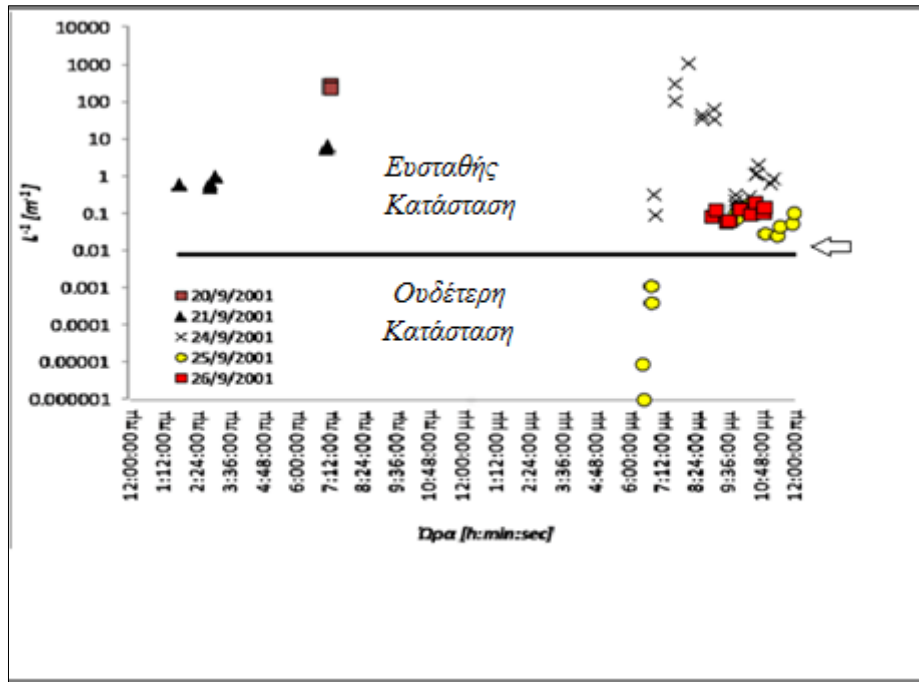
$$L = \frac{u^*{}^3 \bar{T}}{\kappa g w' T'} \quad (4.1)$$

όπου L : μήκος Monin-Obukhov (m) , u^* : ταχύτητα τριβής ($m s^{-1}$)

\bar{T} : μέση θερμοκρασία (K) , κ : σταθερά Von Karman (=0.44)

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας ($m s^{-2}$) , $w' T'$: η ροή θερμοκρασίας ($m s^{-1} K$)

Στο ίδιο σχήμα, το σχήμα 4.3, εμφανίζεται η περιοχή που αντιστοιχεί σε ουδέτερες και ευσταθείς ατμοσφαιρικές συνθήκες. Επιπλέον ο πίνακας 4.1, συγκεντρώνει τα χαρακτηριστικά της μέσης ταχύτητας όπως μετρήθηκαν στα 4m του υπήνεμου πύργου.



Σχήμα 4.3.: Γραφική απεικόνιση του αντίστροφου μήκους Monin-Obukhov για τις δοκιμές του πειράματος από 20/09/2001 έως 26/09/2001.

Πίνακας 4.1.: Συγκεντρωτικά δεδομένα μέσω των ταχυτήτων πειράματος MUST, στα 4m του υπήνεμου πύργου.

Νούμερο Δοκιμής	Ταχύτητα αναφοράς στα 4m από το έδαφος	Διεύθυνση ανέμου	STD των διακυμάνσεων των κατευθύνσεων του ανέμου	Ταχύτητα τριβής	Μήκος Monin-Obukhov
	[m/s]		[deg]		
1	2.35	17	5.7	0.26	91
2	2.01	30	7.3	0.25	62
3	3.06	-49	8.6	0.32	330
4	1.63	-48	4	0.08	5.8
5	2.69	-26	1.8	0.17	4.8
6	1.89	-10	3.8	0.16	7.7
7	2.3	36	9.8	0.35	150
8	2.68	30	7.9	0.35	150
9	2.32	36	8.2	0.26	48
10	2.56	17	6.2	0.25	74
11	7.93	-41	9.5	1.1	28000
12	7.26	-50	8.5	0.76	2500
13	3.89	-41	7.1	0.46	140
14	5.02	-42	9.2	0.66	240
15	4.55	-39	8.5	0.5	170
16	4.49	-47	7.9	0.44	120
17	3.34	39	8.3	0.36	170
18	4	39	7.6	0.42	220
19	2.98	43	9.1	0.39	130
20	2.63	26	9.5	0.35	120
21	3.38	36	7.8	0.37	130

4.3 Μεθοδολογία μοντελοποίησης υπολογιστικού προβλήματος

Η προσομοίωση της εργασίας αφορά την **δοκιμή 16**, η οποία έλαβε χώρα στις 25 Σεπτεμβρίου 2001, αργά το βράδυ στις 22:55μμ. Τα πειραματικά χαρακτηριστικά της επιλεγείσας δοκιμής παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2.: Τα πειραματικά χαρακτηριστικά της επιλεγείσας δοκιμής 16 του πειράματος MUST.

Δοκιμή 16	
Ημερομηνία	25/09/2001
Ώρα εκπομπής	22:55
Ανιχνευτής	Προπυλένιο (C ₃ H ₆)
Διάρκεια εκπομπής	15min
Μαζική παροχή (Q)	0.0067875 kg s ⁻¹
Επιφάνεια πηγής	0.00196 m ²
Ύψος πηγής	2.54 m
Ταχύτητα αναφοράς στα 4m	4.49 ms ⁻¹
Αριθμός Reynolds	10 ⁶
Διεύθυνση ανέμου σε σχέση με τον άξονα x	- 48 ⁰
Μέση ατμοσφαιρική θερμοκρασία στα 4m του υπήνεμου ανέμου	290 K
Επιφανειακή τραχύτητα	0.06091
Ταχύτητα τριβής (υπολογισμένη στον υπήνεμο πύργο)	0.44 ms ⁻¹
Μήκος Monin-Obukhov	120

Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε θεωρώντας την εκπομπή του ρύπου σαν ένα πρόβλημα μόνιμης κατάστασης (steady state), δηλαδή το φυσικό πρόβλημα δεν λαμβάνει υπόψιν τη χρονική μεταβολή (αμετάβλητη στο χρόνο) παρά μόνο τη χωρική. Η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε στον τρισδιάστατο χώρο (3Δ). Η κατασκευή της γεωμετρίας του πειράματος MUST πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού Google Sketch Up 2016, το οποίο είναι ένα εύκολα διαχειρίσιμο και προσιτό λογισμικό τρισδιάστατης απεικόνισης. Αρχικά κατασκευάστηκε το υπολογιστικό χωρίο επίλυσης του φυσικού προβλήματος. Η γεωμετρία του πειράματος MUST, υπολογίστηκε βασιζόμενη στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά κάθε κοντέινερ (πλάτος, μήκος, ύψος), της ενδιάμεσης απόστασης κατά x-άξονα, και κατά z-άξονα, η οποία θεωρήθηκε εν δυνάμει σταθερή και ίση με:

$$\frac{L_x}{h} = 5.08 \Rightarrow L_x = 12.903\text{m}$$

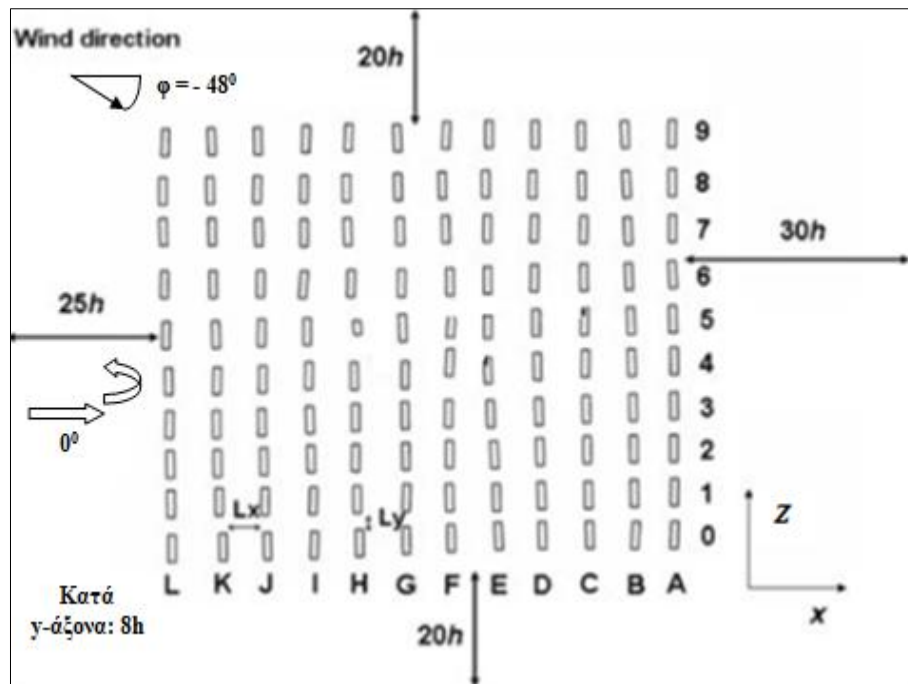
$$\frac{L_z}{h} = 5.08 \Rightarrow L_z = 7.8994\text{m}$$

όπου h (height): το ύψος του κάθε container

Κατά x-άξονα : $\frac{L_x}{h} \times 11 + 12 \times 2.24 = 170.9752 \text{ m} \approx 200 \text{ m}$

Κατά z-άξονα : $\frac{L_z}{h} \times 9 + 10 \times 12.2 = 193.0946 \text{ m} \approx 200 \text{ m}$

Κατά τη συνήθη πρακτική το υπολογιστικό χωρίο επεκτείνεται κατά x- άξονα και κατά z-άξονα έτσι ώστε οι οριακές συνθήκες να εφαρμόζονται ομαλά. Συγκεκριμένα στον x-άξονα, επεκτείνεται το υπολογιστικό πλέγμα κατά 25h (63.5 m) στην είσοδο και κατά 30h (76.2m) στην έξοδο. Αντίστοιχα επεκτείνεται το υπολογιστικό πλέγμα κατά z-άξονα, κατά 20h (50.8 m) τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο ενώ κατά y-άξονα το πλέγμα επεκτείνεται κατά 8h (20m). Το σχήμα 4.4 απεικονίζει και γραφικά τις επεκτάσεις του υπολογιστικού χωρίου.



Σχήμα 4.4.: Απεικόνιση των επεκτάσεων κατά x-άξονα και κατά z-άξονα του υπολογιστικού χωρίου, για τη γεωμετρία του πειράματος MUST.

Συνεπώς, οι διαστάσεις του υπολογιστικού χωρίου που τελικά επιλέχθηκε για να κατασκευαστεί και να επιλυθεί το φυσικό πρόβλημα ισοδυναμούν με :

κατά x-άξονα : 320 m , κατά z-άξονα : 300 m , κατά y-άξονα : 20 m

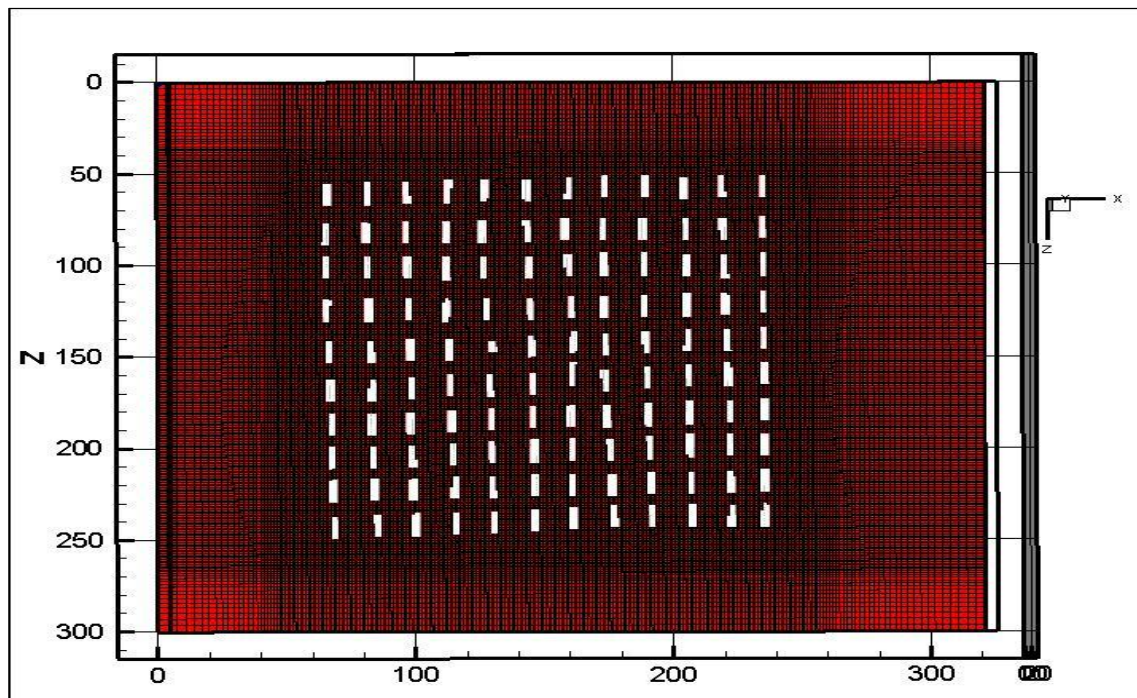
Λαμβάνοντας υπόψιν τους προαναφερθέντες υπολογισμούς, στο λογισμικό Sketch Up εισήχθησαν οι ακριβείς συντεταγμένες των κοντέινερ του πειράματος MUST υπό τη μορφή αρχείου .csv, σχεδιάστηκαν και αποθηκεύτηκε η τελική γεωμετρική διάταξη, σε μορφή αρχείου .obj. Στην επιλεγείσα μορφή αποθήκευσης του αρχείου, ο κώδικας Fortran που αφορά τη δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος grid3d-mlr, είναι σε θέση να διαβάσει το αρχείο και να εξάγει το υπολογιστικό πλέγμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι το λογισμικό Google Sketch Up 2016, θεωρεί ως z-άξονα, τον κατακόρυφο άξονα υπολογισμού του ύψους ενώ ο κώδικας caffca3d-mlr, θεωρεί τον άξονα y κατακόρυφο άξονα, επομένως το αρχείο .obj έχει τροποποιηθεί κατάλληλα (περιστροφή γεωμετρίας) ώστε εφεξής, σε αναφορές στον 3D χώρο, ο άξονας y θα αντιστοιχεί στο ύψος του υπολογιστικού χωρίου, ο άξονας x θα αντιστοιχεί στο πλάτος του υπολογιστικού χωρίου και ο άξονας z, στο μήκος του υπολογιστικού χωρίου αντίστοιχα.

- ο Υπολογιστικό πλέγμα

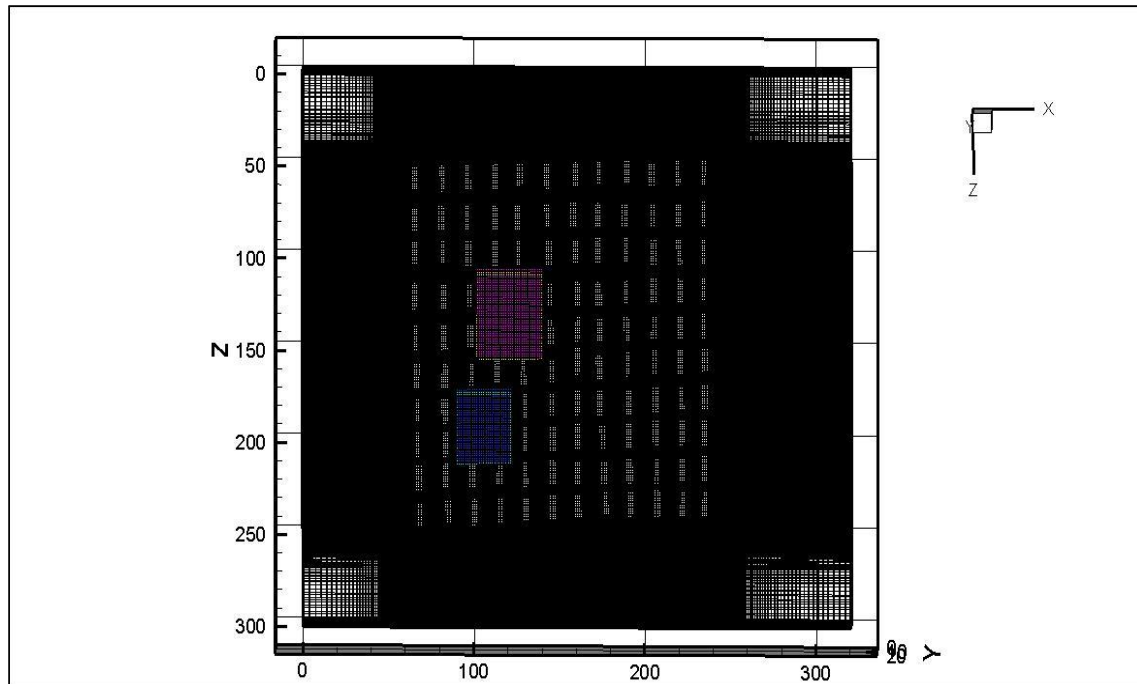
Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά των υπολογιστικών πλεγμάτων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για να επιλυθεί το δοθέν φυσικό πρόβλημα, παρατίθενται στον πίνακα 4.3. Τα βασικά τρεξίματα και φυσικά τα αποτελέσματα αυτών που παρουσιάζονται σε επόμενη ενότητα, πραγματοποιήθηκαν με τα χαρακτηριστικά των δύο πρώτων πλεγμάτων, Grid Test 1 και Grid Test 2. Το πρώτο πλέγμα, αποτελεί το αραιό πλέγμα όπου κάθε κοντέινερ αποτελείται από 6,2 και 5 κόμβους κατά z-άξονα, x-άξονα και y-άξονα. Στο δεύτερο πλέγμα έχει ενσωματωθεί η τεχνική της τοπικής πύκνωσης (Multi-Local Refinement, MLR) η οποία έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 3. Για το εν λόγω φυσικό πρόβλημα, έχουν χρησιμοποιηθεί 2 τοπικές περιοχές πύκνωσης όπου η πρώτη περιλαμβάνει τους πύργους Tower B και Main Tower, ενώ η δεύτερη τον πύργο TD. Στο αραιό πλέγμα του Grid Test 2 έχει χρησιμοποιηθεί ο ίδιος αριθμός κόμβων με το αραιό πλέγμα του Grid Test 1 (6,2,5) ενώ στις δύο περιοχές των τοπικών πυκνώσεων, ο αριθμός των κόμβων έχει διπλασιαστεί - συγκριτικά με το αραιό - και είναι ίσος με (11,4,10) κατά z-άξονα, x-άξονα και y-άξονα αντίστοιχα. Η επιλογή αυτών των αριθμών κόμβων βασίστηκε σε προηγούμενες επιστημονικές εργασίες των Santiago et al. (2010) οι οποίοι προτείνουν διαφορετικά πλέγματα με τον ίδιο αριθμό κόμβων που εφαρμόζονται στην παρούσα εργασία, οι Tseng et al. (2006) προτείνουν πλέγμα με 6 κόμβους ανά πλευρά, ενώ οι Xie et Castro (2006), δρουν πιο επιθετικά, προτείνοντας 20 σημεία πλέγματος ανά πλευρά. Τέλος το Grid Test 3, είναι ένα πλέγμα το οποίο απαρτίζεται από σχεδόν $\approx 10 \times 10^6$ κελιά και ο σκοπός της δημιουργίας του είναι η σύγκρισή του με το Grid Test 2. Με μια προσεκτική ματιά στον πίνακα 4.3, συμπεραίνεται ότι χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος αριθμός κόμβων (11,10,12) κατά μήκος, κατά πλάτος και καθ' ύψος κάθε κοντέινερ στο Grid Test 3, με αυτόν που χρησιμοποιήθηκε στις τοπικές περιοχές πύκνωσης του πλέγματος Grid Test 2. Κάτωθεν, παρατίθενται οι γραφικές απεικονίσεις των υπολογιστικών πλεγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 4.3.: Χαρακτηριστικά πλεγμάτων.

RANS			
	Grid Test 1 (No MLR)	Grid Test 2 (MLR)	Grid Test 3 (No MLR)
Συνολικά Κελιά	2.745.720	3.213.880 1 ^η Περιοχή Πύκνωσης: 279.680 2 ^η Περιοχή Πύκνωσης: 188.480	9.783.600
Αριθμός κόμβων κατά μήκος ενός κοντέινερ ΑΡΑΙΟ // z-άξονα	6	6	11
Αριθμός κόμβων κατά πλάτος ενός κοντέινερ ΑΡΑΙΟ // x-άξονα	2	2	4
Αριθμός κόμβων καθ' ύψος ενός κοντέινερ ΑΡΑΙΟ // y-άξονα	5	5	10
Αριθμός κόμβων κατά μήκος ενός κοντέινερ ΤΟΠΙΚΗ ΠΥΚΝΩΣΗ//z-άξονα	-	11	-
Αριθμός κόμβων κατά πλάτος ενός κοντέινερ ΤΟΠΙΚΗ ΠΥΚΝΩΣΗ//x-άξονα	-	4	-
Αριθμός κόμβων καθ' ύψος ενός κοντέινερ ΤΟΠΙΚΗ ΠΥΚΝΩΣΗ//y-άξονα	-	10	-



Σχήμα 4.5.: Η γεωμετρία, το χωρίο υπολογισμού και το πλέγμα (Test Grid 1, $\approx 2.745 \cdot 10^6$ κελιά).



Σχήμα 4.6.: Η γεωμετρία, το χωρίο υπολογισμού και το πλέγμα (Test Grid 2, $\approx 3.213 \cdot 10^6$ κελιά, 2 περιοχές τοπικής πυκνωσης, $1^{\text{η}}$ μωβ: περιβάλλει τους πύργους Main Tower & Tower B, $2^{\text{η}}$ μπλε: τον Tower D).

ο Συνθήκες εισόδου

Το πρόβλημα για να επιλυθεί απαιτεί τον υπολογισμό των τιμών των προς επίλυση εξισώσεων στην είσοδο του χωρίου (ταχυτήτων, τυρβώδους κινητικής ενέργειας, καταστροφή τυρβώδους κινητικής ενέργειας ϵ , ειδικός ρυθμός καταστροφής τυρβώδους κινητικής ενέργειας ω , θερμοκρασίας, συγκέντρωσης). Για να συμβεί αυτό, θα πρέπει να προηγηθεί κατάλληλη επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων που δίνονται στον πίνακα 4.2. Από τον πίνακα 4.4 και λαμβάνοντας υπόψιν την κατηγοριοποίηση των ατμοσφαιρικών συνθηκών με βάση την τιμή του μήκους Monin-Obukhov, δηλαδή τον πίνακα 4.2, παρατηρείται ότι η δοκιμή 16, έχει τιμή L (μήκος Monin-Obukhov) ίση με 120. Με άλλα λόγια, η προς προσομοίωση δοκιμή 16, αντιστοιχεί σε *πολύ ευσταθή ατμόσφαιρα*.

Πίνακας 4.4.: Κατηγοριοποίηση της ατμοσφαιρικής κατάστασης με κριτήριο την τιμή του μήκους Monin-Obukhov. (Verona A., 2009)

Ατμοσφαιρική Κατάσταση	Εύρος μήκους Monin-Obukhov
Πολύ ευσταθής	$0 < L < 200$
Ευσταθής	$200 < L < 1000$
Ουδέτερη	$ L > 1000$
Ασταθής	$-1000 < L < -200$
Πολύ ασταθής	$-200 < L < 0$

Η γνώση του είδους της ατμοσφαιρικής κατάστασης που επικρατούσε την στιγμή του πειράματος, επιτρέπει τον προσδιορισμό της ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει του ύψους y . Προκειμένου να αποφευχθούν οι ασταθείς επιδράσεις οι οποίες συνδέονται με τις πραγματικές μετεωρολογικές συνθήκες η μέση ταχύτητα του ανέμου καθώς επίσης και η κατεύθυνσή του, εξήχθησαν από δείγματα των 200s από τα συνολικά 15 min της εκπομπής του ρύπου. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει τη σύγκριση μεταξύ πειραματικών δεδομένων και δεδομένων από τις υπολογιστικές προσομοιώσεις. Για την επιλεγείσα δοκιμή προσομοίωσης, την δοκιμή 16, όπως προκύπτει και από τον πίνακα 4.1, σε ύψος $y=4m$, η γωνία πρόσπτωσης του ανέμου ισούται με $\varphi = -47^\circ$ με μια σταθερή διακύμανση 7.5° . Υπολογίζοντας ωστόσο τη μέση κατεύθυνση πρόσπτωσης του ανέμου στα υπόλοιπα ύψη, διαθέσιμα από τις πειραματικές μετρήσεις συμπεραίνεται ότι η κατεύθυνση του ανέμου αλλάζει ελαφρώς με το ύψος, με μια διακύμανση της μέσης γωνίας εντός του εύρους -47° έως -50° , όταν υπάρχει υψομετρική μετακίνηση, από ύψος $y=4m$ σε ύψος $y=16m$. Τελικά, λαμβάνοντας υπ' όψιν τα προαναφερθέντα, δηλαδή τις γωνιακές διακυμάνσεις του ανέμου σε σχέση με το ύψος, ορίστηκε ως μέση τιμή γωνίας πρόσπτωσης του ανέμου η τιμή $\varphi = -48^\circ$. Συγκεκριμένα, ο πίνακας 4.5 πληροφορεί ότι η ταχύτητα του ανέμου υπολογιζόμενη στα 4m, ισούται με $u_{(y=4m)}=4.49 \text{ ms}^{-1}$. Επίσης ο άνεμος σχηματίζει γωνία $\varphi = -48^\circ$ με τον άξονα x . Επομένως ο άνεμος εισέρχεται στο πεδίο και κατά τον z -άξονα και κατά τον x -άξονα. Στο σχήμα 4.2, παριστάνεται η φορά του ανέμου. Επομένως οι συνιστώσες της ταχύτητας $u(y)$ υπολογίζονται ως εξής :

$u = \cos\varphi$ και $w = -\sin\varphi$ (στην w συνιστώσα εισέρχεται το μείον γιατί έχει φορά αντίθετη από τη θετική φορά του z -άξονα)

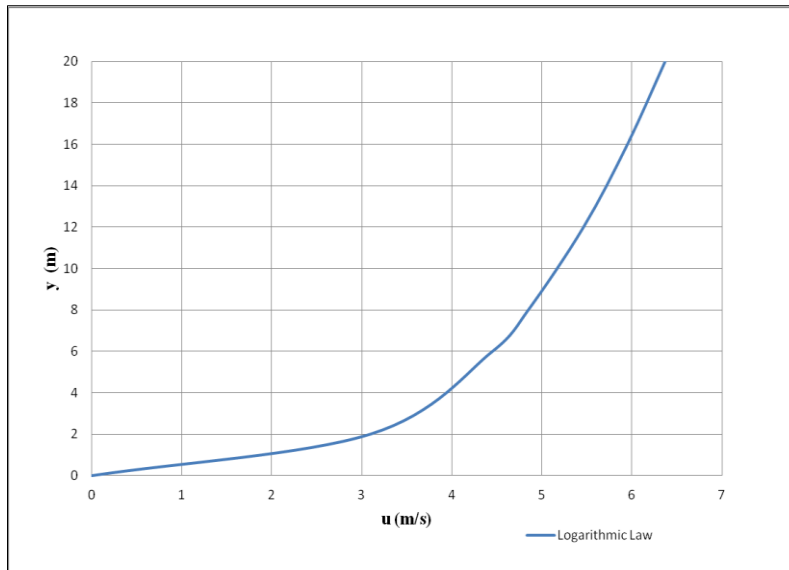
Κάνοντας χρήση του λογαριθμικού νόμου για ατμοσφαιρική κατάσταση ευστάθειας, υπολογίζεται το προφίλ της ταχύτητας σε διαφορετικά ύψη. Αναλυτικά:

$$u(y) = \frac{u^*}{\kappa} \left[\ln\left(\frac{y}{y_0}\right) - \Psi_m\left(\frac{y}{L}\right) \right] \quad (4.2)$$

όπου $\Psi_m\left(\frac{y}{L}\right) = -\frac{5y}{L}$ (σε συνθήκες ευστάθειας) (Verona A., 2009)

Πίνακας 4.5.: Το προφίλ της ταχύτητας του ανέμου $u(y)$ (ms^{-1}) συναρτήσει του ύψους y (m), και οι τιμές των συνιστωσών της ταχύτητας κατά x -άξονα και κατά z -άξονα.

$u_{(y=4m)}=4.49 \text{ ms}^{-1}$	y (m)	u (ms^{-1})	u (ms^{-1})	w (ms^{-1})
$u^* = 0.44 \text{ ms}^{-1}$	0	0.000000	0.000000	0.000000
$z_0 = 0.06091$	2	3.092353	2.069188	-2.298066
$\varphi = -48^\circ$	6	4.450213	2.977774	-3.307153
	8	4.848376	3.244197	-3.603046
	12	5.462371	3.655040	-4.059333
	16	5.949965	3.981304	-4.421686
	20	6.368298	4.261223	-4.732568



Σχήμα 4.7.: Λογαριθμικό προφίλ ταχύτητας ανέμου (ms^{-1}) συναρτήσει του ύψους y (m).

Για τον υπολογισμό της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k χρησιμοποιούνται οι μέσες τιμές των μετρήσεων των πειραματικών δοκιμών που έλαβαν χώρα στις 25 και 26 Σεπτεμβρίου και μετρήθηκαν στον υπήνεμο πύργο. Αξίζει να σημειωθεί ότι στον υπήνεμο πύργο έχουν μετρηθεί μόνο οι δύο συνιστώσες της ταχύτητας (u και v). Για αυτό το λόγο οι πειραματικές τιμές της τυρβώδους κινητικής ενέργειας υπολογίζονται θεωρώντας ότι η τρίτη συνιστώσα της ταχύτητας (w) ισούται με την ταχύτητα (v) δηλαδή:

$$\sigma_w = \sigma_v$$

όπου σ_u , σ_v , σ_w είναι οι τυπικές αποκλίσεις των ταχυτήτων u , v και w . Υπενθυμίζεται ότι η τυρβώδης κινητική ενέργεια υπολογίζεται από τη σχέση:

$$k = \frac{1}{2}(\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2)$$

Οι πειραματικές μετρήσεις που μετρήθηκαν στον υπήνεμο άνεμο ήταν τρεις συνολικά, στα εξής διαφορετικά ύψη: 4m, 8m και 16m. Με βάση τις μετρούμενες τιμές των ταχυτήτων υπολογίστηκαν στα τρία αυτά ύψη οι αντίστοιχες τυρβώδεις κινητικές ενέργειες. Ωστόσο επειδή το προφίλ εισόδου των προς υπολογισμό μεταβλητών αφορούν και άλλα ύψη πλην των 3 υπολογισθέντων, κρίθηκε αναγκαία η χρησιμοποίηση γραμμικών παρεμβολών και προεκβολών στον υπολογισμό των τυπικών αποκλίσεων των ταχυτήτων και κατ' επέκταση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας στα ύψη αυτά. Αναλυτικά :

Πίνακας 4.6.: Υπολογισμός τυρβώδους κινητικής ενέργειας k με χρήση πειραματικών δεδομένων.

Y (ύψος m)	σ_u (m/s)	σ_v (m/s)	σ_w (m/s)	σ_u^2 (m ² s ⁻²)	σ_v^2 (m ² s ⁻²)	σ_w^2 (m ² s ⁻²)	k (m ² s ⁻²)
0	0.74204	0.54636	0.54636	0.54892	0.29850	0.29850	0.57296
2	0.72744	0.54714	0.54714	0.52852	0.29936	0.29936	0.56362
4	0.71283	0.54792	0.54792	0.50813	0.30022	0.30022	0.55428
6	0.69823	0.54870	0.54870	0.48773	0.30107	0.30107	0.54494
8	0.68362	0.54948	0.54948	0.46734	0.30193	0.30193	0.53560
12	0.64791	0.54246	0.54246	0.42106	0.29432	0.29432	0.50485
16	0.61220	0.53545	0.53545	0.37479	0.28670	0.28670	0.47410
20	0.57649	0.52843	0.52843	0.32851	0.27909	0.27909	0.44334

*Τα έντονα μαύρα χρώματα του πίνακα 4.6 παριστάνουν τις μετρούμενες πειραματικές τιμές στον υπήνεμο πύργο

Εν συνεχεία, ανάλογα με το μοντέλο τύρβης που χρησιμοποιείται για την προσομοίωσή της, υπολογίζονται τα μεγέθη των δεύτερων εξισώσεων (πχ στο k-ε το ε, στο k-ω, το ω κ.ο.κ) μέσα από τύπους. Συγκεκριμένα, στις προσομοιώσεις με μοντέλα τύρβης k-ε, MMK k-ε, η καταστροφή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\varepsilon = \frac{0.01 \times C_\mu \times \rho \times k^2}{\mu_t}$$

όπου C_μ : σταθερά, ίση με 0.09, ρ : πυκνότητα του αέρα (kg m⁻³), k: τυρβώδης κινητική ενέργεια, μ_t : τυρβώδης συνεκτικότητα

Στις προσομοιώσεις με μοντέλα τύρβης k-ω, SST k-ω, ο ειδικός ρυθμός καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας υπολογίζεται από την σχέση :

$$\omega = \frac{0.01 \times \rho \times k}{\mu_t}$$

όπου ρ : πυκνότητα του αέρα (kg m⁻³), k: τυρβώδης κινητική ενέργεια, μ_t : τυρβώδης συνεκτικότητα

Στην παρούσα εργασία έγιναν προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας και τα πέντε μοντέλα τύρβης, επομένως οι τιμές των ε και ω που υπολογίστηκαν, απεικονίζονται στον πίνακα 4.7.

Πίνακας 4.7.: Τιμές των ε και ω υπολογισμένες σε διαφορετικά ύψη.

Y(ύψος, m)	ε (ρυθμός καταστροφής τύρβης)	ω (ειδικός ρυθμός καταστροφής τύρβης)
0	19.34	375.10
2	18.10	362.87
6	17.50	356.76
8	16.90	350.64
12	15.02	330.51
16	13.24	310.38
20	11.58	290.24

Επομένως το προφίλ εισόδου κατά xy-επίπεδο και κατά yz-επίπεδο περιλαμβάνει τις υπολογισμένες τιμές των 3 συνιστωσών της ταχύτητας, του k, του ε ή ω αντίστοιχα, της θερμοκρασίας του αέρα (σταθερή 290K) και της συγκέντρωσης (η οποία είναι μηδενική καθώς θεωρείται ότι δεν υπάρχει ρύπανση πριν την έναρξη της εκπομπής του ρύπου) στα σημεία (0,Y,0), (160,Y,0), (320,Y,0) στο xy-επίπεδο και (0,Y,0),(0,Y,150), (0,Y,300) στο yz-επίπεδο (όπου Y οι τιμές των 7 διαφορετικών υψών). Επίσης θα πρέπει να αναφερθούν και τιμές φυσικών μεγεθών που χρησιμοποιήθηκαν κατά τον υπολογισμό των προαναφερθέντων μεγεθών ή/και μεγεθών που ενσωματώθηκαν στον κώδικα και χρησίμευσαν στο υπολογιστικό κομμάτι της προσομοίωσης.

Πίνακας 4.8.: Τιμές φυσικών παραμέτρων μεταβλητών προβλήματος.

Θερμοκρασία αέρα (Temp)	290	K
Πυκνότητα αέρα ρ	1.2035	kg m ⁻³
Ειδική θερμοχωρητικότητα c _p	1.0045 10 ³	J kg ⁻¹ K ⁻¹
Δυναμική συνεκτικότητα μ	1.8383 10 ⁻⁵	kg m ⁻¹ s ⁻¹
Αριθμός Prandtl	0.7120	
Αριθμός Schmidt	0.9	
Πυκνότητα προπυλενίου C ₃ H ₆ (20 ⁰ C)	1.81	kg m ⁻³
Μαζική παροχή προπυλενίου C ₃ H ₆	0.0067875	kg s ⁻¹
Θερμοκρασία κτιρίου	297	K
Ειδική θερμοχωρητικότητα κτιρίου c _p	840	J kg ⁻¹ K ⁻¹
Πυκνότητα κτιρίου	2242.	kg m ⁻³

ο Οριακές Συνθήκες

Μεταβλητή	Επίπεδο x (είσοδος)	Επίπεδο x (έξοδος)	Επίπεδο y (έδαφος)	Επίπεδο y (πάνω όριο)	Επίπεδο z (είσοδος)	Επίπεδο z (έξοδος)
u	Dirichlet	$\frac{\partial u}{\partial x} = 0$	k-ε, MMK: συναρτήσεις τοιχώματος k-ω,SST: u = 0	$\frac{\partial u}{\partial y} = 0$	Dirichlet	$\frac{\partial u}{\partial z} = 0$
v	Dirichlet	$\frac{\partial v}{\partial x} = 0$	v = 0	v = 0	Dirichlet	$\frac{\partial v}{\partial z} = 0$
w	Dirichlet	$\frac{\partial w}{\partial x} = 0$	k-ε, MMK: συναρτήσεις τοιχώματος k-ω,SST: w = 0	$\frac{\partial w}{\partial y} = 0$	Dirichlet	$\frac{\partial w}{\partial z} = 0$
k	Dirichlet	$\frac{\partial k}{\partial x} = 0$	k-ε, MMK: συναρτήσεις τοιχώματος k-ω,SST: k = 0	$\frac{\partial k}{\partial y} = 0$	Dirichlet	$\frac{\partial k}{\partial z} = 0$
ε	Dirichlet	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0$	k-ε, MMK: συναρτήσεις τοιχώματος kω,SST:ω=σταθερή	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = 0$	Dirichlet	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = 0$
Temp	Dirichlet	$\frac{\partial T}{\partial x} = 0$	Στερεό-Ρευστό: Tconst Στερεό-στερεό:	$\frac{\partial T}{\partial y} = 0$	Dirichlet	$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$
Conc	Dirichlet	$\frac{\partial C}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial C}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial C}{\partial y} = 0$	Dirichlet	$\frac{\partial C}{\partial z} = 0$

Η εκπομπή του ρύπου προσομοιώνεται ορίζοντας ένα όρο τοπικής πηγής (S_c) στο δεξί μέλος της εξίσωσης της συγκέντρωσης στην θέση εκπομπής του ρύπου. Στην επιλεγείσα δοκιμή 16, η θέση της πηγής βρίσκεται στην οροφή του κοντέινερ J7 (σχήμα 4.1) και έχει συντεταγμένες (στο πραγματικό πεδίο) :

$$x_{source} = -53.49, \quad y_{source} = 48.78m, \quad z_{source} = 2.54m$$

Η τιμή του όρου πηγής εφαρμόζεται σε ένα υπολογιστικό κελί και ισούται με την πειραματική τιμή της μαζικής παροχής του ρύπου δηλαδή $Q = 0.0067875 \text{ kg s}^{-1}$.

- ο Συντελεστές υποχαλάρωσης

Κατά την προσομοίωση του πειράματος MUST με τον κώδικα υπολογιστικής ρευστομηχανικής *caffa3d_mlr*, υπήρξαν προβλήματα εφαρμογής των αριθμητικών σχημάτων που υποστήριζε ο κώδικας δηλαδή του υβριδικού σχήματος (Hybrid scheme) και του σχήματος BSOU (Bounded Second Order Upwind). Αποδείχθηκε ότι σημαντικό ρόλο στην εφαρμογή τους και στην ομαλή λειτουργία του κώδικα, αποτελούσαν οι τιμές των συντελεστών υποχαλάρωσης που έδινε ο χρήστης για κάθε υπολογιζόμενη μεταβλητή. Ωστόσο μέσα από μια μικρή βιβλιογραφική έρευνα, εντοπίστηκε η δημοσίευση των R. M. Barron & Ali A. Salehi Neyshabouri (2003) που είχε ως θέμα τις επιδράσεις των συντελεστών υποχαλάρωσης σε προσομοιώσεις τυρβώδους ροής. Οι συγγραφείς επίλυαν σε δισδιάστατο επίπεδο (2Δ) 3 κατηγορίες τυρβώδους ροής τις : ροή αγωγού (duct flow), ροή σε κανάλι (trench flow) και inclined free falling jet flow και παρατηρούνταν τι επίδραση είχαν οι αλλαγές των τιμών των συντελεστών υποχαλάρωσης σε διαφορετικές μεταβλητές, διαφορετικά σχήματα και διαφορετικού μεγέθους πλέγματα στην τελική σύγκλιση της αριθμητικής επίλυσης. Η ροή θεωρούνταν σταθερή, ασυμπίεστη και τυρβώδης και για την μοντελοποίηση της τύρβης χρησιμοποιούνταν το μοντέλο k-ε με συναρτήσεις τοιχώματος. Σταθερές οριακές συνθήκες χρησιμοποιούνταν στην είσοδο, έξοδο, στα τοιχώματα και στις ελεύθερες επιφάνειες. Η μέθοδος πεπερασμένων όγκων χρησιμοποιήθηκε για την ολοκλήρωση των προς επίλυση εξισώσεων ροής, 2 αριθμητικά σχήματα χρησιμοποιήθηκαν για τη διακριτοποίηση των όρων συναγωγής, τα POW (power law scheme) και SOU (second order scheme). Τέλος χρησιμοποιήθηκε ως αριθμητικός επιλύτης, ο επιλύτης πίεσης SIMPLE. Αυτή η εκτενής αναφορά ως προς τις συνθήκες, αριθμητικά σχήματα, αριθμητικούς επιλύτες, έγινε με σκοπό να φανεί η ομοιότητα χειρισμού της εργασίας τους με την παρούσα εργασία έτσι ώστε να δικαιολογείται η αξιολόγηση και η κατάλληλη ενσωμάτωση των αποτελεσμάτων των R. M. Barron & Ali A. Salehi Neyshabouri, στην παρούσα εργασία. Οι τελευταίοι, κατέληξαν στην πρόταση των κάτωθεν συντελεστών υποχαλάρωσης:

Πίνακας 4.9.: Προτεινόμενες τιμές συντελεστών υποχαλάρωσης από τους R. M. Barron & Ali A. Salehi Neyshabouri.

Συντελεστές υποχαλάρωσης	a_u, a_v (velocity)	a_p (pressure)	a_k (turbulent kinetic energy)	a_ϵ (dissipation of turbulent kinetic energy)	a_ν (eddy viscosity)	a_g (generation term)
«ασφαλείς» τιμές	0.1–0.9	0.1–0.2	0.2–0.4	0.1–0.2	0.5–0.9	0.1–0.9
προτεινόμενες τιμές	0.8–0.9	0.2	0.3	0.1	0.6	0.1–0.3

Στηριζόμενοι λοιπόν στις άνωθεν τιμές των συντελεστών υποχαλάρωσης και κατόπιν δοκιμών καταλήξαμε στους εξής συντελεστές υποχαλάρωσης, ξεχωριστά για υβριδικό σχήμα και για σχήμα BSOU.

Πίνακας 4.10.: Συντελεστές υποχαλάρωσης για προσομοιώσεις με υβριδικό σχήμα και σχήμα BSOU.

Συντελεστές υποχαλάρωσης	URFU URFV URFW (velocity)	URFP (pressure)	URFK (TKE)	URFE (dissipation of TKE)	URFT (Temperature)	URFC (Concentration)	URFVIS (eddy viscosity)	URFDEN (density)
Υβριδικό σχήμα (Hybrid)	0.4	0.2	0.4	0.4	1.0	1.0	0.5	0.9
Σχήμα BSOU	0.8	0.8	0.2	0.2	1.0	1.0	0.5	0.9

Πρέπει να αναφερθεί ότι το κριτήριο σύγκλισης που τέθηκε ως παράμετρος επίλυσης του εν λόγω φυσικού προβλήματος, για όλα τα μεγέθη ήταν : (Κριτήριο σύγκλισης $\leq 510^{-3}$)

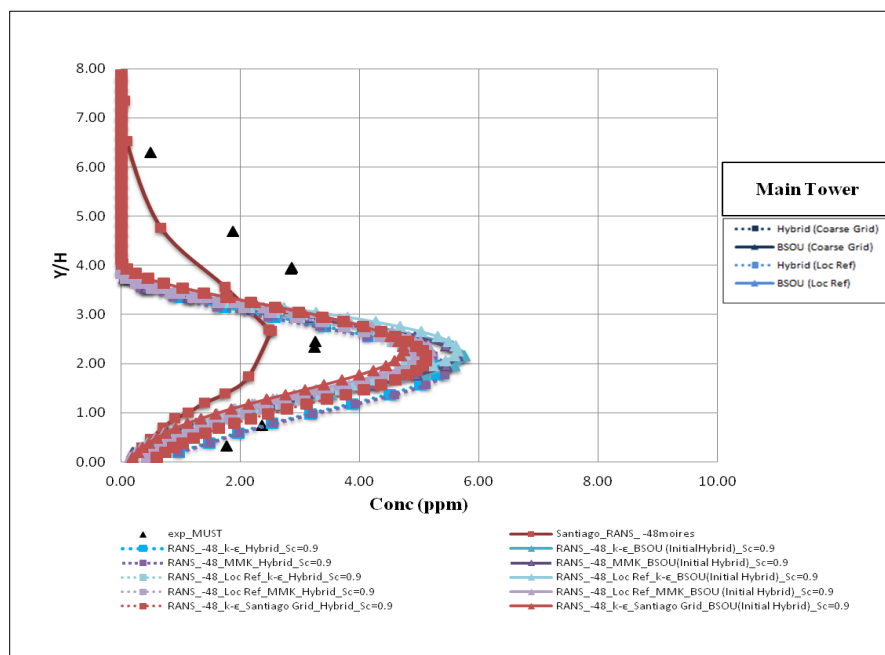
Ακόμη, είναι άξιο αναφοράς ότι οι προσομοιώσεις που έχουν πραγματοποιηθεί με υβριδικό σχήμα σε αραιό πλέγμα (No MLR), ξεκινάνε από αυθαίρετο πεδίο ενώ οι προσομοιώσεις για το ίδιο πλέγμα και για αριθμητικό σχήμα BSOU, ξεκινάνε με αρχική λύση, τη λύση που έχει υπολογιστεί με την προσομοίωση του υβριδικού σχήματος. Επίσης, όσον αφορά τις προσομοιώσεις με πλέγμα με 2 περιοχές τοπικής πύκνωσης (MLR), με υβριδικό σχήμα, και για όλα τα μοντέλα τύρβης πλην του MMK k-ε, ξεκινάνε έχοντας αρχική λύση τη λύση μοντέλου MMK k-ε για πλέγμα MLR. Όσον αφορά τις προσομοιώσεις με αριθμητικό σχήμα BSOU και πλέγμα MLR, ξεκινάνε πάντα έχοντας ως λύση τη λύση του υβριδικού σχήματος. Επιπλέον, για χάρην ευκολίας του αναγνώστη, τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες ακολουθούν συγκεκριμένο μοτίβο. Δηλαδή το κάθε μοντέλο τύρβης έχει δικό του χρώμα. Η έντονη απόχρωση αναφέρεται σε αραιό πλέγμα, η λιγότερο έντονη σε πλέγμα με τοπική πύκνωση. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν

από υβριδικό σχήμα παριστάνονται με τετράγωνο σχήμα και διακεκομμένη γραμμή ενώ τα αποτελέσματα με αριθμητικό σχήμα BSOU, παριστάνονται με τριγωνικό σχήμα και συνεχή γραμμή. Στις επόμενες ενότητες όπου παρατίθενται διαγράμματα ανάλυσης ευαισθησίας μιας παραμέτρου, η κάθε παράμετρος απεικονίζεται και πάλι με συγκεκριμένο χρώμα σε όλες τις εξεταζόμενες περιοχές (Main Tower, TB,TD,TC). Τέλος, το σύνολο των προσομοιώσεων υλοποιήθηκε σε Linux περιβάλλον, σε cluster του εργαστηρίου ενώ η επεξεργασία των αποτελεσμάτων και η απεικόνιση των contours των συγκεντρώσεων και ΤΚΕ έγινε με χρήση του εμπορικού προγράμματος επεξεργασίας δεδομένων TECPLOT EX 2016.

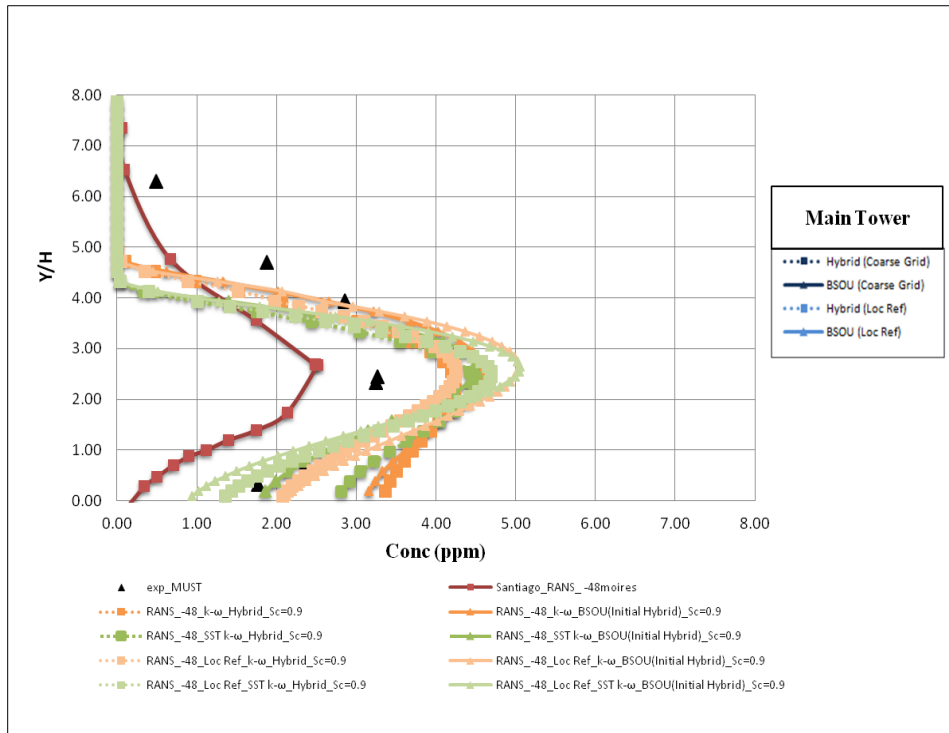
4.4 Αποτελέσματα μέσω των συγκεντρώσεων Conc για διαφορετικά μοντέλα τύρβης

Το φυσικό πρόβλημα προσομοιώθηκε και επιλύθηκε κάνοντας χρήση διαφορετικού μοντέλου τύρβης κάθε φορά, με χρήση και των 2 διαθέσιμων αριθμητικών σχημάτων δηλαδή του υβριδικού σχήματος και του BSOU, σε αραιό πλέγμα και σε πλέγμα με τοπική πυκνωση. Στη συνέχεια παρατίθενται σε διαγράμματα και σε ισοϋψείς καμπύλες τα αποτελέσματα των μέσων τιμών των συγκεντρώσεων ανά ομάδες: στην πρώτη ομάδα διακρίνονται τα μοντέλα τύρβης k-ε και MMK k-ε που ανήκουν στην ίδια «οικογένεια» και αντίστοιχα, στην δεύτερη ομάδα περιλαμβάνονται τα μοντέλα k-ω και SST k-ω. Βέβαια η κάθε ομάδα μοντέλων τύρβης απεικονίζει τις μέσες συγκεντρώσεις στις θέσεις υπολογισμού τους δηλαδή στους 4 πύργους: Main Tower, TB, TD & TC. Αυτή η κατηγοριοποίηση θα βοηθήσει στη συνέχεια στο σχολιασμό και στη συγκριτική μελέτη των αποτελεσμάτων.

▪ Main Tower

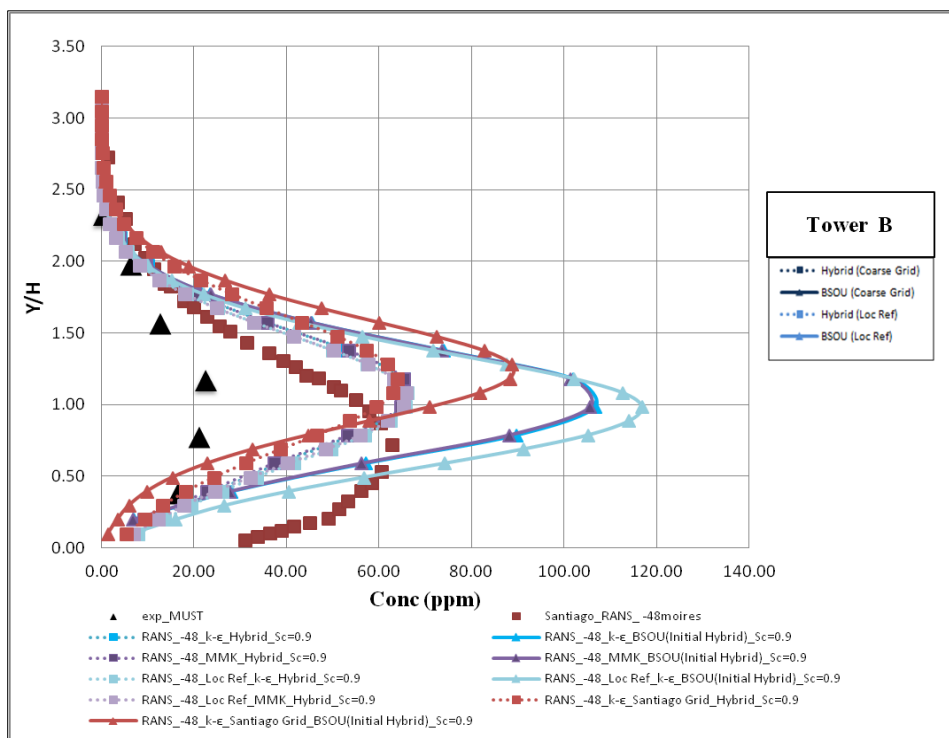


Σχήμα 4.8.: Απεικόνιση κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm) για μοντέλα τύρβης k-ε, MMK k-ε, για γωνία ανέμου - 48⁰, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, για αριθμό Sc=0.9, με/χωρίς τοπική πυκνωση (No MLR- MLR), στο Main Tower.

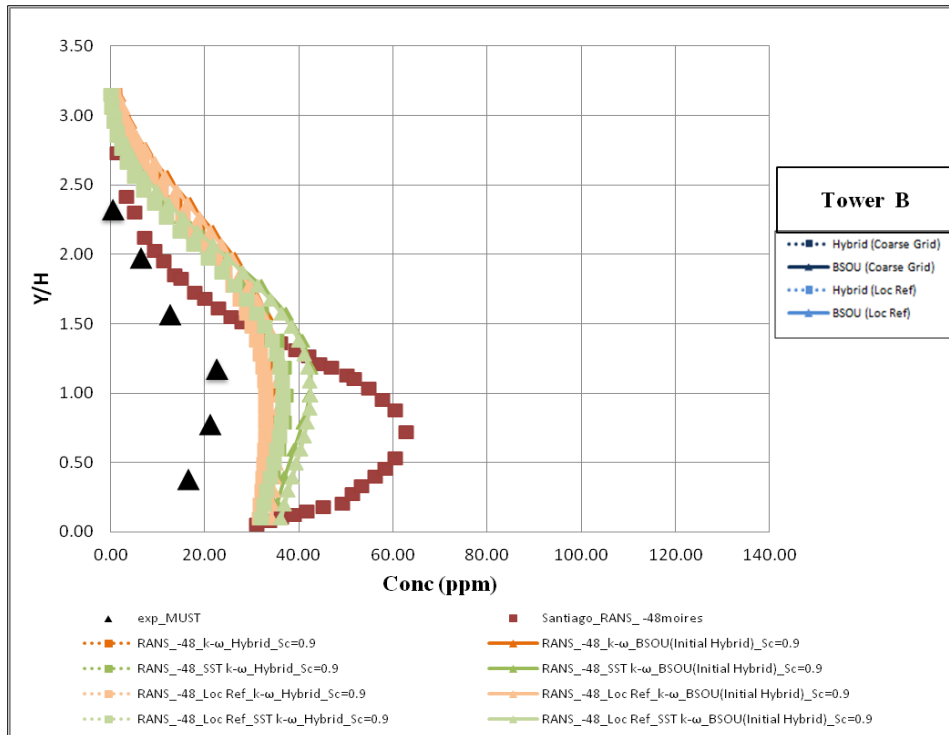


Σχήμα 4.9.: Απεικόνιση κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm) για μοντέλα τύρβης k- ω , SST k- ω , για γωνία ανέμου - 48⁰, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, για αριθμό Sc=0.9, με/χωρίς τοπική πύκνωση (No MLR- MLR), στο Main Tower.

■ **Tower B**

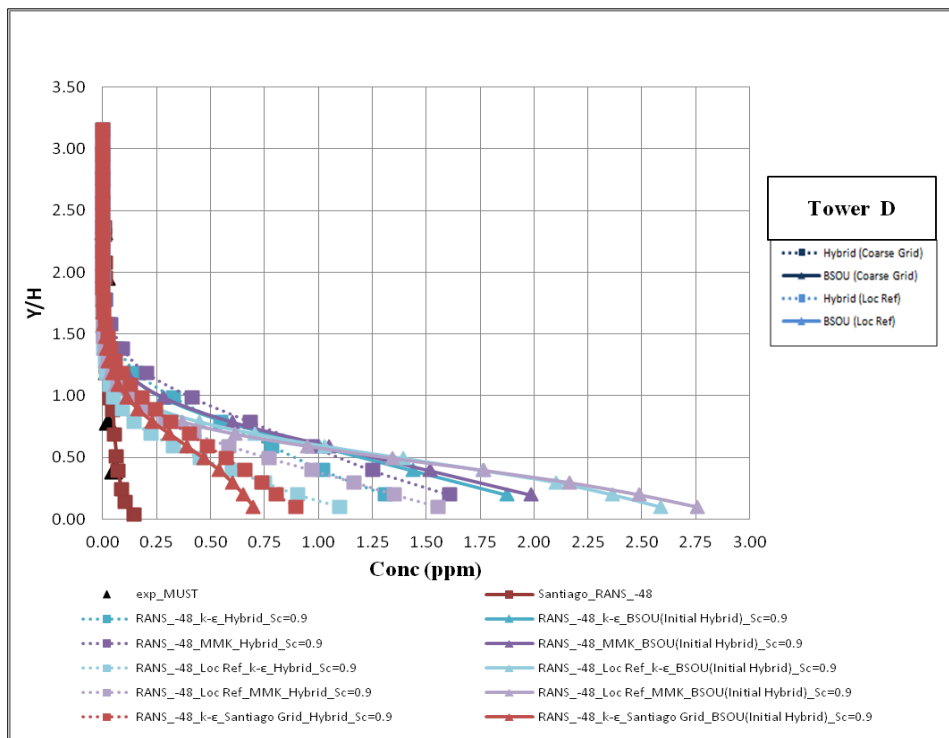


Σχήμα 4.10.: Απεικόνιση κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm) για μοντέλα τύρβης k- ϵ , MMk k- ϵ , για γωνία ανέμου - 48⁰, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, για αριθμό Sc=0.9, με/χωρίς τοπική πύκνωση (No MLR- MLR), στο Tower B.

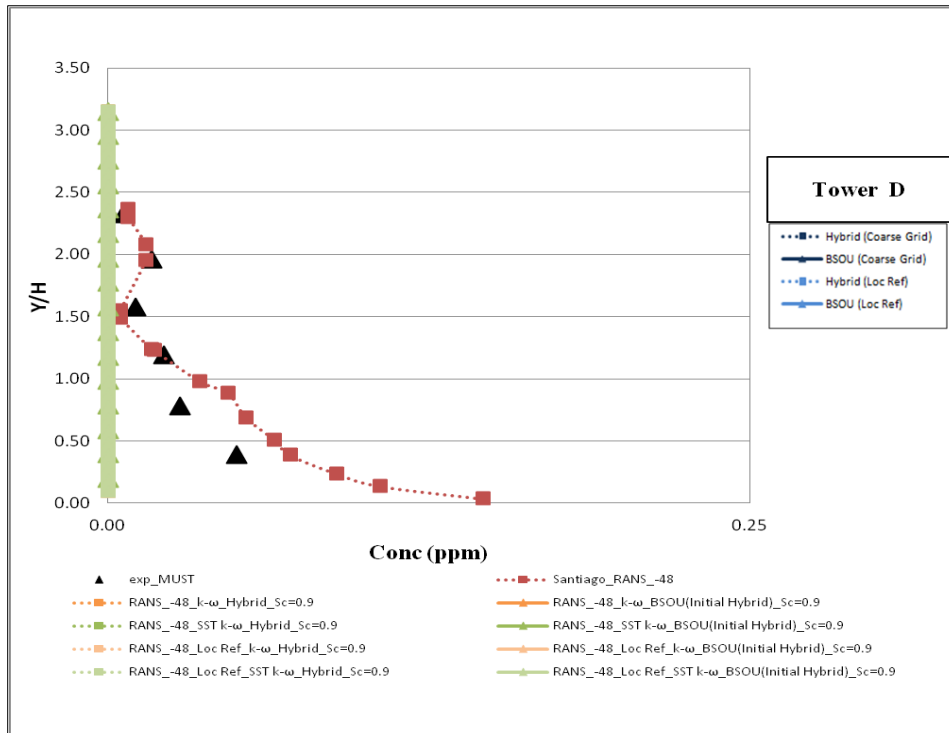


Σχήμα 4.11.: Απεικόνιση κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm) για μοντέλα τύρβης k- ω , SST k- ω , για γωνία ανέμου - 48⁰, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, για αριθμό Sc=0.9, με/χωρίς τοπική πυκνώση (No MLR- MLR), στο Tower B.

■ **Tower D**

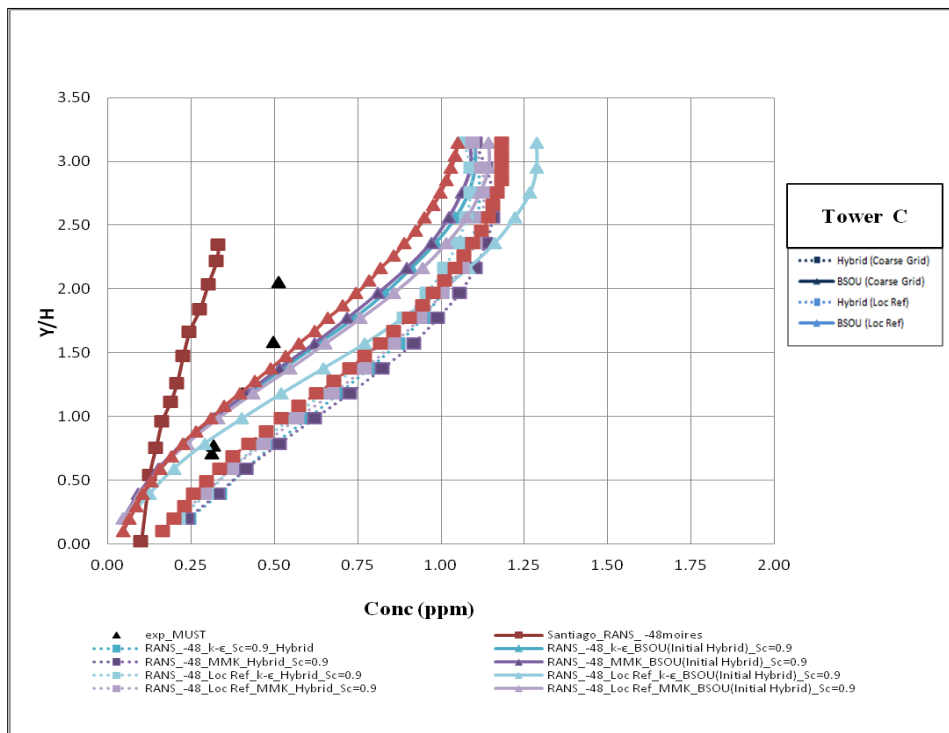


Σχήμα 4.12.: Απεικόνιση κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm) για μοντέλα τύρβης k- ϵ , MMK k- ϵ , για γωνία ανέμου - 48⁰, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, για αριθμό Sc=0.9, με/χωρίς τοπική πυκνώση (No MLR- MLR), στο Tower D.

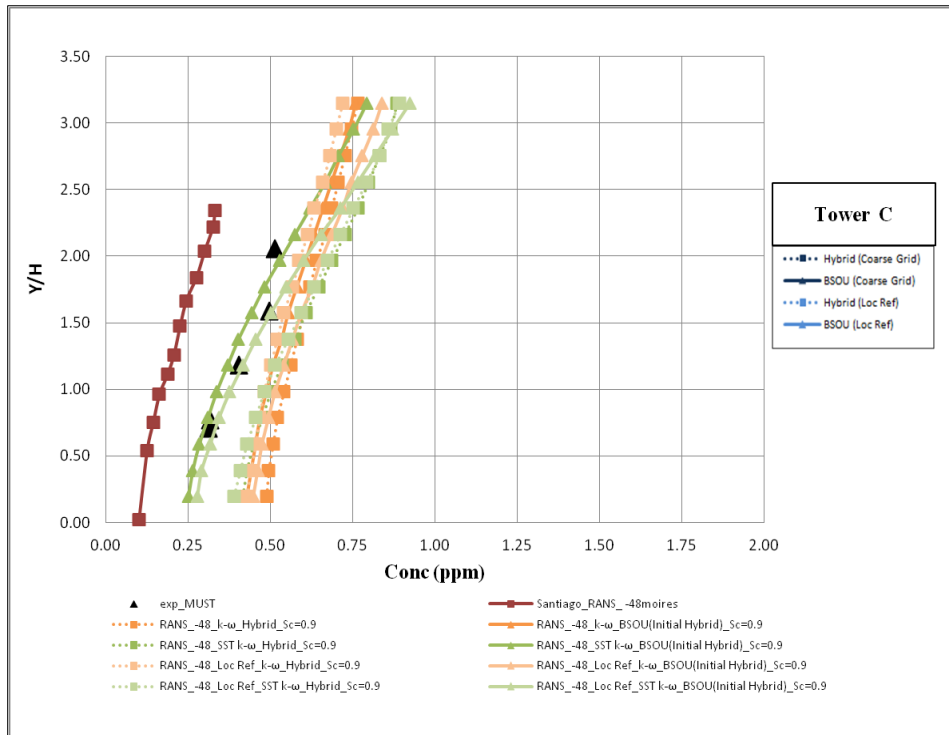


Σχήμα 4.13.: Απεικόνιση κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm) για μοντέλα τύρβης k- ω , SST k- ω , για γωνία ανέμου - 48⁰, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, για αριθμό Sc=0.9, με/χωρίς τοπική πυκνωση (No MLR- MLR), στο Tower D.

■ **Tower C**

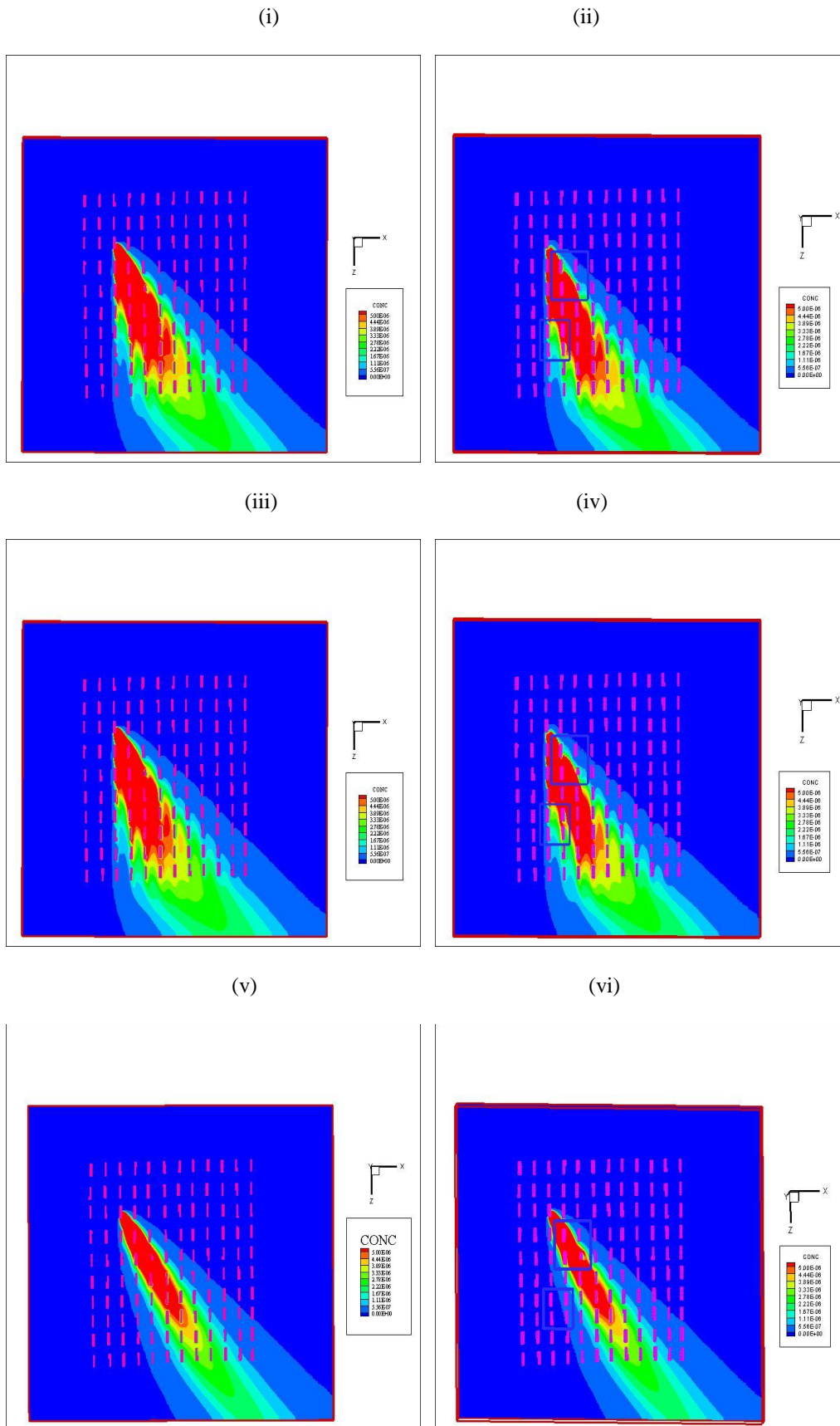


Σχήμα 4.14.: Απεικόνιση κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm) για μοντέλα τύρβης k- ϵ , MMK k- ϵ , για γωνία ανέμου - 48⁰, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, για αριθμό Sc=0.9, με/χωρίς τοπική πυκνωση (No MLR- MLR), στο Tower C.



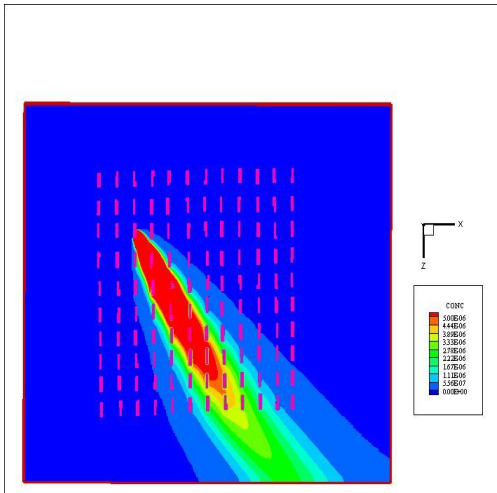
Σχήμα 4.15.: Απεικόνιση κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm) για μοντέλα τύρβης $k-\omega$, SST $k-\omega$ & ENH-WF, για γωνία ανέμου -48° , χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, για αριθμό $Sc=0.9$, με/χωρίς τοπική πυκνωση (No MLR- MLR), στο Tower C.

Παρατηρώντας τα διαγράμματα των κατακόρυφων μέσων τιμών των συγκεντρώσεων παρατηρούνται τα εξής: κατά γενική ομολογία, σε όλες τις θέσεις των σημείων καταγραφής των συγκεντρώσεων το μοντέλο τύρβης $k-\omega$ (με πορτοκαλί χρωματισμό) καταφέρνει να προσομοιώσει περισσότερο ικανοποιητικά την τυρβώδη κινητική ενέργεια και να υπολογίζει μέσες τιμές συγκεντρώσεων κοντινές στις πειραματικές. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αποτελέσματα στον πύργο B (Tower B), όπου παρατηρούνται τα μοντέλα τύρβης της ευρύτερης «οικογένειας» $k-\omega$ δηλαδή $k-\omega$ και SST $k-\omega$ (με πορτοκαλί και πράσινο χρώμα) αποκτούν σχήμα που ακολουθεί πιστά τη συμπεριφορά των πειραματικών συγκεντρώσεων και μάλιστα σε μια θέση η οποία είναι η πλησιέστερη στο σημείο εκπομπής. Αυτό συμβαίνει διότι τα μοντέλα τύρβης $k-\epsilon$, MMK $k-\epsilon$, υποεκτιμούν την τύρβη, ο ρύπος δεν διαχέεται γρήγορα και οι συγκεντρώσεις κοντά στον κεντρικό άξονα του πλουμίου προκύπτουν εν γένει υπερδιπλάσιες απ' αυτές του πειράματος. Αυτό καταγράφεται και στην εν λόγω περίπτωση και συμπεραίνεται από τις ισούψεις καμπύλες της τυρβώδους κινητικής ενέργειας που παρατίθενται κάτωθεν, για κάθε μοντέλο τύρβης. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι το μοντέλο τύρβης $k-\omega$ δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για ατμοσφαιρική ροή διότι βιβλιογραφικά οι περιπτώσεις χρήσης του είναι περιορισμένες. Προτιμώνται μοντέλα της «οικογένειας» $k-\epsilon$, που έχουν ευκολότερη και πιο ευρεία εφαρμογή. Τέλος, σχετικά με το μεταβολή του αριθμητικού σχήματος, παρατηρείται ότι σε περιοχές όπως οι MT, TB, TD το υβριδικό σχήμα αποδίδει καλύτερα ενώ στον TC πύργο το σχήμα BSOU. Συνεπάγεται λοιπόν, ότι η μεταβολή του αριθμητικού σχήματος δεν μπορεί να οδηγήσει σε σαφή υπεροχή του ενός έναντι του άλλου.

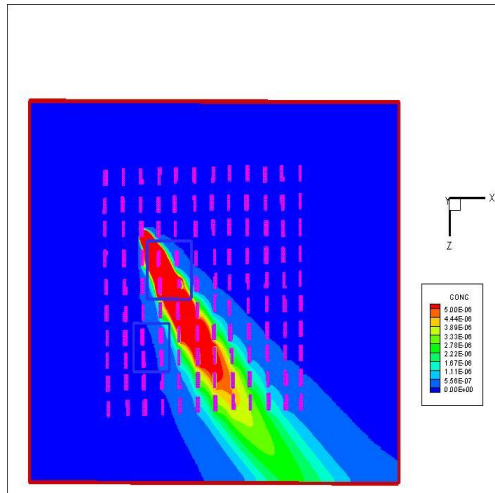


Σχήμα 4.16.: Ισοϋψείς μέσης αδιάστατης συγκέντρωσης Conc σε xz-plane, γωνία ανέμου $\varphi = -48^\circ$, αριθμητικό σχήμα Hybrid, για μοντέλα τύρβης : i) k-ε, No MLR, ii) k-ε, MLR, iii) MMK k-ε, No MLR, iv) MMK k-ε, MLR, v) k-ω, No MLR, vi) k-ω, MLR.

(vii)

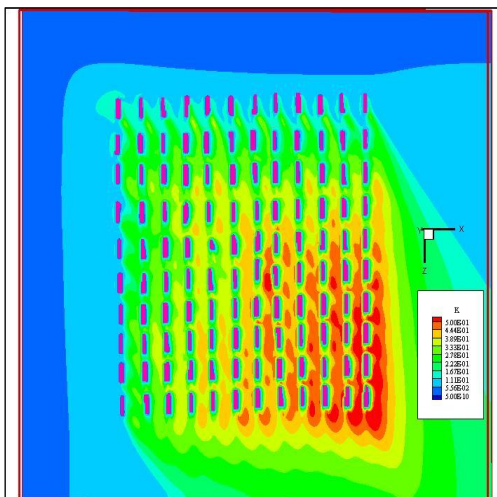


(viii)

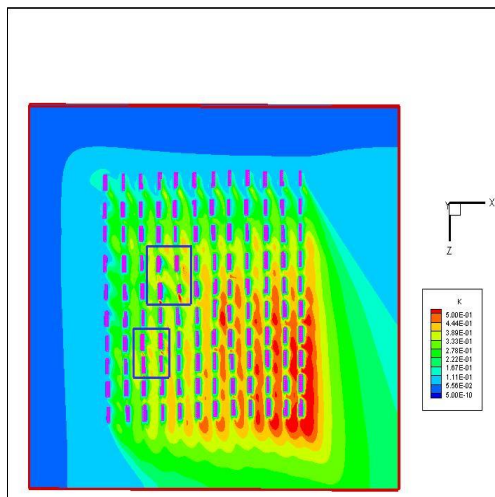


Σχήμα 4.17.: Ισοϋψείς μέσης αδιάστατης συγκέντρωσης Conc σε xz-plane, γωνία ανέμου $\varphi = -48^\circ$, αριθμητικό σχήμα Hybrid, για μοντέλα τύρβης : vii) SST k- ω , No MLR viii) SST k- ω , MLR.

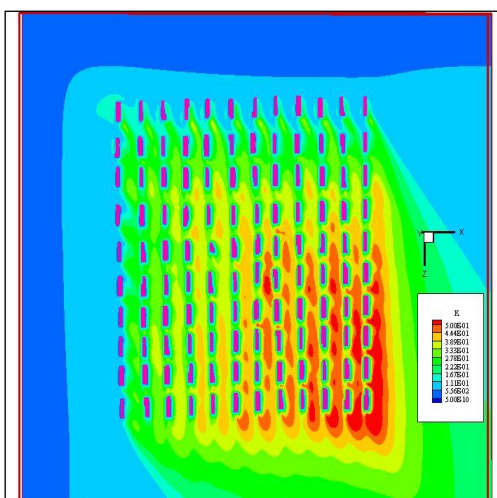
ix)



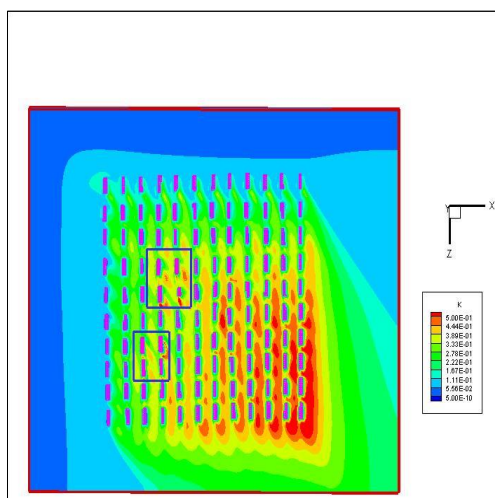
x)

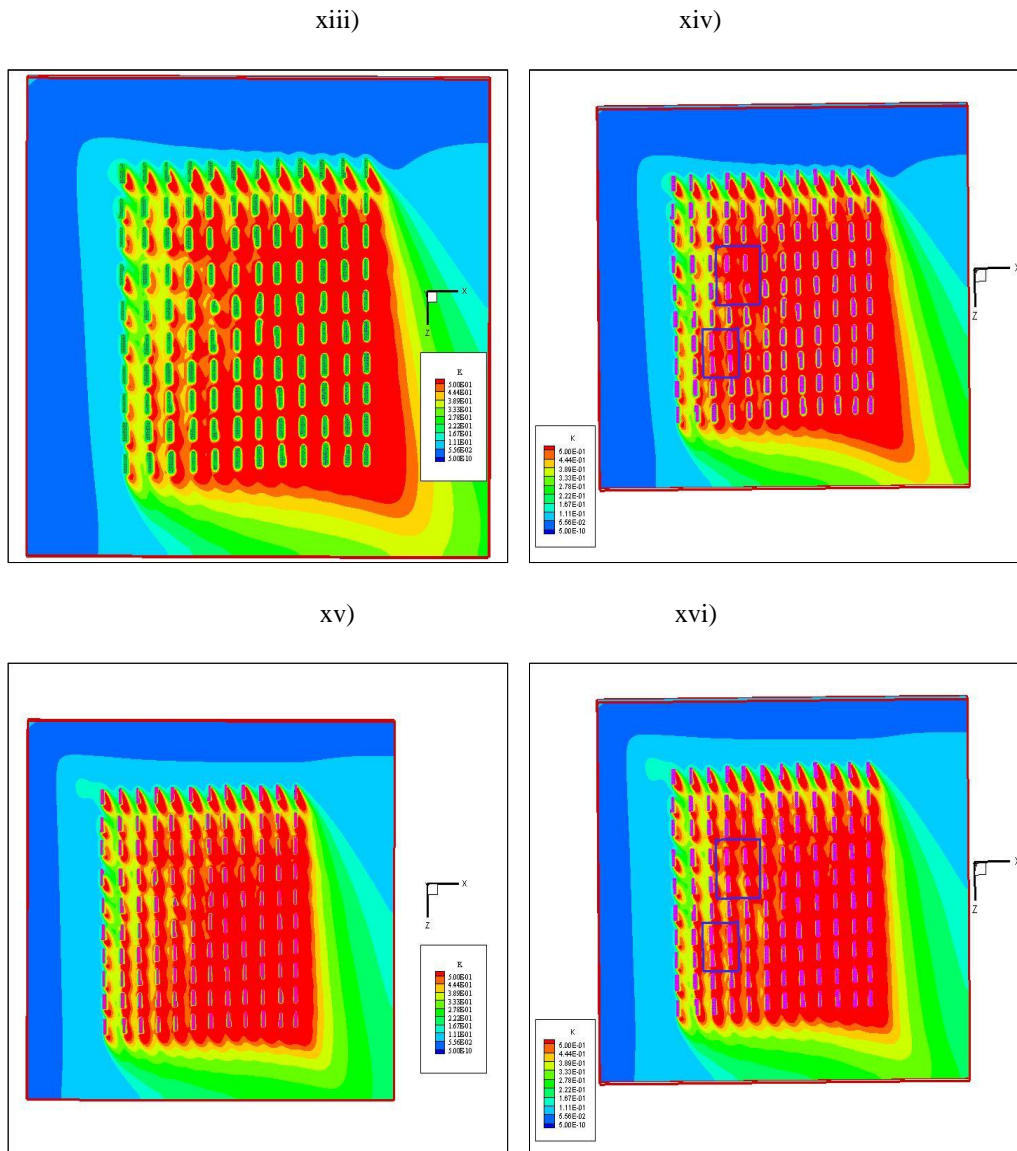


xi)



xii)





Σχήμα 4.18.: Ισοϋψείς μέσες TKE, σε $z/h=0.63$, γωνία ανέμου $\varphi = -48^\circ$, αριθμητικό σχήμα Hybrid, για μοντέλα τύρβης : ix) k- ϵ , No MLR, x) k- ϵ , MLR xi) MMK k- ϵ , No MLR, xii) MMK k- ϵ , MLR xiii) k- ω , No MLR xiv) k- ω , MLR, xv) SST k- ω , No MLR xvi) SST k- ω , MLR

4.5 Παραμετρική ανάλυση του μοντέλου τύρβης k- ω , για διαφορετικούς αριθμούς Schmidt

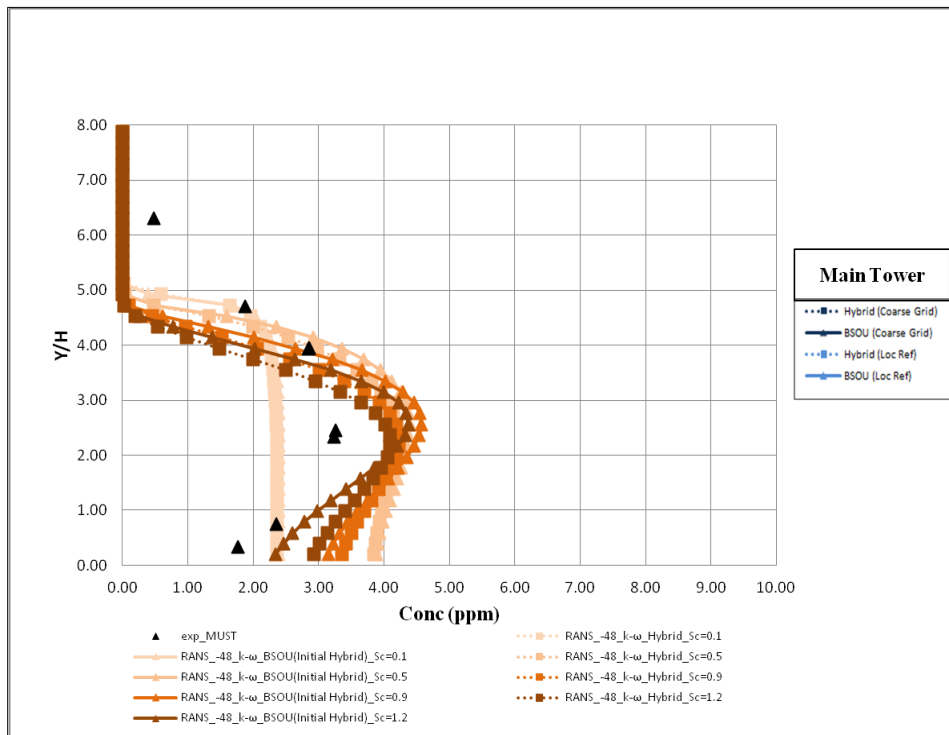
Στην παρούσα εργασία η οποία εστιάζει το ενδιαφέρον της στην ποσοτικοποίηση της διασποράς του ρύπου μέσω του υπολογισμού των μέσων συγκεντρώσεων του και λαμβάνοντας υπ' όψιν την προς επίλυση εξίσωση της συγκέντρωσης, συμπεραίνεται ότι ο τυρβώδης αριθμός Schmidt επηρεάζει κατά μεγάλο βαθμό την διάχυση του ρύπου. Εγείρεται λοιπόν το ερώτημα του ποια τιμή θα πρέπει να έχει ο τυρβώδης αριθμός Schmidt. Με βάση την προσωπική βιβλιογραφική αναζήτηση, οι ερευνητές Tominaga & Stathopoulos με άρθρο τους το 2007, υποδεικνύουν ότι ο τυρβώδης αριθμός Schmidt μπορεί να λάβει ένα εύρος τιμών, κυμαινόμενο από 0.1 έως 1.3, ανάλογα με τη περίπτωση και τη γεωμετρία του προς επίλυση προβλήματος. Επίσης

παλαιότερη πειραματική μελέτη πραγματοποιούμενη από τον Koeltzsch, καταγράφει ότι ο αριθμός Schmidt δεν είναι σταθερός αλλά κυμαίνεται μεταξύ 0.3 και 1.0. Εν τέλει, οι ερευνητές Tominaga & Stathopoulos με νέο άρθρο τείνουν να θεωρούν την τιμή 0.9 ως την καλύτερη τιμή τυρβώδους αριθμού Schmidt σε εφαρμογές προβλημάτων που απαιτείται μια σταθερή τιμή τυρβώδους αριθμού Schmidt. Στην τελευταία πρόταση βασίστηκε και η προσομοίωση της παρούσας εργασίας, θέτοντας τον τυρβώδη αριθμό Schmidt ίσο με 0.9 για όλα τα «τρεξίματα» με τα διαφορετικά μοντέλα τύρβης και αριθμητικά σχήματα που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.1. Ωστόσο εξαιτίας του μεγάλου εύρους τιμών του τυρβώδους αριθμού Schmidt, πραγματοποιήθηκε μια ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης στον αριθμό Schmidt. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιήθηκε μόνο για το μοντέλο τύρβης δηλαδή το μοντέλο k- ω , όπως προέκυψε από τη συγκριτική μελέτη της ενότητας 4.1. Οι αριθμοί Schmidt για τους οποίους έγιναν οι προσομοιώσεις ήταν οι εξής:

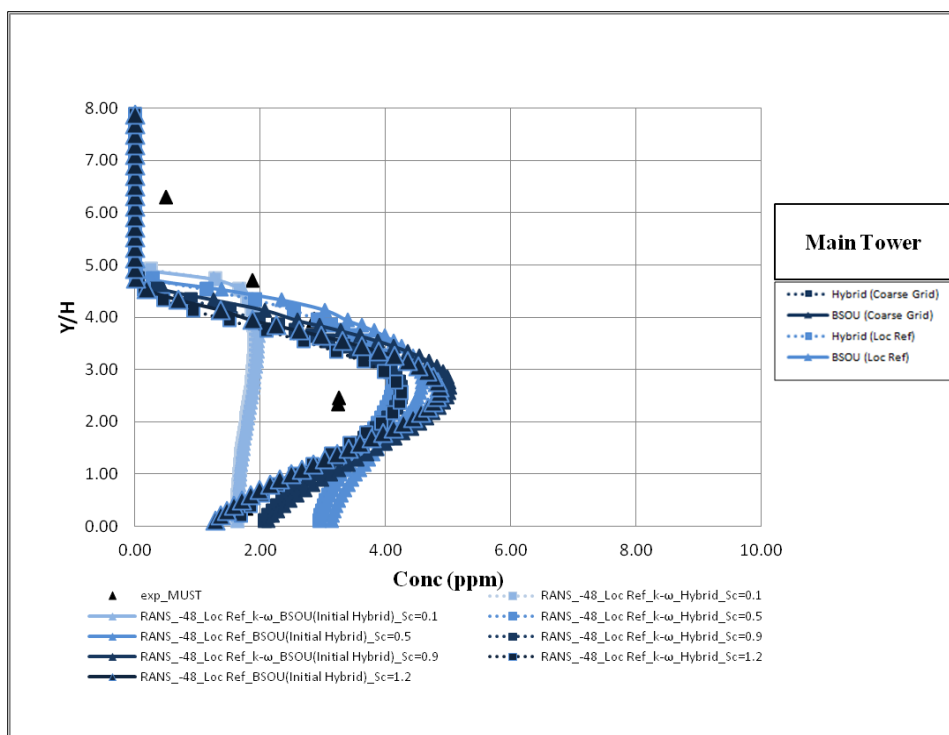
Αριθμός Schmidt
0.1
0.5
0.9
1.2

Στη συνέχεια παρατίθενται τα κατακόρυφα προφίλ συγκεντρώσεων Conc (ppm) και οι ισοϋψείς της μέσης αδιάστατης συγκέντρωσης Conc, στους 4 πύργους μέτρησης της συγκέντρωσης Main Tower, Tower B, Tower D & Tower C και αναλύονται τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων.

- **Main Tower**

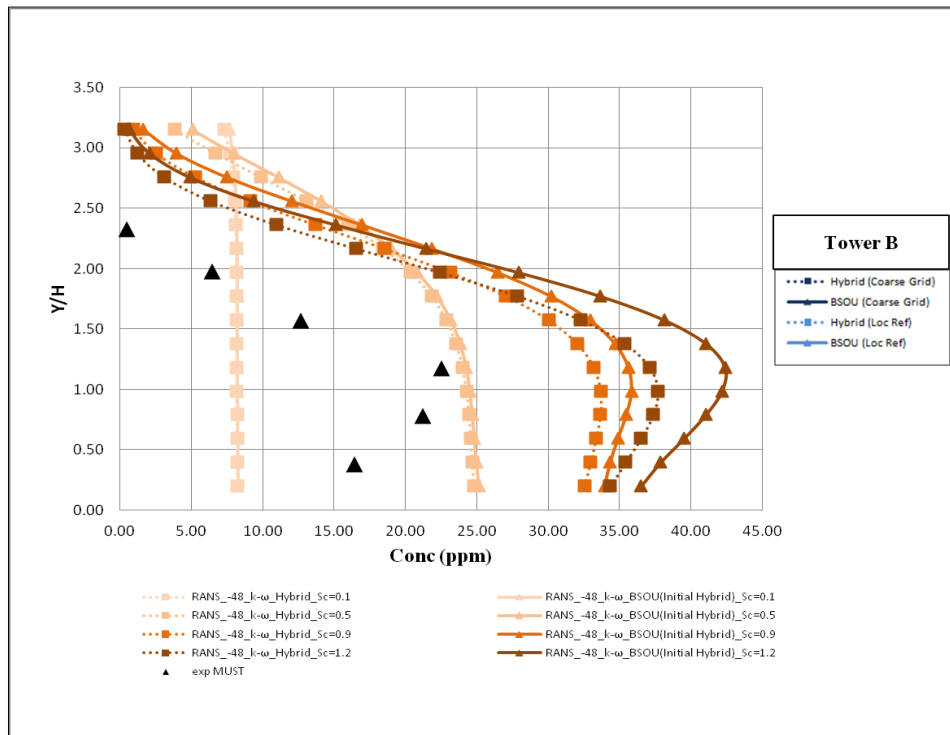


Σχήμα 4.19.: Απεικόνιση κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm) , xz-plane, για μοντέλο τύρβης k- ω , με γωνία ανέμου $\phi = -48^0$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, για αριθμούς $Sc=0.1\# Sc=0.5\# Sc=0.9\# Sc=1.2$, χωρίς τοπική πύκνωση, στο Main Tower.

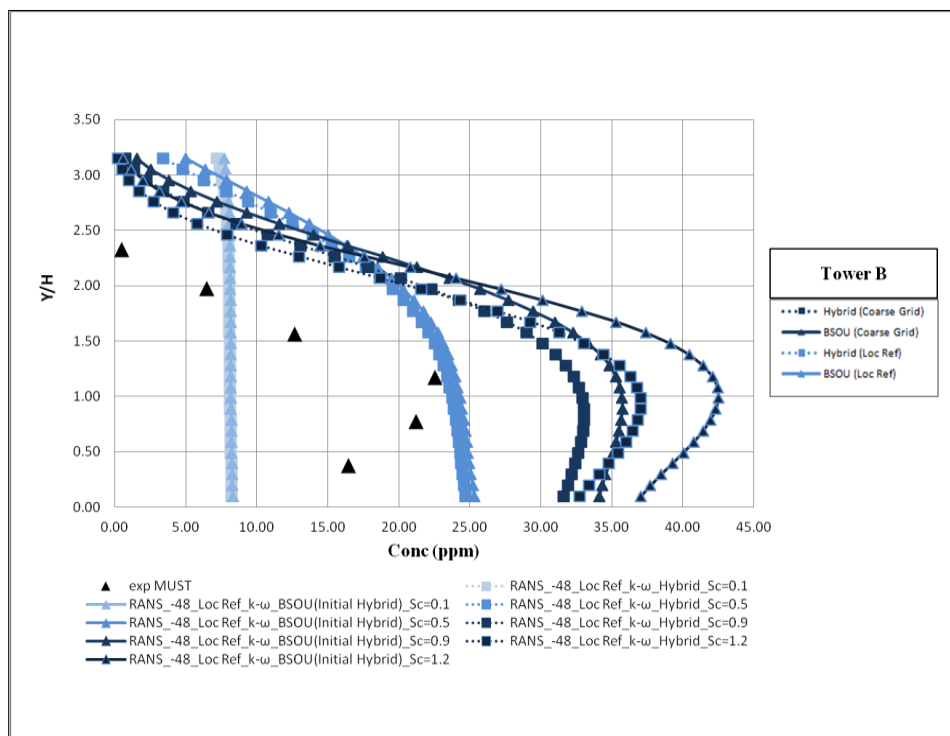


Σχήμα 4.20.: Απεικόνιση κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm) , xz-plane, για μοντέλο τύρβης k- ω , με γωνία ανέμου $\phi = -48^0$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, για αριθμούς $Sc=0.1\# Sc=0.5\# Sc=0.9\# Sc=1.2$, με τοπική πύκνωση, στο Main Tower.

▪ Tower B

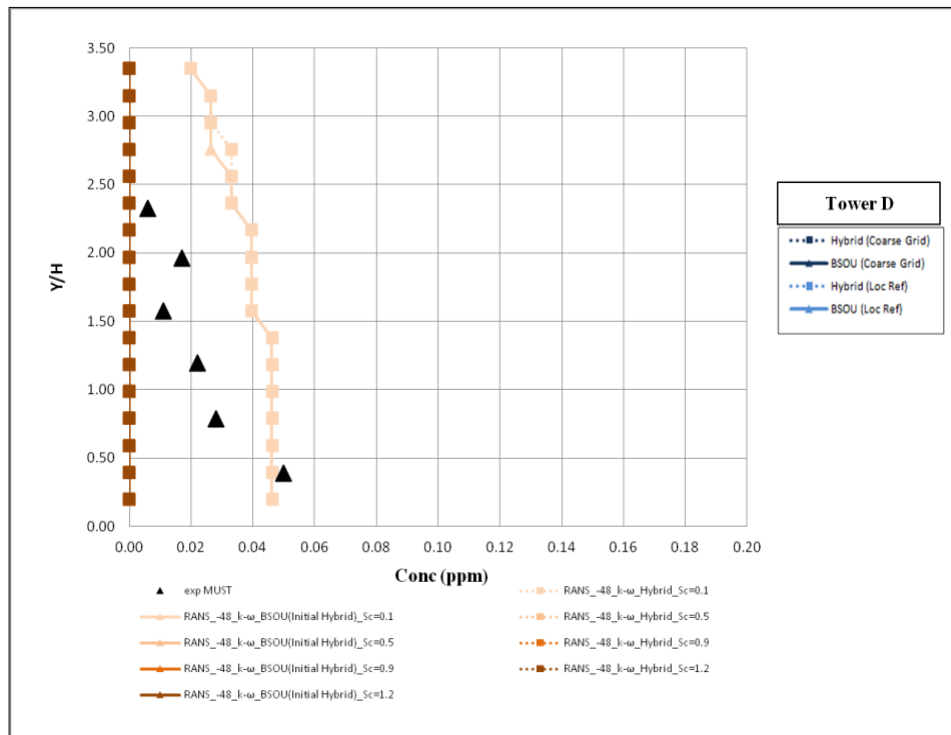


Σχήμα 4.21.: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm), xz-plane, για μοντέλο τύρβης k- ω , με γωνία ανέμου $\varphi = -48^\circ$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, για αριθμούς $Sc=0.1\#Sc=0.5\#Sc=0.9\#Sc=1.2$, με τοπική πύκνωση, στο Tower B.

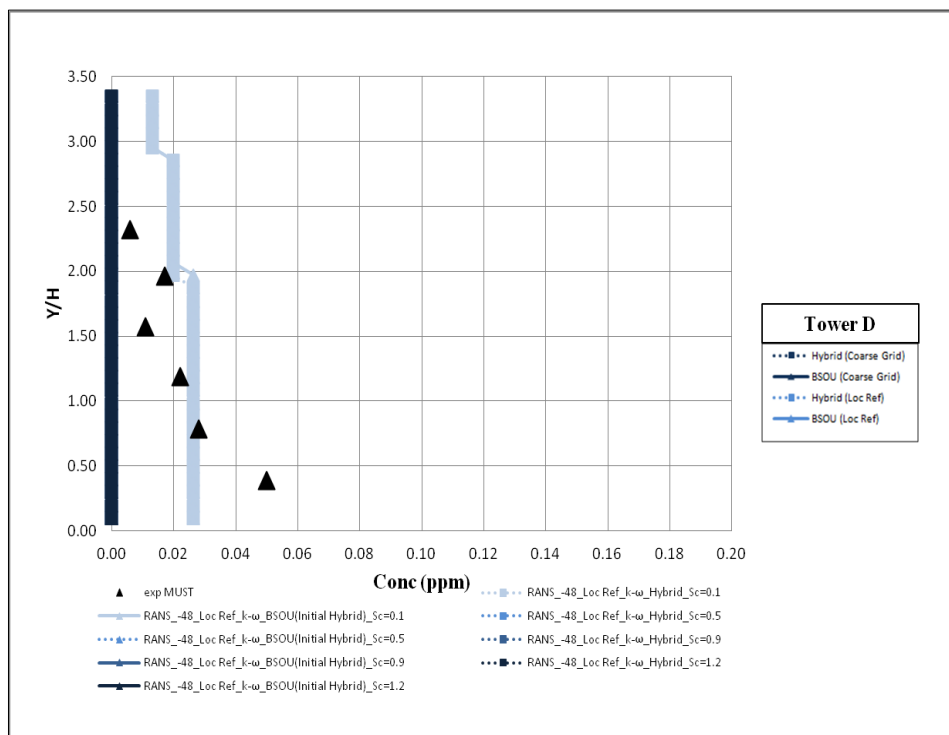


Σχήμα 4.22.: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm), xz-plane, για μοντέλο τύρβης k- ω , με γωνία ανέμου $\varphi = -48^\circ$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, για αριθμούς $Sc=0.1\#Sc=0.5\#Sc=0.9\#Sc=1.2$, με τοπική πύκνωση, στο Tower B.

▪ Tower D

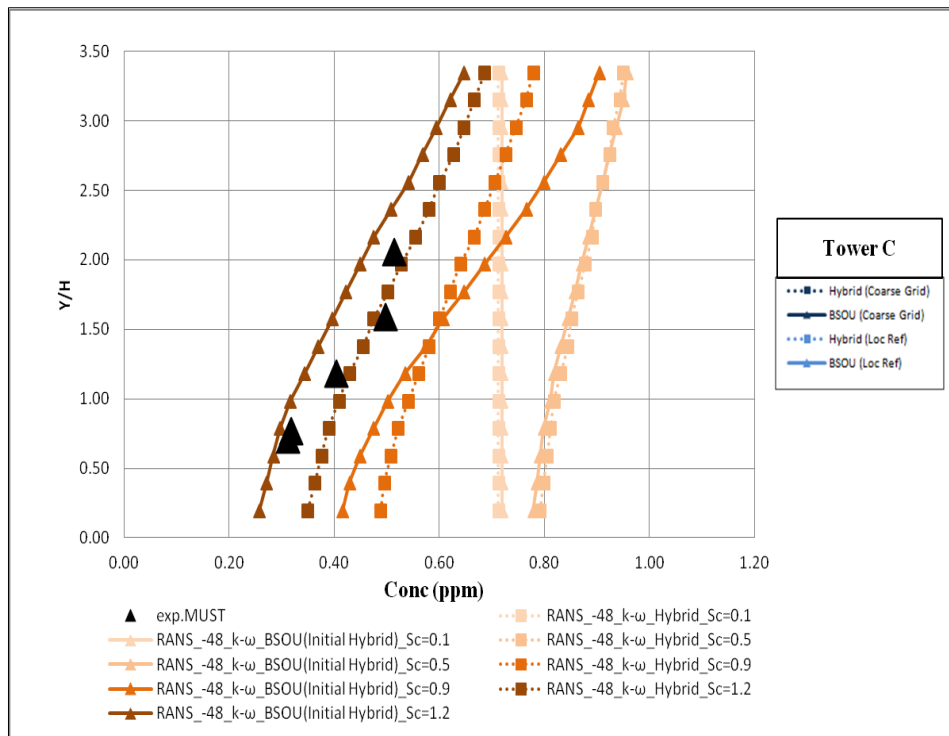


Σχήμα 4.23.: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης $Conc$ (ppm), xz -plane, για μοντέλο τύρβης $k-\omega$, με γωνία ανέμου $\phi = -48^\circ$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, για αριθμούς $Sc=0.1\#Sc=0.5\#Sc=0.9\#Sc=1.2$, χωρίς τοπική πυκνωση, στο Tower D.

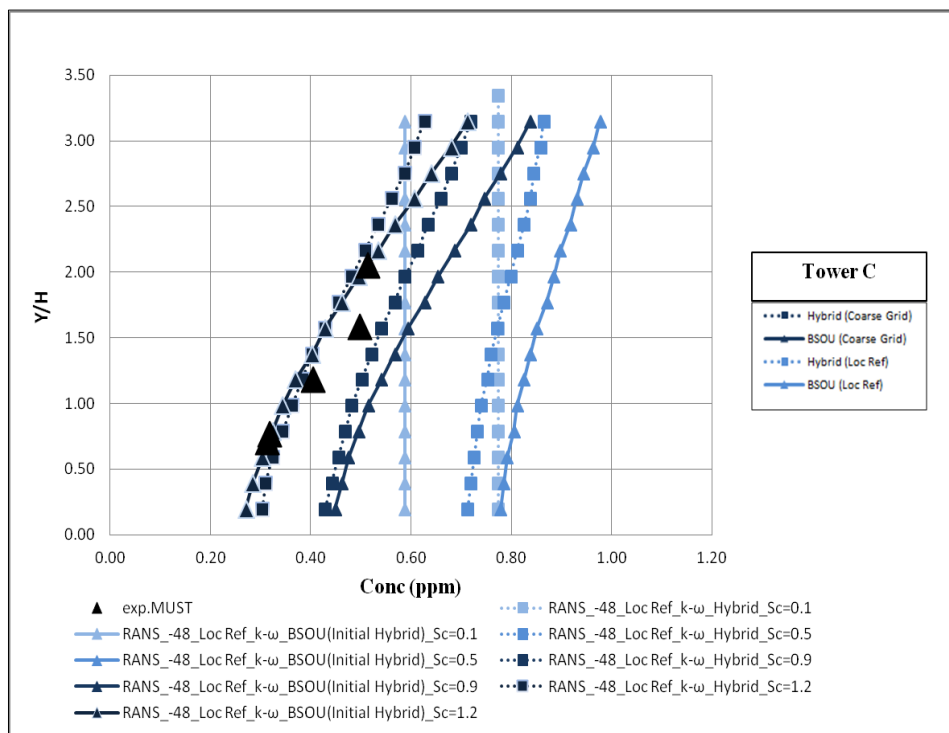


Σχήμα 4.24.: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης $Conc$ (ppm), xz -plane, για μοντέλο τύρβης $k-\omega$, με γωνία ανέμου $\phi = -48^\circ$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, για αριθμούς $Sc=0.1\#Sc=0.5\#Sc=0.9\#Sc=1.2$, με τοπική πυκνωση, στο Tower D.

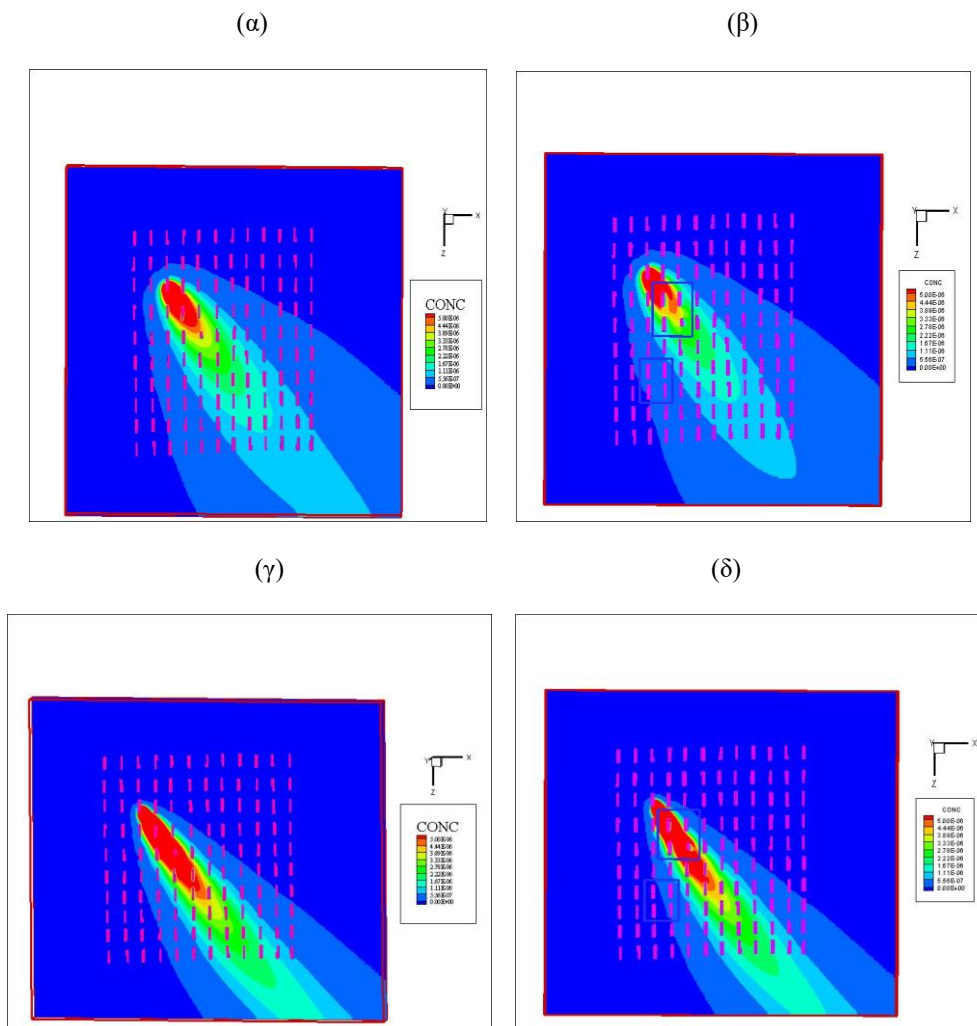
▪ Tower C



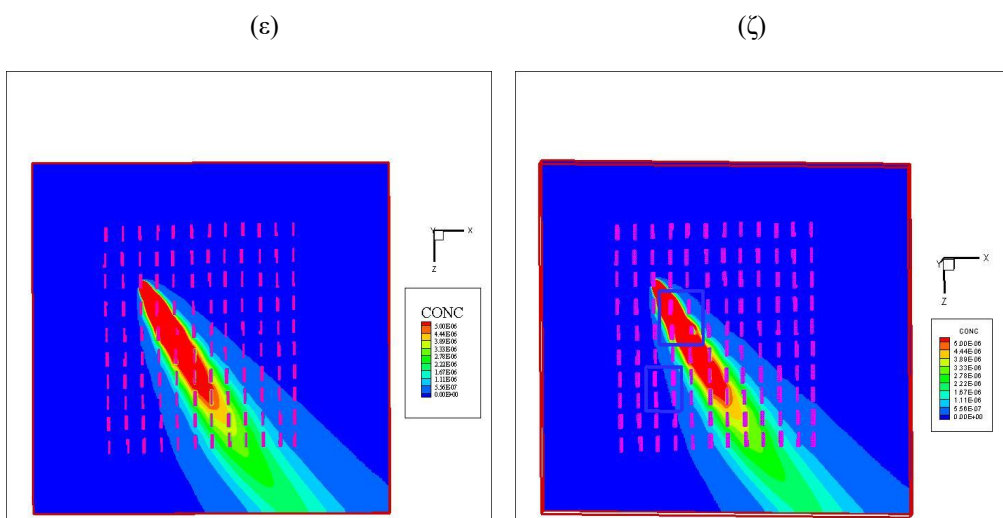
Σχήμα 4.25.: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm) , xz-plane, για μοντέλο τύρβης k-ω, με γωνία ανέμου $\varphi = -48^\circ$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, για αριθμούς $Sc=0.1\#Sc=0.5\#Sc=0.9\#Sc=1.2$, χωρίς τοπική πύκνωση, στο Tower C.

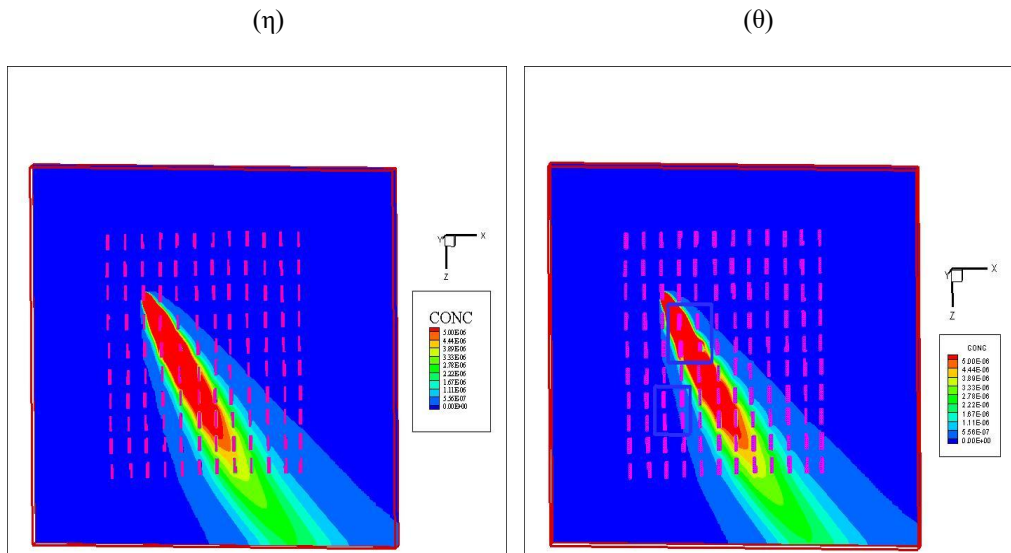


Σχήμα 4.26.: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm) , xz-plane, για μοντέλο τύρβης k-ω, με γωνία ανέμου $\varphi = -48^\circ$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, για αριθμούς $Sc=0.1\#Sc=0.5\#Sc=0.9\#Sc=1.2$, με τοπική πύκνωση, στο Tower C.



Σχήμα 4.27.: Ισοϋψείς μέσης αδιάστατης συγκέντρωσης Conc για μοντέλο τύρβης $k-\omega$, xz -plane, γωνία ανέμου $\varphi = -48^\circ$, αριθμητικό σχήμα Hybrid για : α) $Sc=0.1$, No MLR, β) $Sc=0.1$, MLR, γ) $Sc=0.5$, No MLR, δ) $Sc=0.5$, MLR.





Σχήμα 4.28.: Ισοϋψείς μέσης αδιάστατης συγκέντρωσης Conc για μοντέλο τύρβης k- ω , xz-plane, γωνία ανέμου $\varphi = -48^\circ$, αριθμητικό σχήμα Hybrid για : ε) Sc=0.9, No MLR, ζ) Sc=0.9,MLR η) Sc=1.2, No MLR, θ) Sc=1.2,MLR.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα διαγράμματα των κατακόρυφων συγκεντρώσεων καθώς επίσης και τους πίνακες των σφαλμάτων για κάθε πύργο, συμπεραίνεται ότι ο αριθμός Schmidt με τιμή 0.9, σε συνδυασμό με υβριδικό αριθμητικό σχήμα, έχοντας είτε αραιό πλέγμα είτε πλέγμα με ενσωματωμένη την μέθοδο τοπικής πύκνωσης δίνει το μικρότερο σφάλμα στον Main Tower. Όσον αφορά τον Tower D, παρατηρείται ότι για τυρβώδεις αριθμούς Schmidt μεγαλύτερους από 0.5, η τιμή της υπολογιζόμενης συγκέντρωσης είναι μηδενική κάτι που προκύπτει και από τα σχήματα των ισοϋψών καμπύλων της συγκέντρωσης αλλά και από τα διαγράμματα των κατακόρυφων τιμών της συγκέντρωσης. Συμπεραίνεται ότι στον πύργο D η συγκέντρωση υποεκτιμάται συγκριτικά με τις πειραματικά μετρούμενες τιμές της ενώ στις υπόλοιπες περιπτώσεις που αφορούν τα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων από κάθε πύργο, η συγκέντρωση υπερεκτιμάται άλλοτε σε σημαντικό βαθμό και άλλοτε όχι. Γενικότερα, κρίνοντας την ανάλυση ευαισθησίας της προσομοίωσής μας ως προς τον τυρβώδη αριθμό Schmidt θα μπορούσε να εξαχθεί το εξής συμπέρασμα: για την καλύτερη προσομοίωση του εν λόγω φυσικού προβλήματος, εφαρμόζοντας μοντέλο τύρβης k- ω , θα μπορούσε να προτιμηθεί τυρβώδης αριθμός Schmidt μεγαλύτερος του 0.9, όπως η τιμή 1.2, η οποία τιμή έδωσε καλύτερα αποτελέσματα σε δύο θέσεις μετρούμενων συγκεντρώσεων (Tower B & Tower C). Να επισημανθεί ότι η έννοια καλύτερα αποτελέσματα σημαίνει υπολογισμός μέσω τιμών συγκεντρώσεων πιο κοντινών στις αντίστοιχες μέσες πειραματικές συγκεντρώσεις.

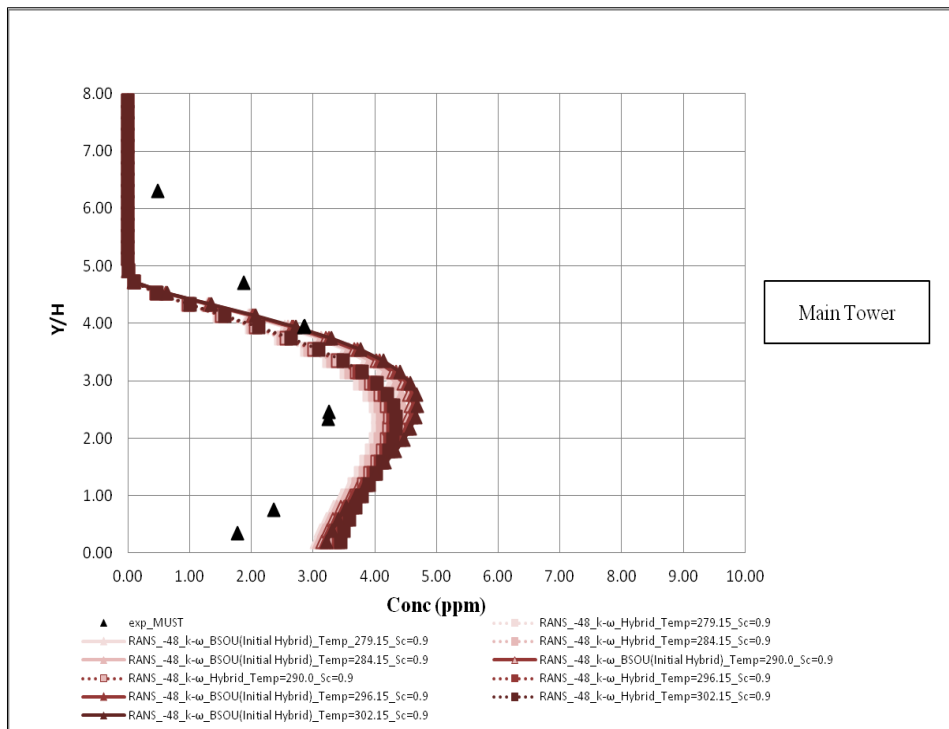
4.6 Παραμετρική ανάλυση του μοντέλου τύρβης k- ω , για διαφορετικές θερμοκρασίες εύρους 1^oC έως 29^oC [274.15K - 302.15K]

Στην ενότητα παρουσιάζεται η παραμετρική ανάλυση που έγινε για την θερμοκρασία του αέρα. Σύμφωνα με τους Yee, E., Biltoft, C.A., (2004), η δοκιμή 16 που επιλέχθηκε για προσομοίωση έλαβε χώρα το βράδυ σε μέση θερμοκρασία T =290K (17^o C). Αποφασίστηκε να εξεταστεί τι επιρροή θα είχε στη διασπορά του ρύπου μια μεταβολή της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος είτε αυτό σήμαινε αύξηση της θερμοκρασίας είτε μείωση αυτής. Επιλέχθηκε λοιπόν ένα εύρος θερμοκρασιών από 1^o C έως 29^o C, όπου στο επιλεγθέν διάστημα υπολογίστηκαν μέσω γραμμικών παρεμβολών και προεκβολών οι φυσικές παράμετροι του αέρα που επηρεάζονταν από τη θερμοκρασία και μετέχουν στην υπολογιστική προσομοίωση. Τέτοιες είναι η πυκνότητα του αέρα (kg m^{-3}), η ειδική θερμότητα c_p ($10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), η δυναμική συνεκτικότητα μ ($10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$), ο αριθμός Prandtl. Οι υπολογιζόμενες τιμές των μεγεθών αυτών παρατίθενται στον πίνακα 4.11 καθώς επίσης και τα διαγράμματα των κατακόρυφων προφίλ των μέσων συγκεντρώσεων αλλά και των ισοϋψών καμπύλων των αδιάστατων συγκεντρώσεων, για κάθε τιμή θερμοκρασίας αέρα.

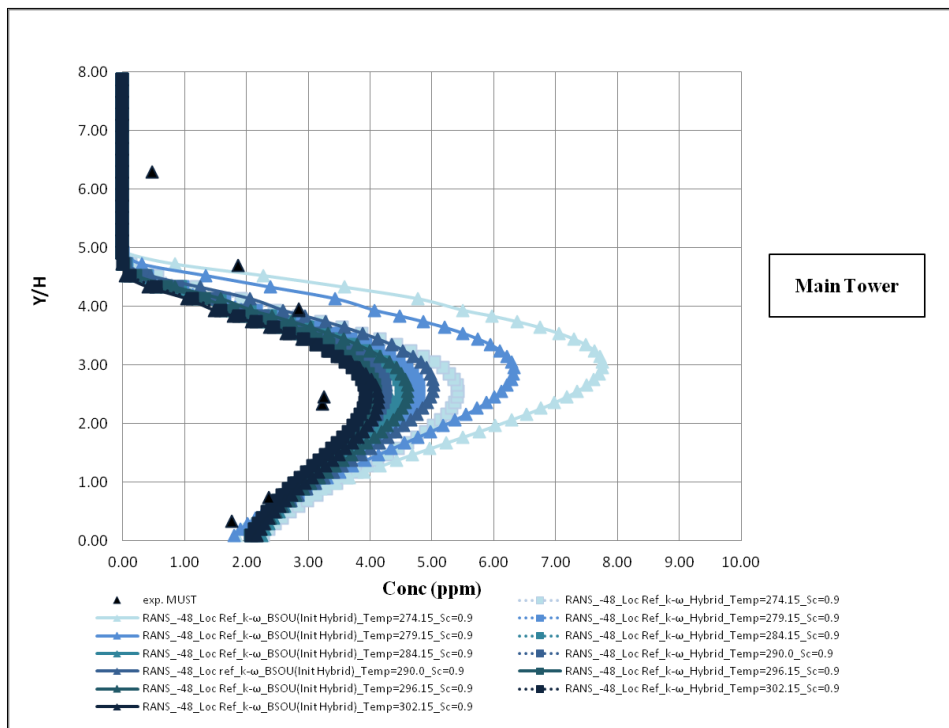
Πίνακας 4.11.: Ιδιότητες του αέρα για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Θερμοκρασία κοντέινερ T (K)	Θερμοκρασία αέρα T (K)	Ειδική θερμότητα c_p ($10^3 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	Δυναμική Συνεκτικότητα μ ($10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$)	Πυκνότητα αέρα (kg m^{-3})	Αριθμός Prandtl
297	274.15	1.0038	1.7186	1.2886	0.7131
297	279.15	1.0040	1.7564	1.2617	0.7130
297	284.15	1.0042	1.7941	1.2349	0.7130
297	290.00	1.0045	1.8383	1.2035	0.7120
297	296.15	1.0047	1.8430	1.1872	0.7089
297	302.15	1.0050	1.8476	1.1713	0.7059

▪ Main Tower

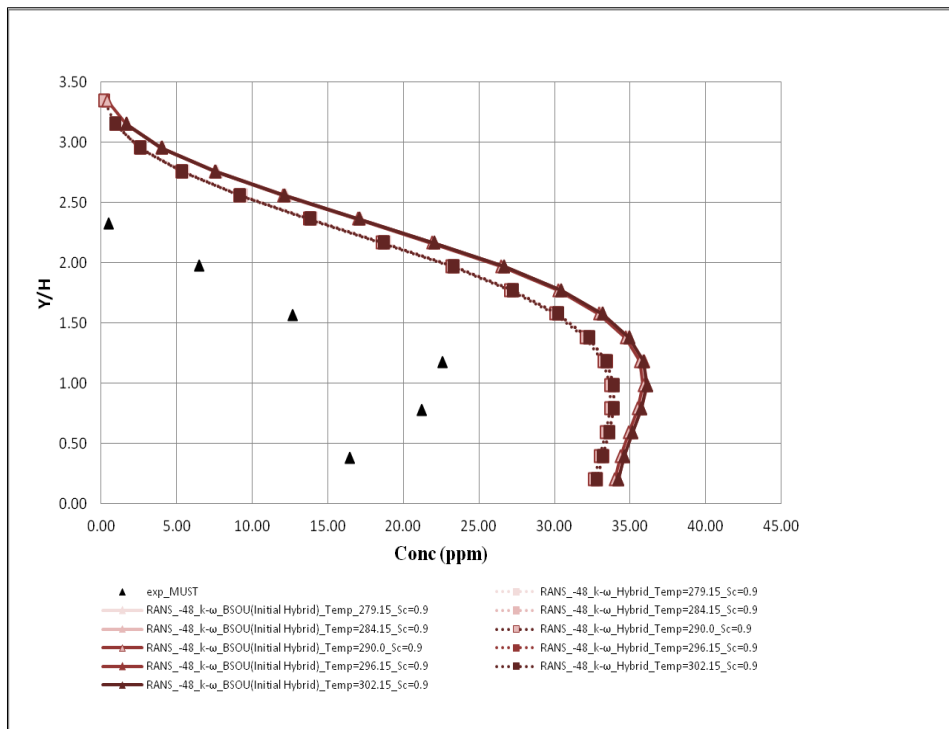


Σχήμα 4.29.: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm) , xz-plane, για μοντέλο τύρβης k- ω , με γωνία ανέμου $\varphi = -48^\circ$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, με $Sc=0.9$, για Temp=274.15K # Temp=279.15K # Temp=284.15K # Temp=290K # Temp=296.15K # Temp=302.15K, No MLR, στο Main Tower.

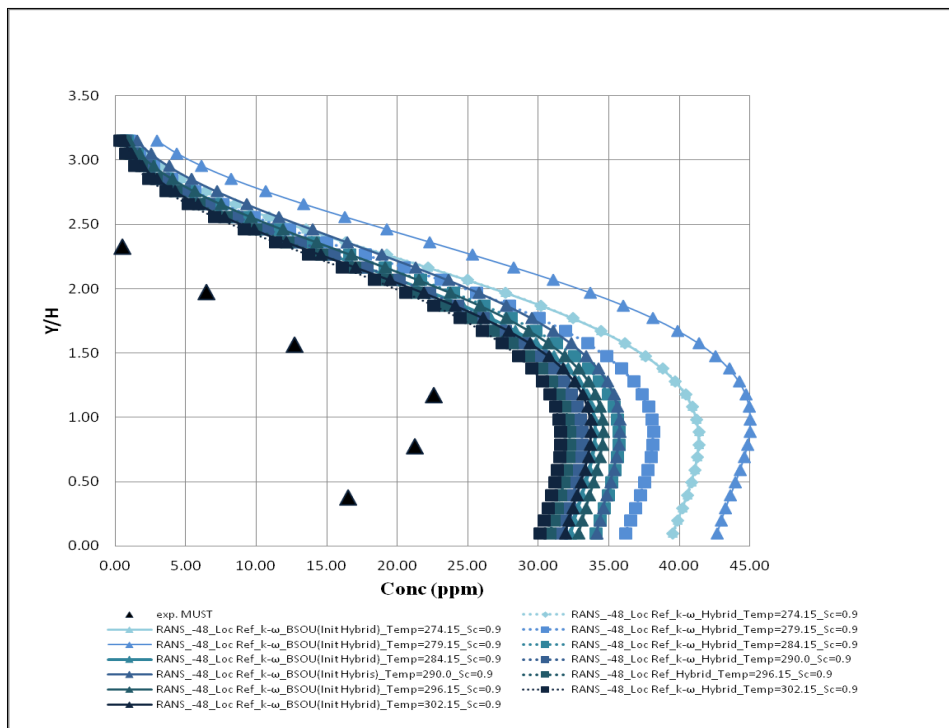


Σχήμα 4.30.: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm) , xz-plane, για μοντέλο τύρβης k- ω , με γωνία ανέμου $\varphi = -48^\circ$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, με $Sc=0.9$, για Temp=274.15K # Temp=279.15K # Temp=284.15K # Temp=290K # Temp=296.15K # Temp=302.15K, MLR, στο Main Tower.

▪ Tower B

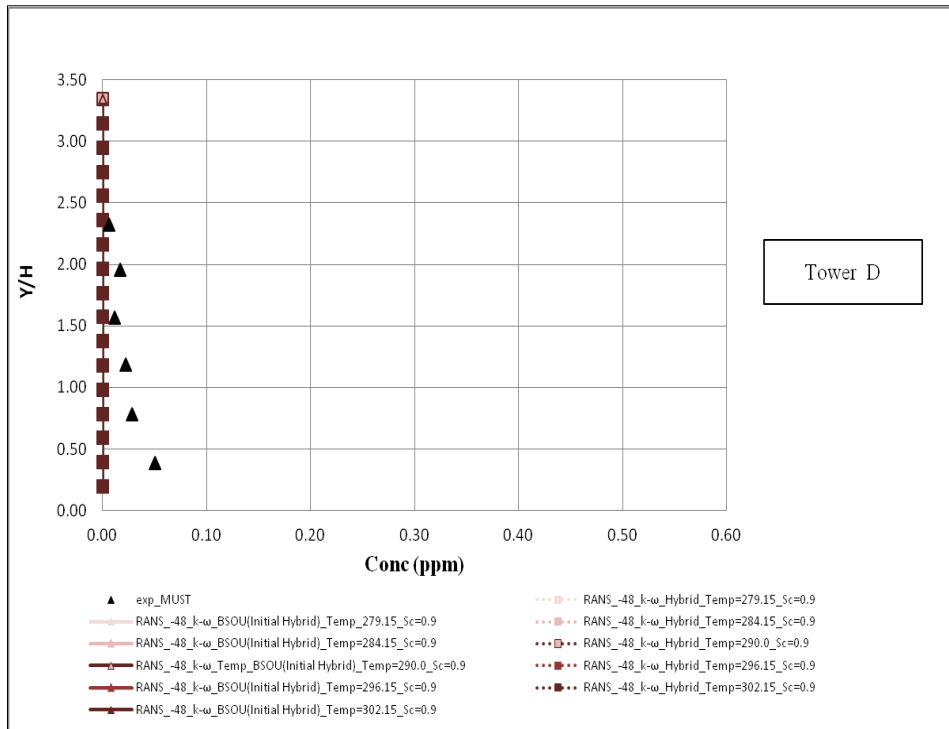


Σχήμα 4.31.: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm) , xz-plane, για μοντέλο τύρβης k-ω, με γωνία ανέμου $\varphi = -48^\circ$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, με $Sc=0.9$, για Temp=274.15K # Temp=279.15K # Temp=284.15K # Temp=290K # Temp=296.15K # Temp=302.15K, No MLR, στο Tower B.

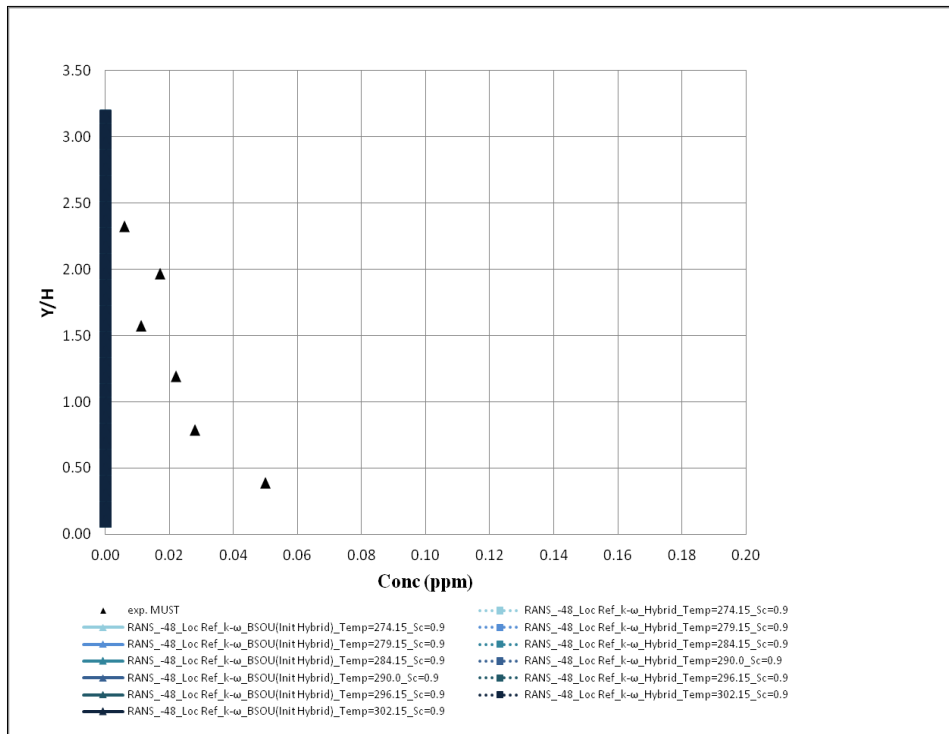


Σχήμα 4.32.: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm) , xz-plane, για μοντέλο τύρβης k-ω, με γωνία ανέμου $\varphi = -48^\circ$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, με $Sc=0.9$, για Temp=274.15K # Temp=279.15K # Temp=284.15K # Temp=290K # Temp=296.15K # Temp=302.15K, MLR, στο Tower B.

▪ Tower D

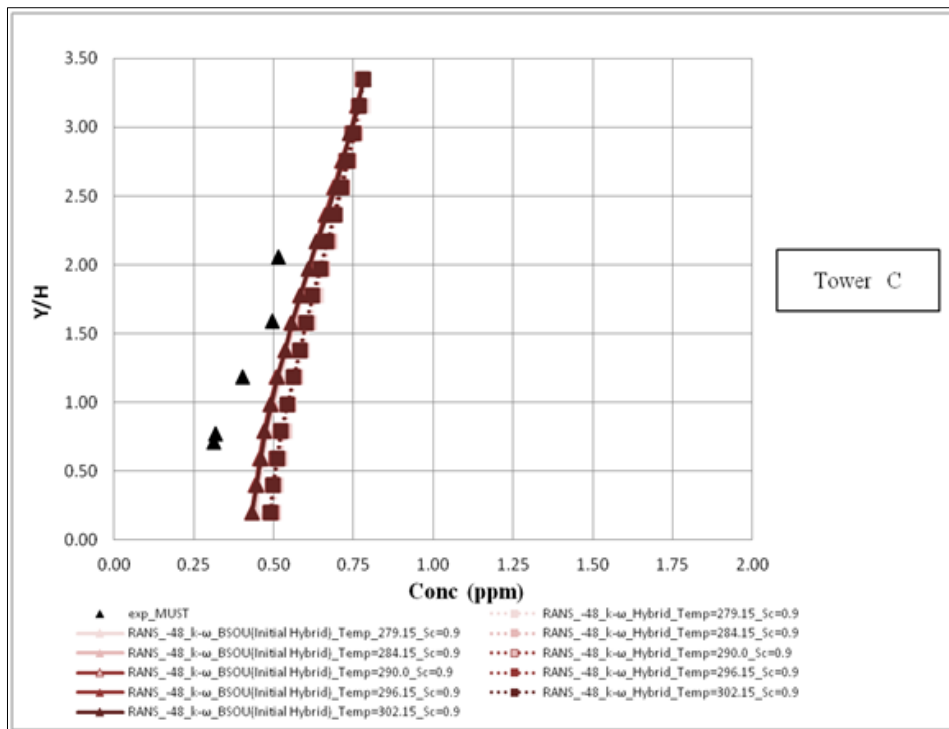


Σχήμα 4.33.: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm) , xz-plane, για μοντέλο τύρβης k- ω , με γωνία ανέμου $\varphi = -48^\circ$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, με $Sc=0.9$, για Temp=274.15K # Temp=279.15K # Temp=284.15K # Temp=290K # Temp=296.15K # Temp=302.15K, No MLR, στο Tower D.

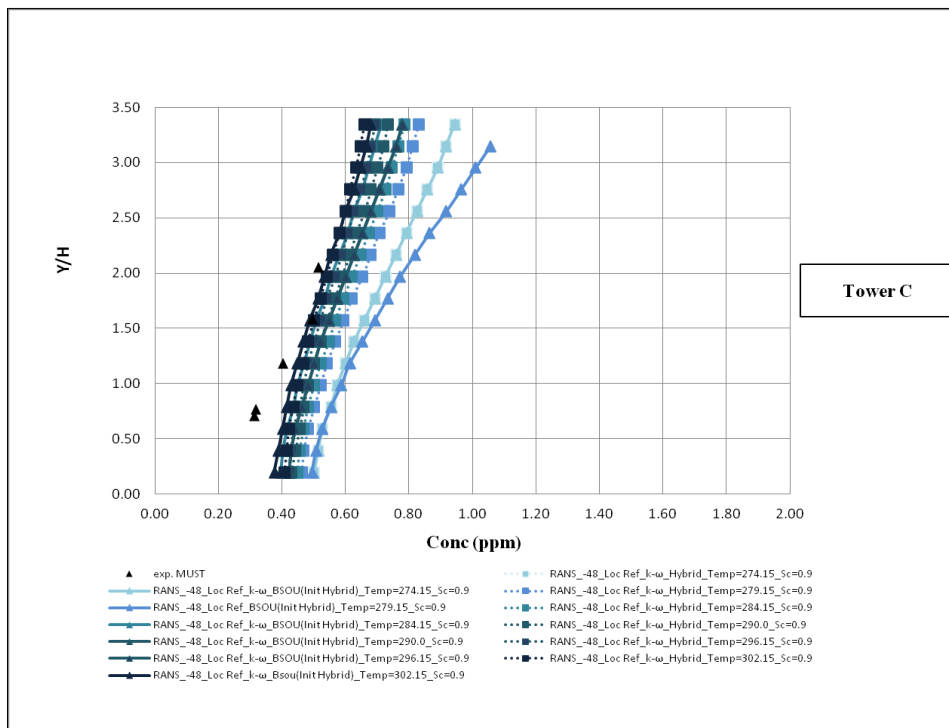


Σχήμα 4.34.: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm) , xz-plane, για μοντέλο τύρβης k- ω , με γωνία ανέμου $\varphi = -48^\circ$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, με $Sc=0.9$, για Temp=274.15K # Temp=279.15K # Temp=284.15K # Temp=290K # Temp=296.15K # Temp=302.15K, MLR, στο Tower D.

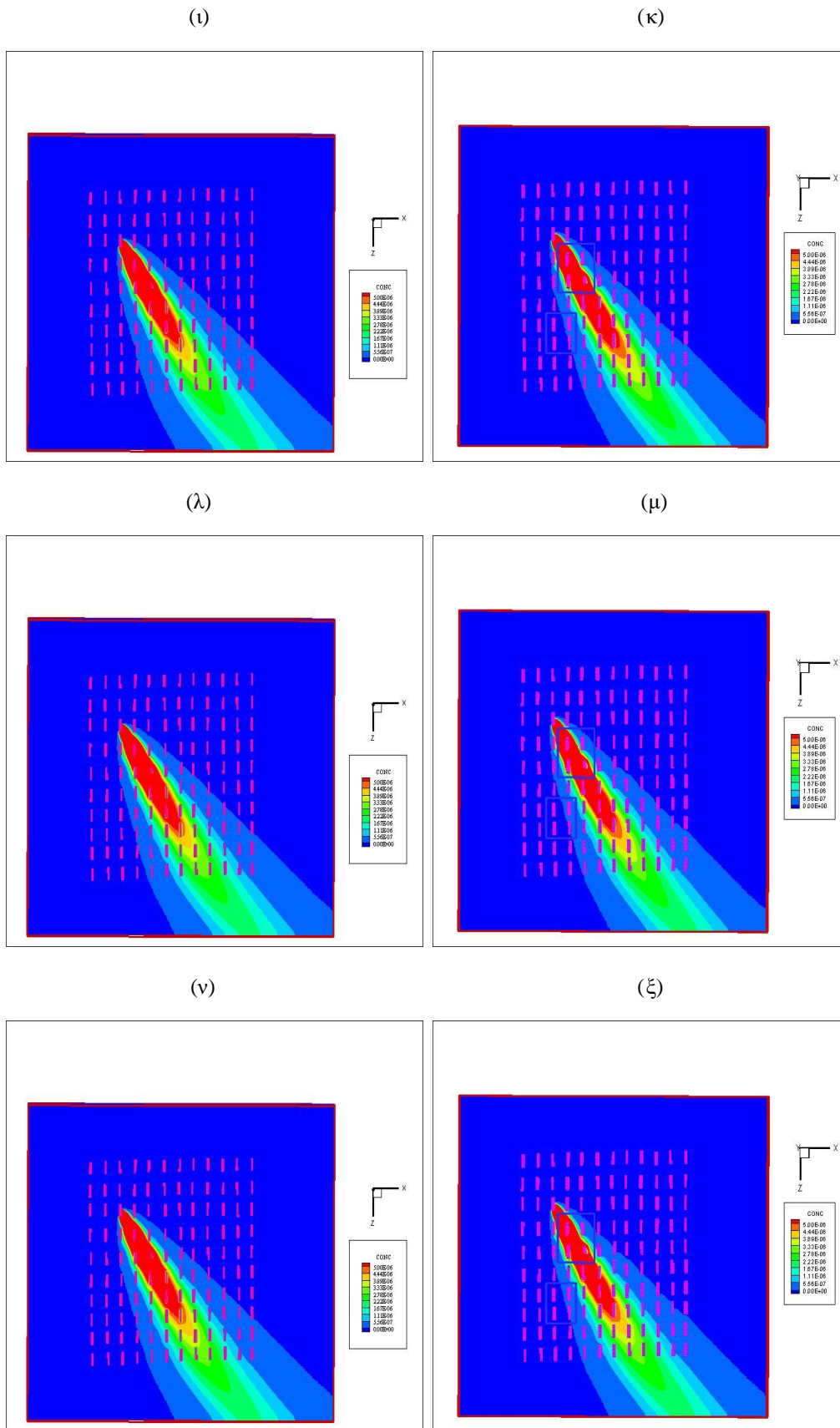
▪ Tower C



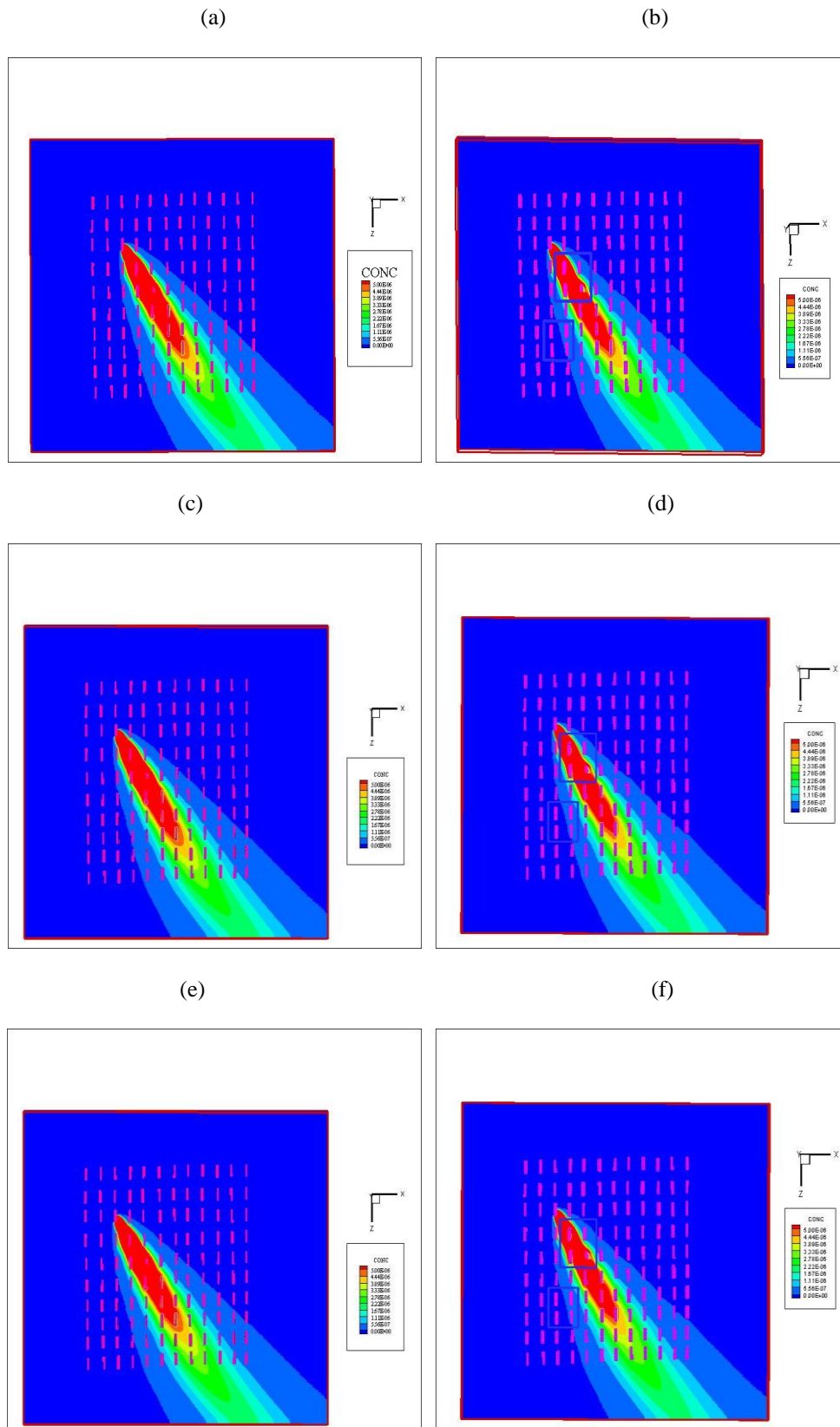
Σχήμα 4.35.: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm) , xz-plane, για μοντέλο τύρβης k-ω, με γωνία ανέμου $\varphi = -48^\circ$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, με $Sc=0.9$, για Temp=274.15K # Temp=279.15K # Temp=284.15K # Temp=290K # Temp=296.15K # Temp=302.15K, No MLR, στο Tower C.



Σχήμα 4.36.: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm) , xz-plane, για μοντέλο τύρβης k-ω, με γωνία ανέμου $\varphi = -48^\circ$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, με $Sc=0.9$, για Temp=274.15K # Temp=279.15K # Temp=284.15K # Temp=290K # Temp=296.15K # Temp=302.15K, MLR, στο Tower C.



Σχήμα 4.37.: Ισοϋψείς μέσης αδιάστατης συγκέντρωσης Conc για μοντέλο τύρβης k- ω , , xz-plane, γωνία ανέμου $\varphi = -48^{\circ}$, αριθμητικό σχήμα Hybrid για : ι) Temp=274.15, No MLR, κ) Temp=274.15, MLR λ) Temp=279.15, No MLR, μ) Temp=279.15, MLR ν)Temp=284.15, No MLR , ξ) Temp=284.15, MLR.



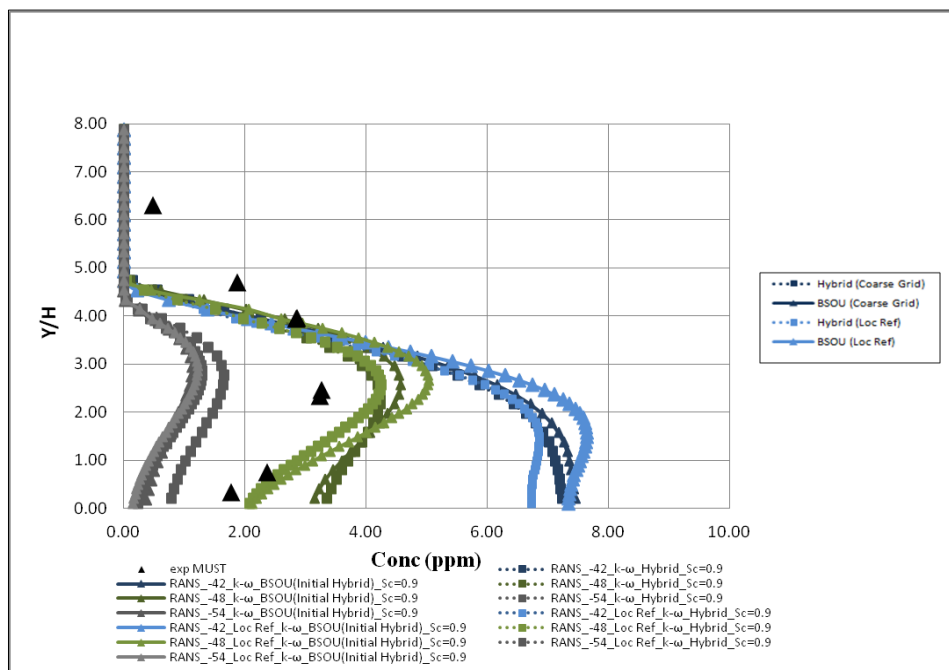
Σχήμα 4.38.: Ισοϋψείς μέσης αδιάστατης συγκέντρωσης Conc για μοντέλο τύρβης $k-\omega$, xz -plane, γωνία ανέμου $\varphi = -48^\circ$, αριθμητικό σχήμα Hybrid για : a) Temp=290K, No MLR, b) Temp=290K MLR, c) Temp=296.15, No MLR, d) Temp=296.15, MLR, e) Temp=302.15, No MLR, f) Temp=302.15, MLR.

Από τα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν προκύπτει ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα, έχοντας σε όλες τις δοκιμές σταθερή τη θερμοκρασία των κοντίνερ (T=297K), προκαλεί μείωση των συγκεντρώσεων του ρύπου. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τον ορισμό της συγκέντρωσης που είναι ποσότητα ρύπου ανά όγκο μίγματος (αέρα/ρύπου) και μάλιστα αέριου ρύπου, η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα οδηγεί σε αύξηση του όγκου του μίγματος (τα αέρια έχουν την τάση να καταλάβουν το χώρο), επομένως η ίδια ποσότητα ρύπου «διαχέεται» σε μεγαλύτερο όγκο επομένως η συγκέντρωση μειώνεται. Επομένως, σε συνθήκες ατμοσφαιρικής ευστάθειας, όπως οι συνθήκες του πειράματος, η διασπορά του ρύπου ενοείται σε θερμοκρασιακή αύξηση της ατμόσφαιρας. Στο συμπέρασμα αυτό, έχουν οδηγηθεί και οι ερευνητές Mong-Yu Tsai , Kang-Shin Chen & Chung-Hsing Wu (2005), οι οποίοι μελέτησαν την επίδραση των θερμικών φαινομένων στη διασπορά του ρύπου σε οδική χαράδρα. Απέδειξαν πειραματικά και υπολογιστικά ότι η αύξηση της θερμοκρασιακής διαφοράς περιβάλλοντος-κτιρίου επιφέρει μείωση στη διασπορά του ρύπου.

4.7 Παραμετρική ανάλυση του μοντέλου τύρβης k- ω ,για διαφορετικές γωνίες ανέμου

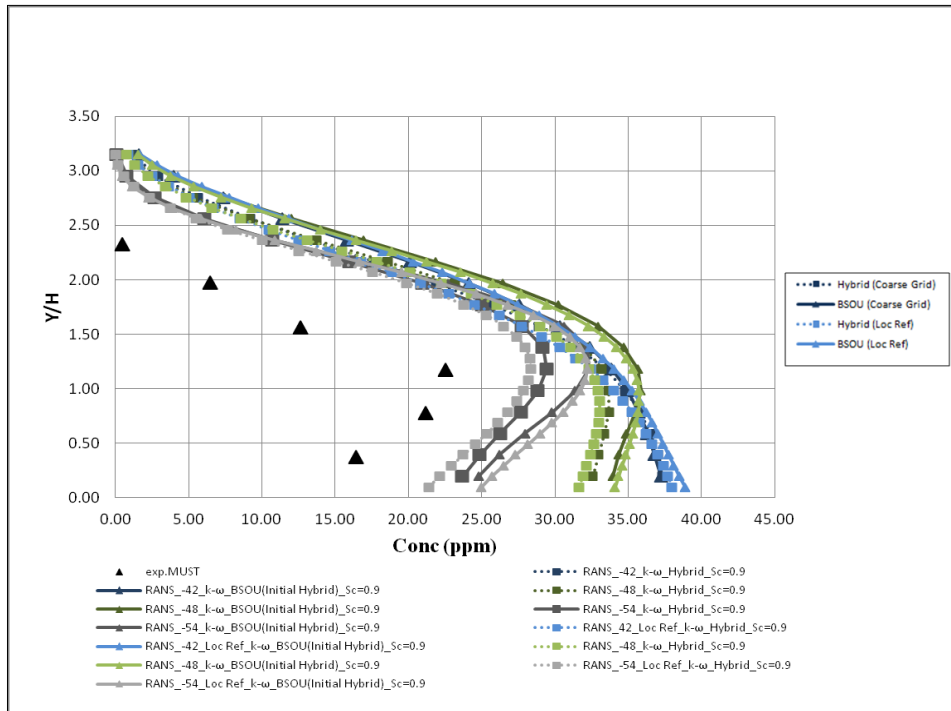
Αποφασίστηκε η πραγματοποίηση μιας ανάλυσης ευαισθησίας ως προς τη γωνία πρόσπτωσης του ανέμου. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τη σταθερή διακύμανση της γωνίας του ανέμου για τη δοθείσα δοκιμή 16, αποφασίστηκε η εξέταση των περιπτώσεων με γωνίες $\pm 6^\circ$ από την κύρια γωνία πρόσπτωσης του ανέμου $\varphi = -48^\circ$, δηλαδή $\varphi = -42^\circ$ και $\varphi = -54^\circ$.

▪ Main Tower



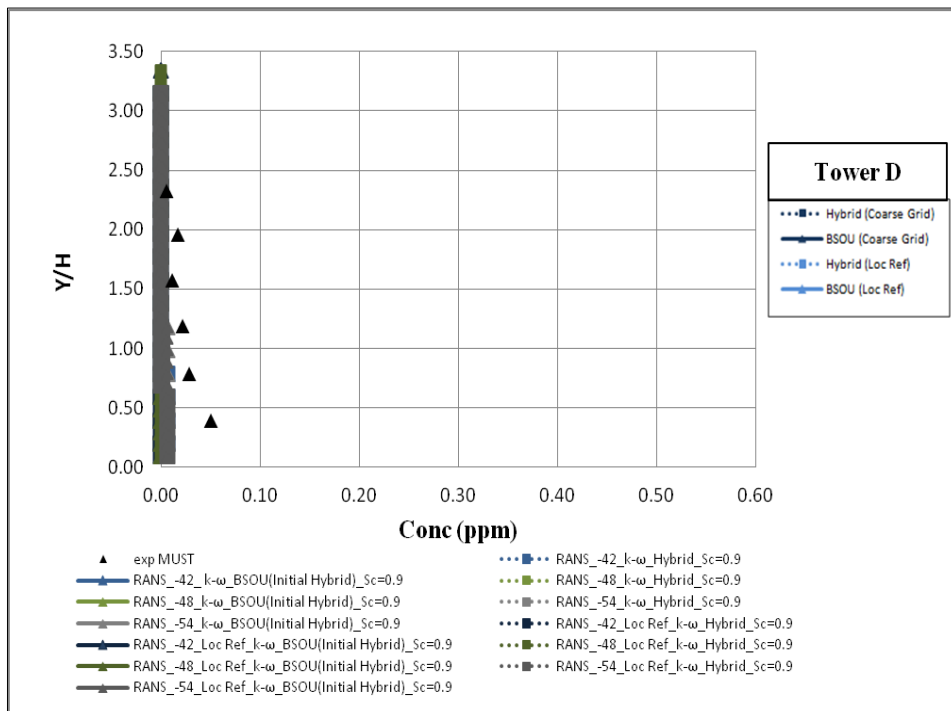
Σχήμα 4.39.: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm) , xz-plane, για μοντέλο τύρβης k- ω , χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, με Sc=0.9, για γωνίες ανέμου $\varphi = -42^\circ$, $\varphi = -48^\circ$, $\varphi = -54^\circ$, No MLR-MLR, στο Main Tower .

▪ **Tower B**



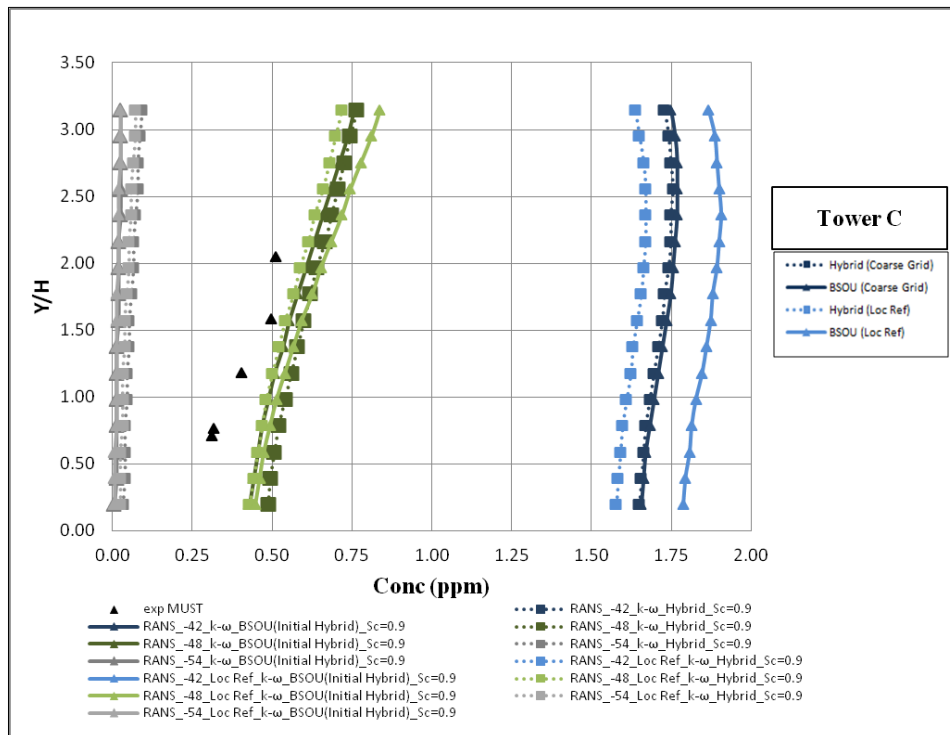
Σχήμα 4.40.: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm) , xz-plane, για μοντέλο τύρβης k-ω, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, με Sc=0.9, για γωνίες ανέμου $\varphi = -42^\circ$, $\varphi = -48^\circ$, $\varphi = -54^\circ$, No MLR-MLR, στο Tower B.

▪ **Tower D**



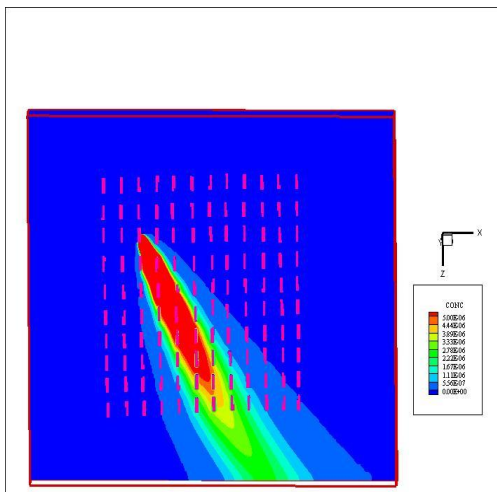
Σχήμα 4.41.: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm) , xz-plane, για μοντέλο τύρβης k-ω, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, με Sc=0.9, για γωνίες ανέμου $\varphi = -42^\circ$, $\varphi = -48^\circ$, $\varphi = -54^\circ$, No MLR-MLR, στο Tower D.

▪ Tower C

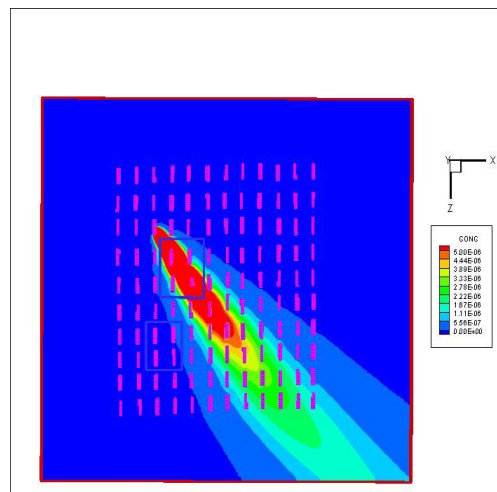


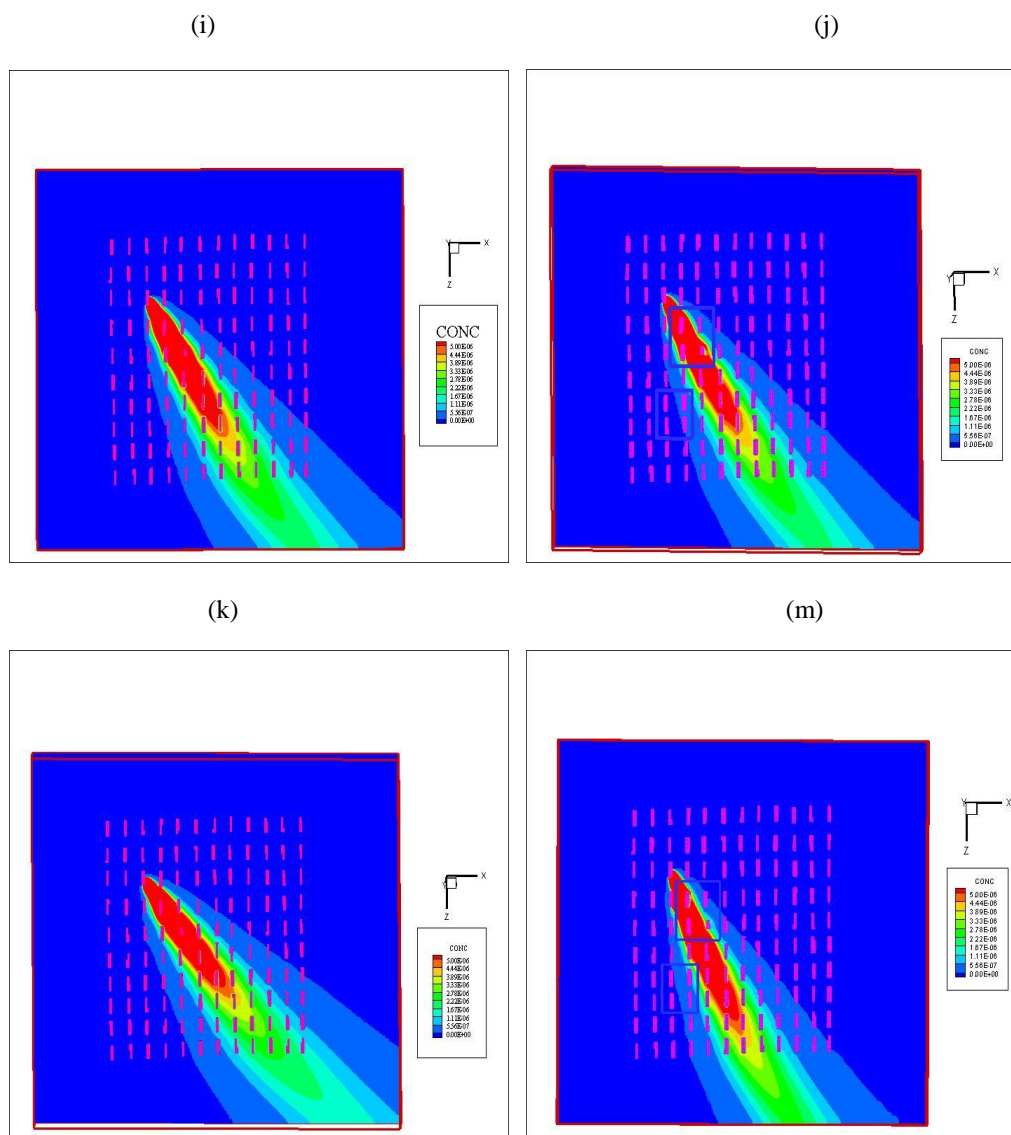
Σχήμα 4.42.: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm) ,xz-plane, για μοντέλο τύρβης k- ω , χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, με Sc=0.9, για γωνίες ανέμου $\varphi = -42^{\circ}$, $\varphi = -48^{\circ}$, $\varphi = -54^{\circ}$, No MLR-MLR, στο Tower C.

(g)



(h)

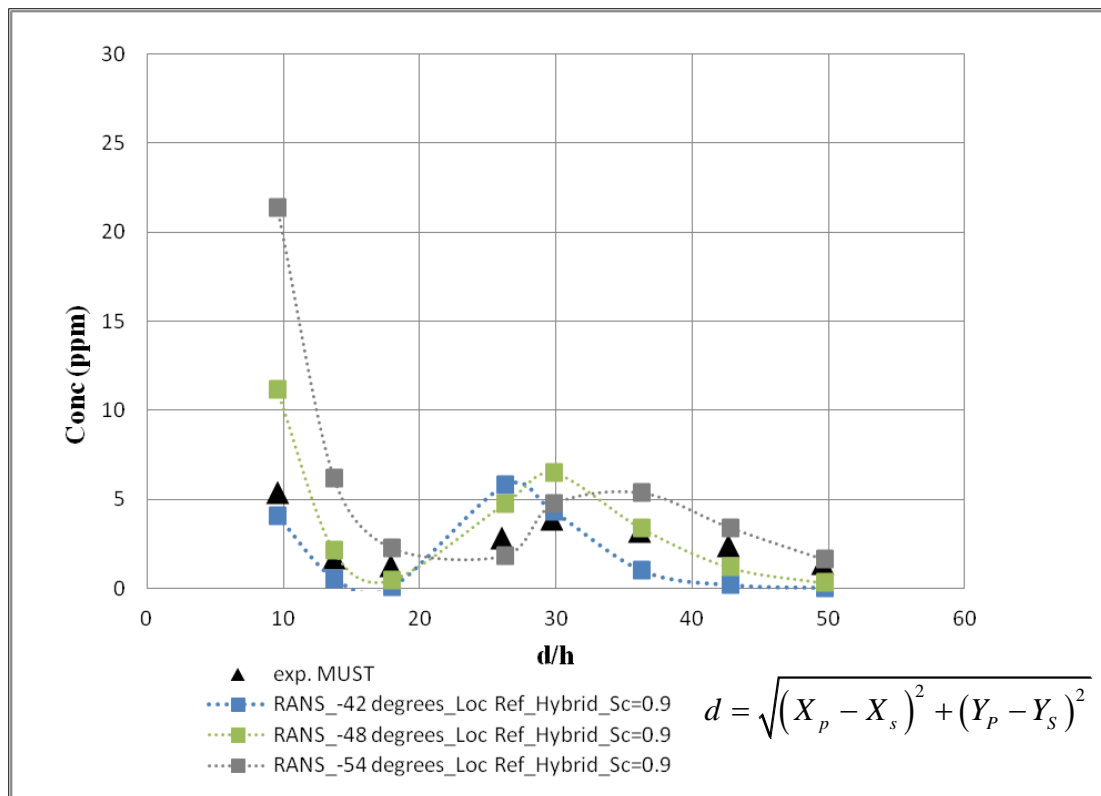




Σχήμα 4.43.: Ισοϋψείς μέσης αδιάστατης συγκέντρωσης Conc για μοντέλο τύρβης k- ω , xz-plane, αριθμητικό σχήμα Hybrid, με Sc=0.9 για : g) $\varphi = -42^\circ$, No MLR, h) $\varphi = -42^\circ$, MLR, i) $\varphi = -48^\circ$, No MLR, j) $\varphi = -48^\circ$, MLR, k) $\varphi = -54^\circ$, No MLR, m) $\varphi = -54^\circ$, MLR.

Παρατηρούνται από τα διαγράμματα των κατακόρυφων μέσων συγκεντρώσεων ότι σε γενικές γραμμές τα αποτελέσματα των «τρεξιμάτων» και για τις τρεις κατευθύνσεις γωνιών ανέμου δηλαδή -42° , -48° και -54° , αποκτούν το ίδιο σχήμα με τα πειραματικά αποτελέσματα. Ωστόσο παρατηρούνται ποσοτικές διακυμάνσεις μεταξύ των πειραμάτων και των προσομοιώσεων που χρησιμοποιήθηκαν. Η συμφωνία των υπολογιστικών αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα πειραματικά φαίνεται να εξαρτάται από τη θέση και τη μικρή γωνία απόκλισης της προσπίπτουσας κατεύθυνσης ανέμου. Συγκεκριμένα στον πύργο B (Tower B), φαίνεται ότι οι RANS προσομοιώσεις υπερεκτιμούν τη συγκέντρωση για κάθε γωνία του ανέμου. Το γεγονός ότι πύργος TB είναι τοποθετημένος πιο κοντά στην πηγή και παρά το γεγονός ότι έχει ενσωματωθεί στο πλέγμα περιοχή τοπικής πύκνωσης, η υπερεκτίμηση της συγκέντρωσης δεν αποφεύγεται. Πιθανώς μια επιπλέον πύκνωση

εκατέρωθεν της περιοχής εκπομπής του ρύπου να έδινε πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα. Όσον αφορά τον πύργο D (Tower D) σημειώνεται ότι και για τις τρεις γωνίες ανέμου, η μέση συγκέντρωση υποεκτιμάται και συγκεκριμένα μηδενίζεται. Το γεγονός αυτό φαίνεται και από τις ισοϋψείς καμπύλες της συγκέντρωσης και πιθανότερα σχετίζεται και με το μοντέλο τύρβης k- ω που έχει επιλεγεί, διότι το σχήμα του πλουμίου εφαρμόζοντας το άνωθεν μοντέλο τύρβης είναι συγκεκριμένο και φαίνεται να μην «ανοίγει» τόσο ώστε να λαμβάνει τιμές συγκέντρωσης στον πύργο D. Βέβαια και τα πειραματικά αποτελέσματα δίνουν μια εικόνα συγκέντρωσης που τείνει στο μηδέν επομένως το προβλεπόμενο προφίλ συγκεντρώσεων που εξάγεται από τις υπολογιστικές προσομοιώσεις δεν παρουσιάζει υψηλές αποκλίσεις από το αντίστοιχο μετρούμενο. Μια λεπτομερής σύγκριση των διαγραμμάτων των πύργων C (Tower C) και Main Tower (MT), για γωνία $\varphi=-42^{\circ}$, καταλήγει σε μια ισχυρή υπερεκτίμηση των μέσων τιμών των συγκεντρώσεων ενώ η γωνία $\varphi=-54^{\circ}$ καταλήγει σε μια εξίσου ισχυρή υποεκτίμηση των τιμών των συγκεντρώσεων. Όσον αφορά την γωνία $\varphi=-48^{\circ}$ φαίνεται να είναι η γωνία πρόσπτωσης του ανέμου με αποτελέσματα που τείνουν να συμφωνούν περισσότερο με τα αντίστοιχα πειραματικά. Δηλαδή συμπεραίνεται ότι στους πύργους TC & MT, η μέση συγκέντρωση του ρύπου είναι πολύ ευαίσθητη σε μικρές αποκλίσεις της προσπίπτουσας γωνίας του ανέμου. Αυτοί οι πύργοι βρίσκονται κοντά στην άκρη του πλουμίου όπου οι οριζόντιες κλίσεις της συγκέντρωσης είναι ισχυρές με αποτέλεσμα οι μεταβολές των συγκεντρώσεων να υπερβαίνουν το 100%.



Σχήμα 4.44.: Μέσες συγκεντρώσεις κατά μήκος 8 ανιχνευτών PID που βρίσκονται στον πυρήνα του πλουμίου. Ο τύπος της ευκλείδειας απόστασης d , όπου X_s, Y_s : συντεταγμένες της πηγής εκπομπής και X_p, Y_p : συντεταγμένες των θέσεων κάθε ανιχνευτή.

Για να ολοκληρωθεί η σύγκριση των διαγραμμάτων, παρατίθεται το σχήμα 4.44, το οποίο απεικονίζει τις μέσες συγκεντρώσεις όπως αυτές υπολογίστηκαν από τις προσομοιώσεις των γωνιών ανέμου $\varphi = -42^\circ$, $\varphi = -48^\circ$ και $\varphi = -54^\circ$, στα 8 σημεία που ήταν τοποθετημένοι οι PIDs ανιχνευτές και σε ύψος $y/h=0.63$. Η απόσταση d , παριστάνει την ευκλείδεια απόσταση κάθε ανιχνευτή από την πηγή εκπομπής του ρύπου. Οι θέσεις των ανιχνευτών PID εντός της γεωμετρίας του πειράματος, απεικονίζονται στο σχήμα 4.44. Από το σχήμα 4.44 παρατηρείται σαν γενικό συμπέρασμα ότι οι γωνίες $\varphi = -48^\circ$ και $\varphi = -54^\circ$ υπερεκτιμούν τις συγκεντρώσεις, ενώ η γωνία $\varphi = -42^\circ$ φαίνεται να υποεκτιμά τη συγκέντρωση. Συγκεκριμένα, κοντά στην πηγή και για γωνίες $\varphi = -48^\circ$ και $\varphi = -54^\circ$ υπάρχει μια έντονη υπερεκτίμηση της υπολογιζόμενης συγκέντρωσης εν αντιθέσει με την γωνία $\varphi = -42^\circ$, όπου η συγκέντρωση να μεν υποεκτιμάται αλλά οι τιμές της είναι πολύ κοντά στις αντίστοιχες μετρούμενες συγκεντρώσεις. Καθώς απομακρύνεται κάποιος από το σημείο εκπομπής του ρύπου και πιο συγκεκριμένα για $d/h=27$ παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα και για τις τρεις γωνίες συμβαδίζουν με τα πειραματικά αποτελέσματα, έχοντας πάντοτε μια σχετική (θετική ή αρνητική) απόκλιση. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι οι μικρές αποκλίσεις της γωνίας πρόσπτωσης του ανέμου είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες μέσες κατακόρυφες τιμές συγκέντρωσης που παρατηρήθηκαν στα προηγούμενα σχήματα. Αυτό υποδηλώνει ότι μέρος των αποκλίσεων των υπολογιζόμενων τιμών έναντι των πειραματικών, στα σημεία των ανιχνευτών, κοντά στο σημείο εκπομπής αλλά και κοντά στο όριο του πλουμίου (Main Tower, TC) μπορεί να αποδοθεί στον διακυμαινόμενο χαρακτήρα της κατεύθυνσης πρόσπτωσης του ανέμου, σε πραγματικές ατμοσφαιρικές συνθήκες.

4.8 Παραμετρική ανάλυση του μοντέλου τύρβης k- ω , για διαφορετικές καταστάσεις ατμόσφαιρας

Ένας άλλος παράγοντας που αναμένεται να επηρεάζει τη διασπορά των ρύπων και την απομάκρυνσή τους από τη χαράδρα είναι και η κατάσταση της ευστάθειας της ατμόσφαιρας. Συγκεκριμένα, σε περιπτώσεις όπως το βράδυ που το έδαφος έχει ψυχθεί λόγω ακτινοβολίας και έχει αποκτήσει χαμηλότερη θερμοκρασία από το υπερκείμενο στρώμα της ατμόσφαιρας, υπάρχει μια θετική θερμοβαθμίδα όπως λέγεται, δηλαδή αύξηση της θερμοκρασίας με το ύψος. Αυτό αποδεικνύεται ότι αντίκειται στις κατακόρυφες μετακινήσεις αερίων μαζών, λόγω δυνάμεων άνωσης που αναπτύσσονται εξαιτίας της διαφοράς πυκνοτήτων ενός τμήματος ρευστού (που μπορεί για κάποιο τυχαίο λόγο να τείνει να μετακινηθεί) και του περιβάλλοντος αέρα. Πρόκειται για τη λεγόμενη ευσταθή κατάσταση της ατμόσφαιρας, στην οποία οι κατακόρυφες διαταραχές ταχύτητας του αέρα εξασθενούν. Το αποτέλεσμα είναι να μην ευνοείται η διασπορά των ρύπων και η απαγωγή τους προς μεγαλύτερα ύψη, καθώς παγιδεύονται στο κατακόρυφο επίπεδο που παρήχθησαν, δηλαδή εντός της οδικής χαράδρας. Πράγματι, πειραματικές μετρήσεις σε αεροσήραγγα έχουν επιβεβαιώσει αυτό το φαινόμενο. Το αντίθετο αναμένεται να συμβαίνει σε περι-

πτώσεις ασταθούς κατάστασης της ατμόσφαιρας, όπου κάθε κατακόρυφη μετακίνηση του ρευστού ενισχύεται. (Κουτσουράκης Ν., 2010)

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα προαναφερθέντα, αποφασίστηκε η διεξαγωγή προσομοιώσεων σε διαφορετικές καταστάσεις ατμόσφαιρας δηλαδή ευσταθή, ουδέτερη και ασταθή έτσι ώστε να εκτιμηθεί η επίδραση του είδους της ατμόσφαιρας στη διασπορά του ρύπου. Αξίζει να σημειωθεί ότι όλες οι πειραματικές δοκιμές του πειράματος MUST πραγματοποιήθηκαν σε ευσταθείς και ουδέτερες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Έτσι λοιπόν, επειδή τα πειραματικά δεδομένα δεν επαρκούσαν για την επιθυμητή ανάλυση αποφασίστηκε η διεξαγωγή των προσομοιώσεων με δεδομένα βασισμένα σε τύπους από βιβλιογραφία. Καταρχήν αποφασίστηκε ότι θα χρησιμοποιούνταν τα δεδομένα της δοκιμής 16 για όλες τις περιπτώσεις ατμόσφαιρας δηλαδή η ίδια ταχύτητα για ύψος 4m ίση με $u_{(y=4m)} = 4.49 \text{ m s}^{-1}$, ίδια γωνία ανέμου δηλαδή $\varphi = -48^\circ$ και ίδια τραχύτητα εδάφους η οποία βασίστηκε στους Yee & Billoft οι οποίοι θεώρησαν μια μέση επιφανειακή τραχύτητα 0.045m. Αποφασίστηκε λοιπόν, κατόπιν δοκιμών μια μέση τραχύτητα, κοινή και για τις 3 περιπτώσεις ατμοσφαιρικών συνθηκών ίση με 0.085m. Επιπλέον διατηρήθηκε ίδια τιμή για το μήκος Monin-Obukhov για την περίπτωση της ευσταθούς ατμόσφαιρας, ενώ για την ουδέτερη και για την ασταθή προτιμήθηκαν τιμές βασιζόμενες στη βιβλιογραφία. Οι τιμές παρατίθενται στον πίνακα 4.16. Χρησιμοποιώντας τον λογαριθμικό νόμο υπολογίστηκε σε κάθε ατμοσφαιρική κατάσταση η ταχύτητα τριβής (u_*) και κατόπιν το προφίλ της ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει του ύψους. Οι τιμές των υψών για τα οποία υπολογίστηκε η ταχύτητα του ανέμου είναι οι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν σε όλες τις προσομοιώσεις της τρέχουσας εργασίας. Εν συνεχεία για τον υπολογισμό της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, χρησιμοποιήθηκαν τύποι και πάλι από τη βιβλιογραφία που αφορούν το κάθε είδος ατμόσφαιρας. Συγκεκριμένα:

Ευσταθής κατάσταση

Λογαριθμικός νόμος ταχύτητας

Τύποι τυρβώδους κινητικής ενέργειας

$$u(y) = \frac{u_*}{\kappa} \left[\left(\ln \frac{y}{y_0} \right) - \Psi_m \left(\frac{y}{L} \right) \right]$$

$$\Psi_m \left(\frac{y}{L} \right) = -5 \frac{y}{L}$$

$$k = \frac{1}{2} (\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2)$$

$$\sigma_u = 2 \cdot u_* \cdot \left[1 - \left(\frac{y}{h} \right) \right]^{3/4}$$

$$\sigma_v = 2.2 \cdot u_* \cdot \left[1 - \left(\frac{y}{h} \right) \right]^{3/4}$$

$$\sigma_w = 1.73 \cdot u_* \cdot \left[1 - \left(\frac{y}{h} \right) \right]^{3/4}$$

Ουδέτερη Κατάσταση

Λογαριθμικός νόμος ταχύτητας

$$u(y) = \frac{u_*}{\kappa} \left[\left(\ln \frac{y}{y_0} \right) - \Psi_m \left(\frac{y}{L} \right) \right]$$

$$\Psi_m \left(\frac{y}{L} \right) = 0$$

Τύποι τυρβώδους κινητικής ενέργειας

$$\sigma_u = 2.5 \cdot u_* \cdot \exp \left(-1.5 \cdot \frac{y}{h} \right)$$

$$\sigma_v = 1.6 \cdot u_* \cdot \left[1 - 0.5 \cdot \left(\frac{y}{h} \right) \right]$$

$$\sigma_w = 1.25 \cdot u_* \cdot \left[1 - 0.5 \cdot \left(\frac{y}{h} \right) \right]$$

Ασταθής κατάσταση

Λογαριθμικός νόμος ταχύτητας

$$u(y) = \frac{u_*}{\kappa} \left[\left(\ln \frac{y}{y_0} \right) - \Psi_m \left(\frac{y}{L} \right) \right]$$

$$\Psi_m \left(\frac{y}{L} \right) = 2 \left[\ln \frac{(1+x)}{2} \right] + \ln \left[\frac{(1+x^2)}{2} \right] - 2 \tan^{-1}(x) + \frac{\pi}{2}$$

$$x = \left[1 - \left(15 \frac{y}{L} \right) \right]^{1/4}$$

Τύποι τυρβώδους κινητικής ενέργειας

$$L = \frac{u_*^3 \bar{T}}{\kappa g w_*' T'}$$

$$w_* = \left[\frac{g}{T_v} \cdot z_i \cdot \bar{T}' \right]^{1/3}$$

$$w_* \approx 0.08 w_B$$

$$\sigma_u = 0.032 \cdot w_B \cdot \left(1 + \left[1 - \left(\frac{z}{z_i} \right) \right]^6 \right)$$

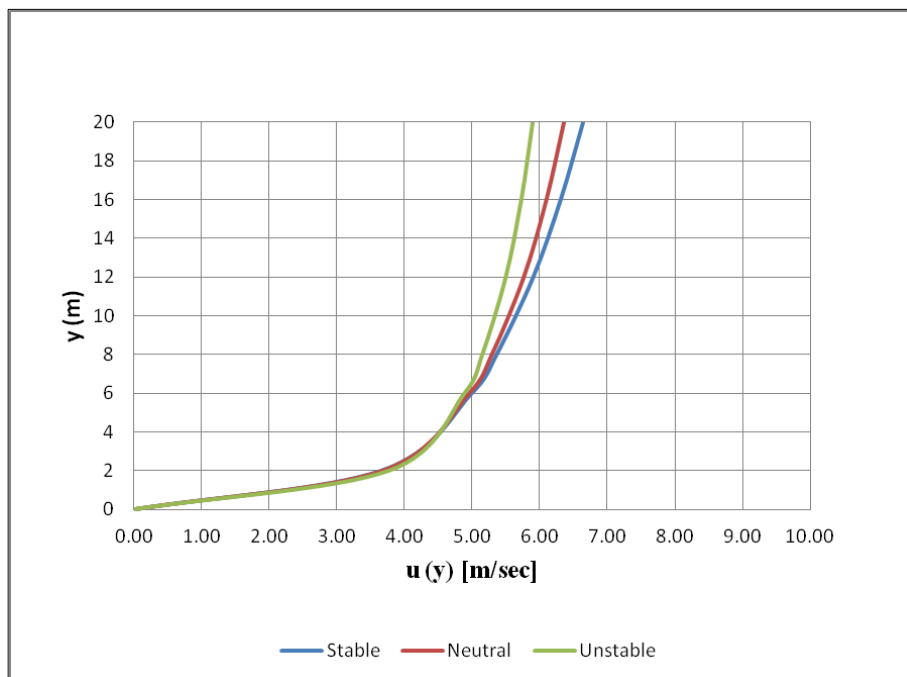
$$\sigma_v = 0.032 \cdot w_B$$

$$\sigma_w = 0.11 \cdot w_B \cdot \left(\frac{z}{z_i} \right)^{1/3} \cdot \left[1 - 0.8 \cdot \left(\frac{z}{z_i} \right) \right]$$

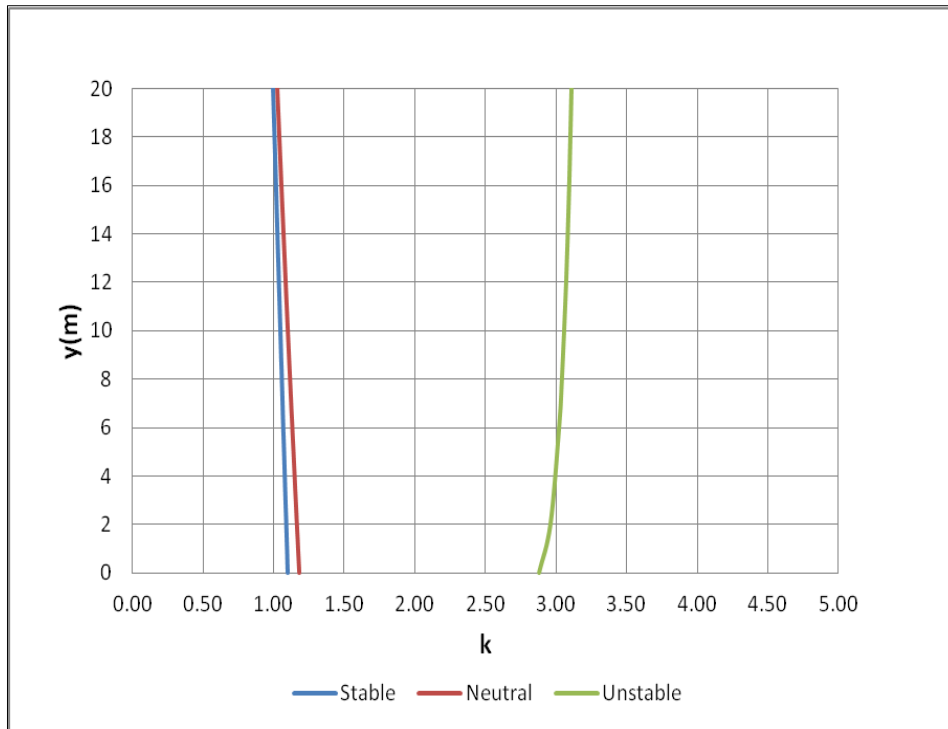
Οι τύποι για όλες τις ατμοσφαιρικές καταστάσεις πάρθηκαν από το βιβλίο του Roland Stull. (2015). Οι προσομοιώσεις των υπό εξέταση περιπτώσεων πραγματοποιήθηκαν και πάλι με μοντέλο τύρβης k- ω . Κάτωθεν παρατίθενται οι τιμές ταχυτήτων και τα διαγράμματα αυτών, όπως επίσης και οι υπολογιζόμενες τιμές τυρβώδους κινητικής ενέργειας για κάθε κατάσταση ατμόσφαιρας.

Πίνακας 4.12.: Αριθμητικά δεδομένα εισόδου για κάθε ατμοσφαιρική κατάσταση.

Ευσταθής Κατάσταση						
	Υ (ύψος) (m)	u (y)(ms ⁻¹)	u (ms ⁻¹)	w (ms ⁻¹)	$\frac{k}{(m^2 s^{-2})}$	ω
$u_{(y=4m)}=4.49 \text{ ms}^{-1}$	0	0.000000	0.000000	0.000000	1.100676	720.58
$u^*=0.43 \text{ ms}^{-1}$	2	3.541643	2.369822	2.631954	1.089688	713.39
$z_0=0.085\text{m}$	6	5.135715	3.436464	3.816580	1.067821	699.07
$\varphi = -48^0$	8	5.657523	3.785622	4.204359	1.056944	691.95
$L=120$	12	6.522405	4.364341	4.847091	1.035300	677.78
$\kappa = 0.41$	16	7.263379	4.860149	5.397742	1.013807	663.71
	20	7.936459	5.310527	5.897938	0.992464	649.74
Ουδέτερη Κατάσταση						
	Υ (ύψος) (m)	u (y)(ms ⁻¹)	u (ms ⁻¹)	w (ms ⁻¹)	$\frac{k}{(m^2 s^{-2})}$	ω
$u_{(y=4m)}=4.49 \text{ ms}^{-1}$	0	0.000000	0.000000	0.000000	1.184887	775.71
$u^*=0.48 \text{ ms}^{-1}$	2	3.681922	2.463687	2.736201	1.167615	764.40
$z_0=0.085\text{m}$	6	4.962695	3.320691	3.688001	1.133938	742.36
$\varphi = -48^0$	8	5.298078	3.545106	3.937239	1.117521	731.61
$L=2500 \text{ (m)}$	12	5.770774	3.861401	4.288521	1.085504	710.65
$h=300 \text{ (m)}$	16	6.106156	4.085816	4.537758	1.054542	690.38
$\kappa = 0.41$	20	6.366299	4.259886	4.731082	1.024596	670.77
Ασταθής Κατάσταση						
	Υ (ύψος) (m)	u (y)(ms ⁻¹)	u (ms ⁻¹)	w (ms ⁻¹)	$\frac{k}{(m^2 s^{-2})}$	ω
$u_{(y=4m)}=4.49 \text{ ms}^{-1}$	0	0.000000	0.000000	0.000000	2.877451	1883.78
$u^*=0.513 \text{ ms}^{-1}$	2	3.764064	2.518650	2.797245	2.957649	1936.29
$z_0=0.085\text{m}$	6	4.882620	3.267110	3.628494	3.018926	1976.40
$L= -41$	8	5.145284	3.442867	3.823691	3.038956	1989.51
$z_i =1000\text{m}$	12	5.492195	3.674996	4.081496	3.069035	2009.21
$w_B = 33.5 \text{ ms}^{-1}$	16	5.721674	3.828547	4.252032	3.090817	2023.47
$w^* = 2.68 \text{ ms}^{-1}$	20	5.890250	3.941347	4.377309	3.107305	2034.26

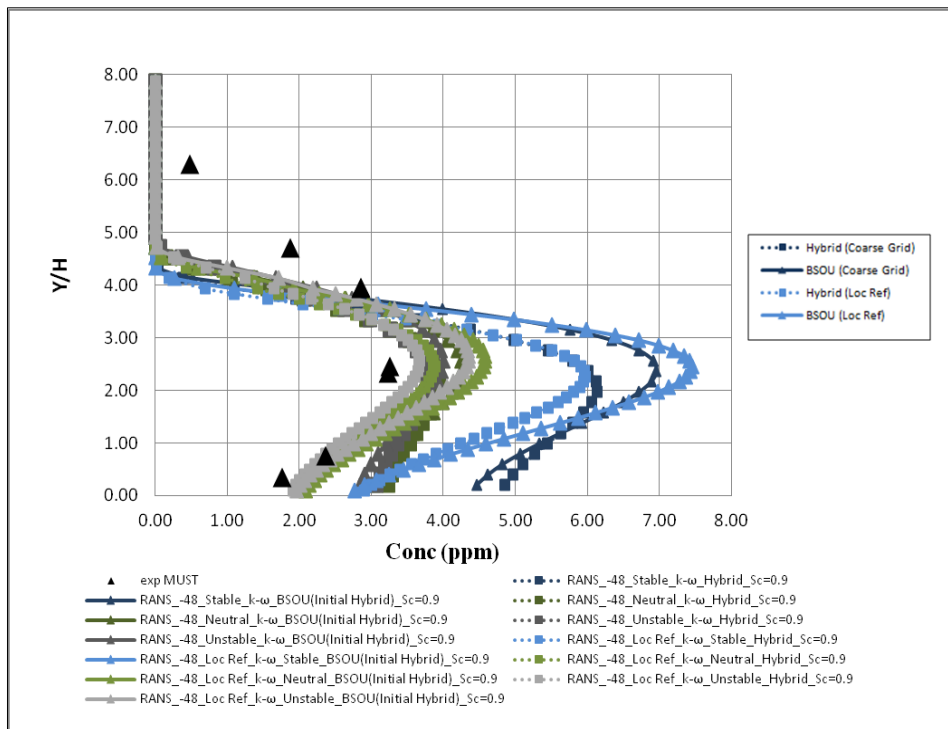


Σχήμα 4.45: Λογαριθμικό προφίλ ταχύτητας ανέμου (m s^{-1}) συναρτήσει του ύψους y (m), για ευστάθεια, ουδέτερη, αστάθεια κατάσταση



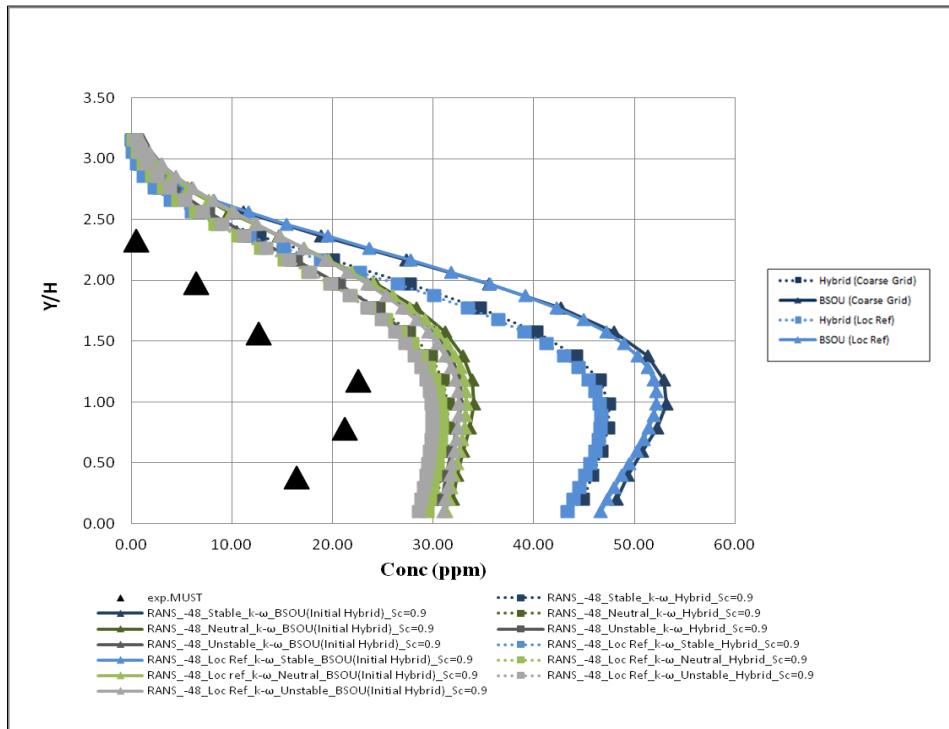
Σχήμα 4.46.: Προφίλ εισόδου της τυρβώδους κινητικής ενέργειας ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$), συναρτήσει του ύψους y (m) για ευστάθεια, ουδέτερη, αστάθεια κατάσταση

▪ Main Tower



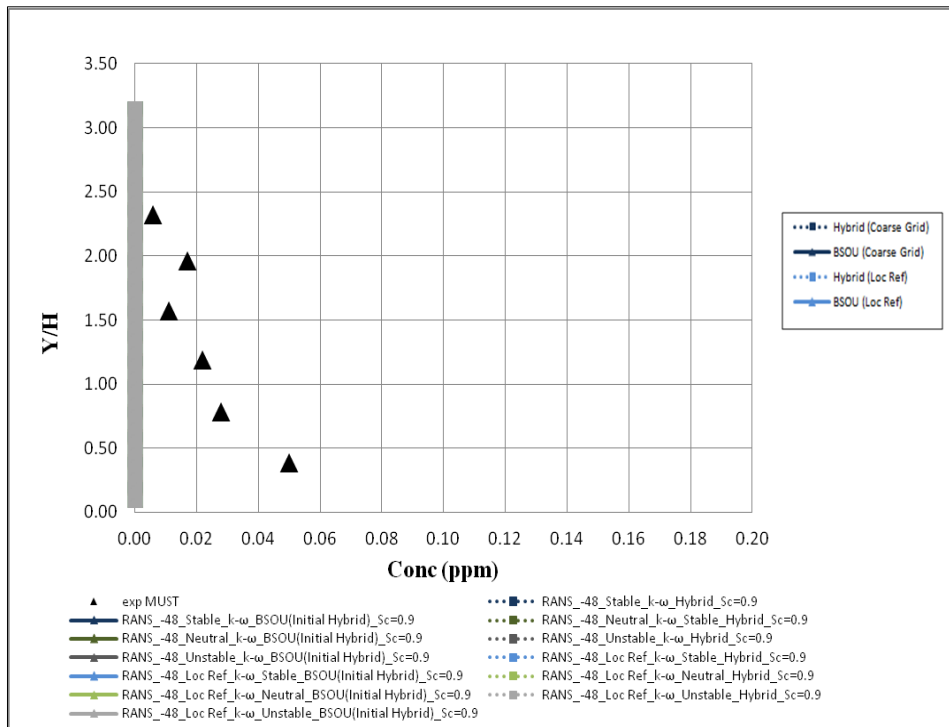
Σχήμα 4.47.: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm), xz-plane, για μοντέλο τύρβης $k-\omega$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, με $Sc=0.9$, για καταστάσεις ευστάθειας, αστάθειας, ουδέτερη, No MLR-MLR, στο Main Tower .

▪ **Tower B**



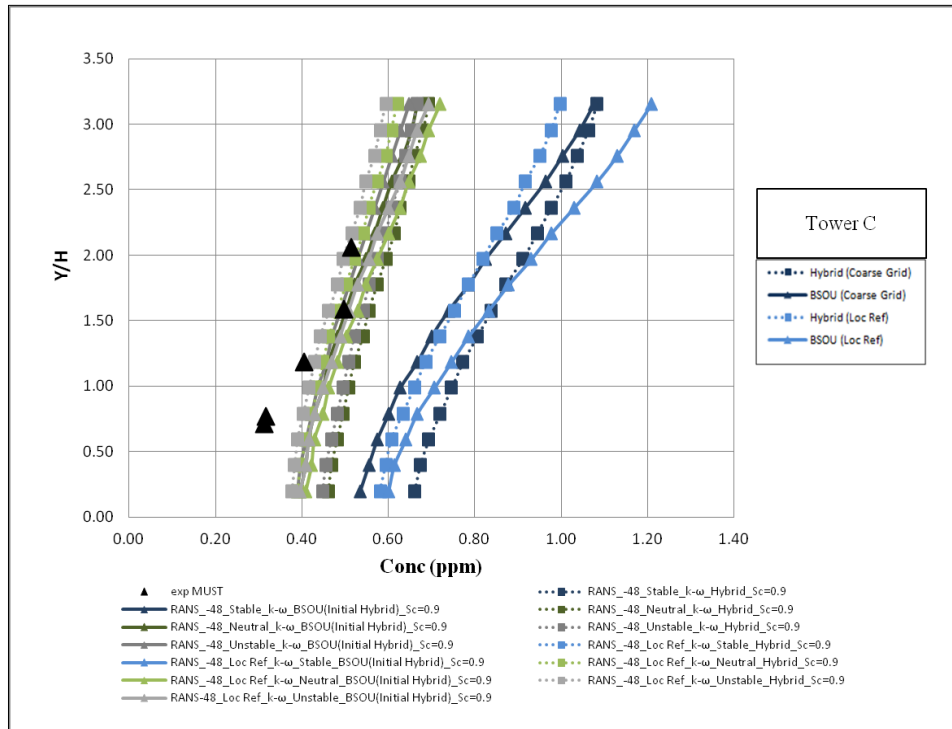
Σχήμα 4.48.: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης $Conc$ (ppm), xz -plane, για μοντέλο τύρβης $k-\omega$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, με $Sc=0.9$, για καταστάσεις ευστάθειας, αστάθειας, ουδέτερη, No MLR-MLR, Tower B.

▪ **Tower D**



Σχήμα 4.49.: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης $Conc$ (ppm), xz -plane, για μοντέλο τύρβης $k-\omega$, χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, με $Sc=0.9$, για καταστάσεις ευστάθειας, αστάθειας, ουδέτερη, No MLR-MLR, Tower D.

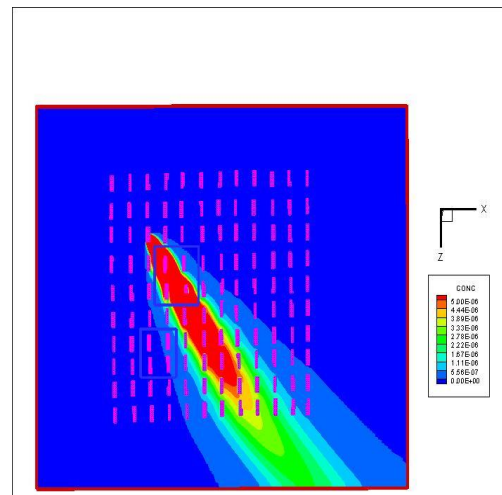
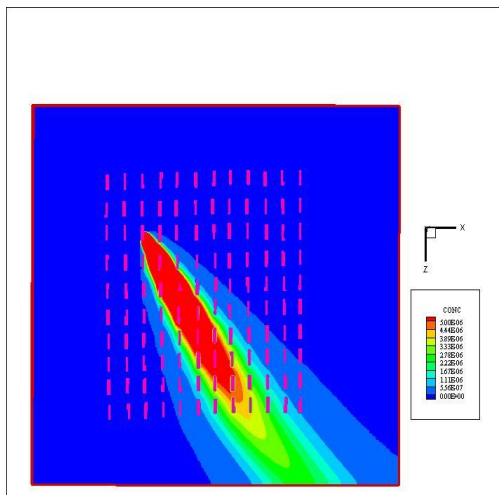
■ Tower C

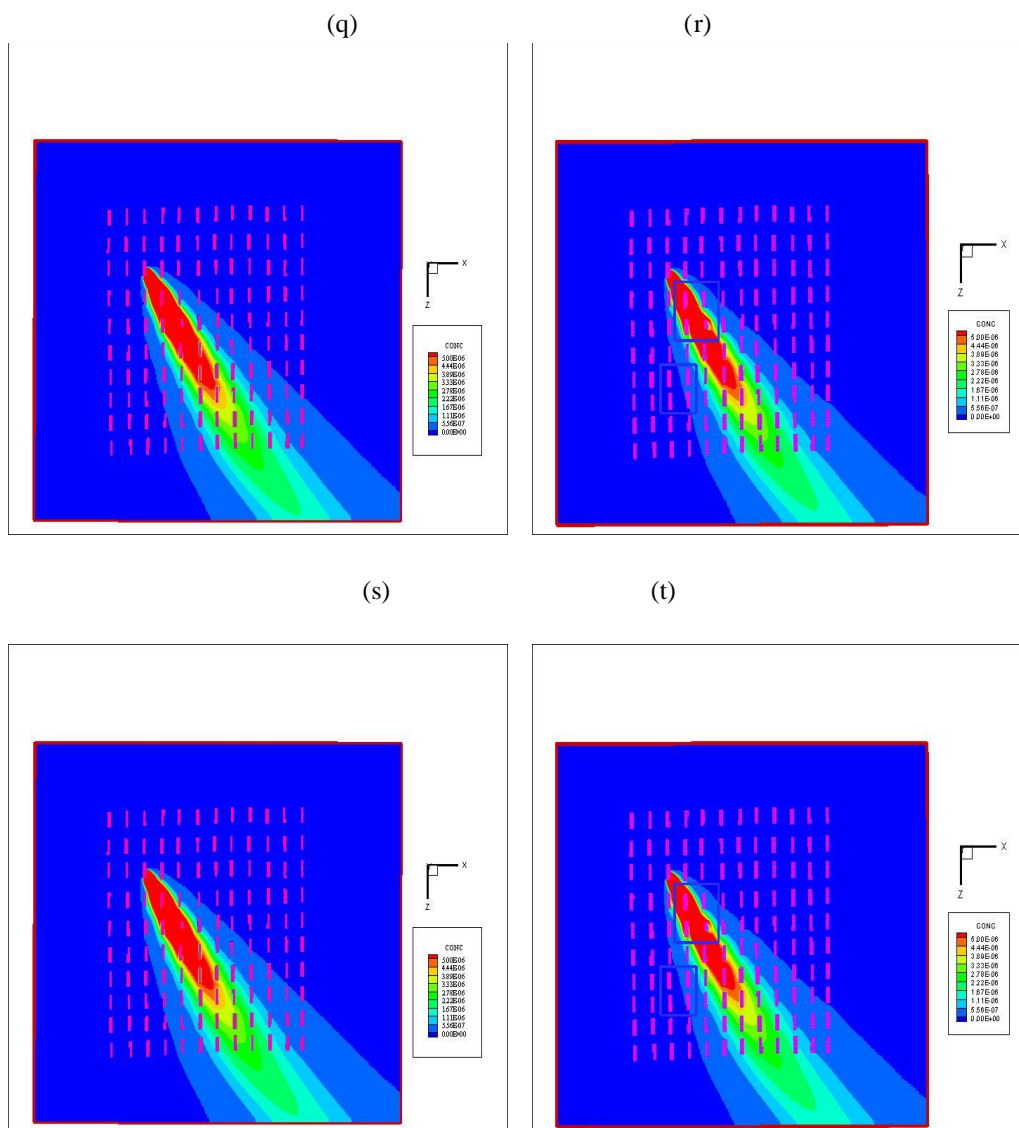


Σχήμα 4.50.: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm) , xz-plane ,για μοντέλο τύρβης k- ω , χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, με $Sc=0.9$, για καταστάσεις ευστάθειας, αστάθειας, ουδέτερη, No MLR-MLR, Tower C

(o)

(p)





Σχήμα 4.51.: Ισοϋψείς μέσης αδιάστατης συγκέντρωσης Conc, xz-plane, για μοντέλο τύρβης k- ω , αριθμητικό σχήμα Hybrid, με $Sc=0.9$ για : ο) ευστάθεια, No MLR, ρ) ευστάθεια, MLR, γ) ουδέτερη, No MLR, ρ) ουδέτερη, MLR, σ) ασταθής, No MLR, τ) ασταθής, MLR.

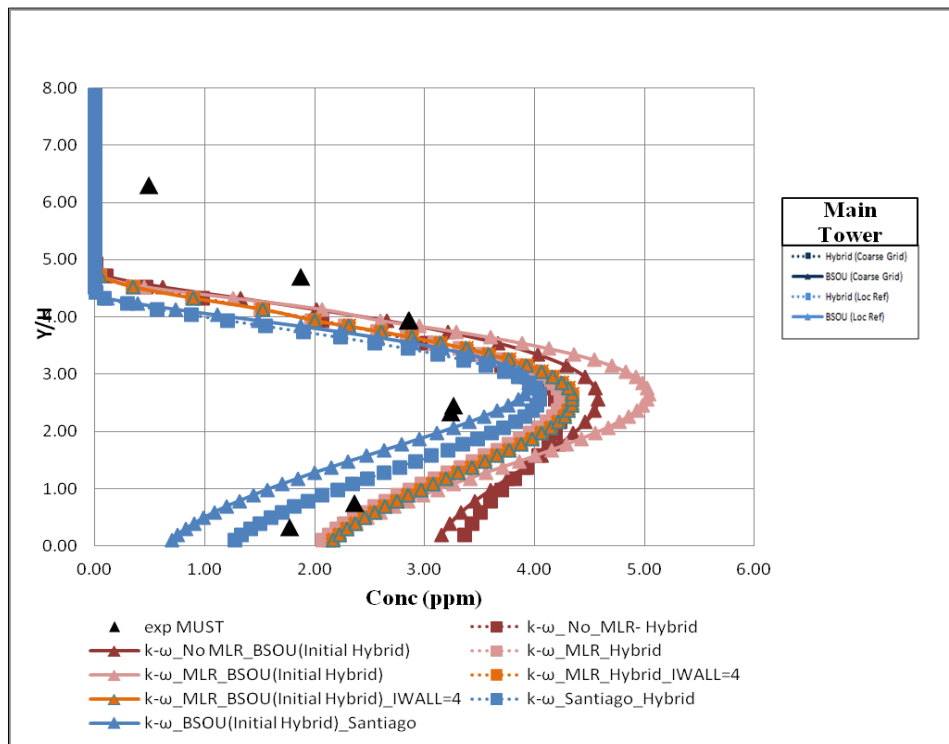
Τα διαγράμματα των κατακόρυφων τιμών των συγκεντρώσεων για τις τρεις καταστάσεις ατμόσφαιρας, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η ασταθής ατμόσφαιρα δίνει μικρότερες τιμές συγκεντρώσεων του ρύπου επομένως η ασταθής ατμόσφαιρα ευνοεί τη διασπορά της ρυπογόνου ουσίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι πραγματοποιήθηκε και μια παραμετρική ανάλυση ως προς την τιμή του ύψους τραχύτητας του ρύπου, επιλέγοντας τιμές : 0.125,0.17,0.225 (m). Η παραμετρική ανάλυση στην μεταβλητή αυτή πραγματοποιήθηκε διότι η βιβλιογραφία προτείνει ότι η αύξηση του προφίλ εισόδου της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k, και μάλιστα ο 10πλασιασμός της, επιφέρει υποδιπλασιασμό στην τιμή της συγκέντρωσης του ρύπου. Έτσι λοιπόν, η σταδιακή αύξηση του ύψους της τραχύτητας, προκαλούσε και αύξηση στο προφίλ εισόδου της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, και στις 3 ατμοσφαιρικές συνθήκες με πιο έντονα την ασταθή περιοχή, ωστόσο τα

αποτελέσματα δεν έδωσαν βελτίωση των τιμών συγκέντρωσης. Αντιθέτως τα επίπεδα του ρύπου ήταν στα επίπεδα της συγκέντρωσης για $y_0=0.085m$. Μια πιθανή ερμηνεία αυτού του αποτελέσματος είναι ότι η ελεύθερη ροή δεν έχει αρκετή τύρβη: η (όχι τέλεια) τύρβη που έχει δοθεί στην είσοδο έχει υποβαθμιστεί, ενώ αυτή που παράγεται από τα κτίρια δεν έχει αρχίσει ακόμη να εξαπλώνεται προς τα πάνω. Η τύρβη δεν είναι αρκετή ώστε να μεταφέρει ορμή από την ελεύθερη ροή προς τα μεσαία ύψη.

4.9 Επίδραση διαφορετικής οριακής συνθήκης (IWALL=4) και διαφορετικού μεγέθους πλέγματος (Grid Test 3) στη διασπορά του ρύπου.

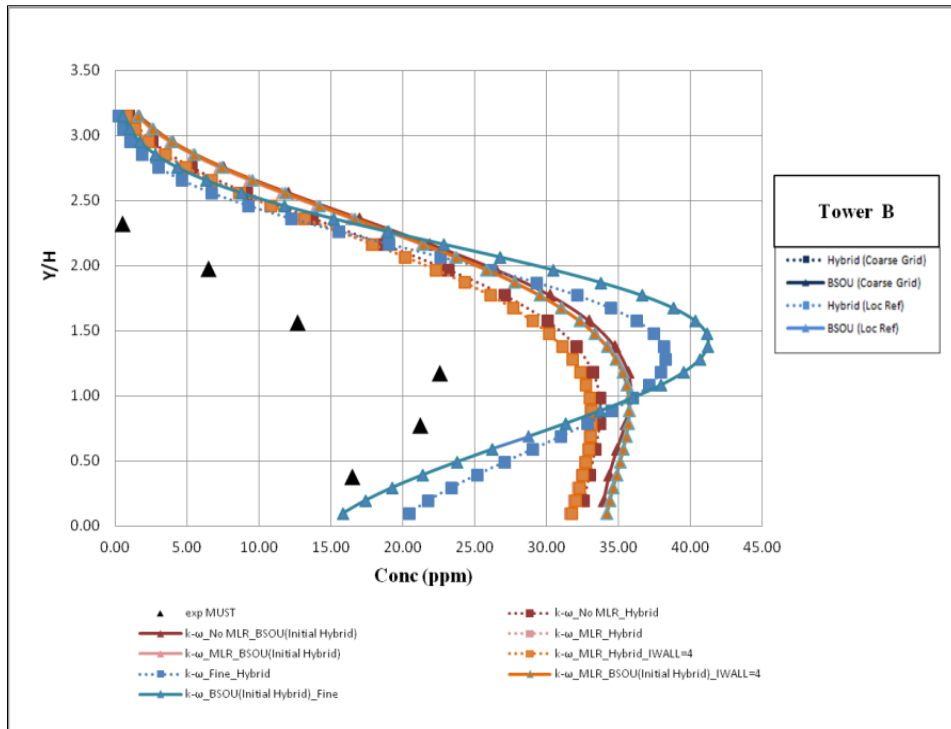
Αποφασίστηκε η επιβολή διαφορετικής οριακής συνθήκης στο βόρειο όριο του υπολογιστικού χωρίου (επίπεδο +y) η οποία σκοπό έχει την καλύτερη προσομοίωση των ατμοσφαιρικών συνθηκών. Επιπλέον η χρήση πυκνού πλέγματος (Grid Test 3) και η προσομοίωση του φυσικού προβλήματος με μοντέλο τύρβης έδωσε αξιόλογα πορίσματα.

▪ Main Tower



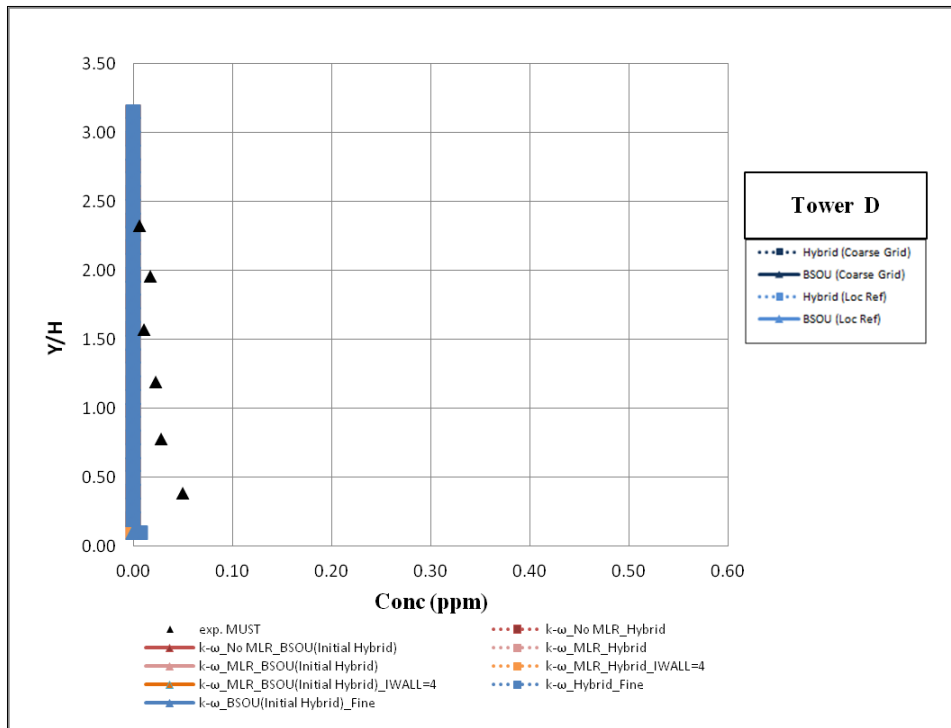
Σχήμα 4.52.: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm), xz plane, για μοντέλο τύρβης k- ω , χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, με $Sc=0.9$, για πλέγματα: No MLR, MLR, MLR (IWALL=4), Fine, Main Tower.

▪ **Tower B**



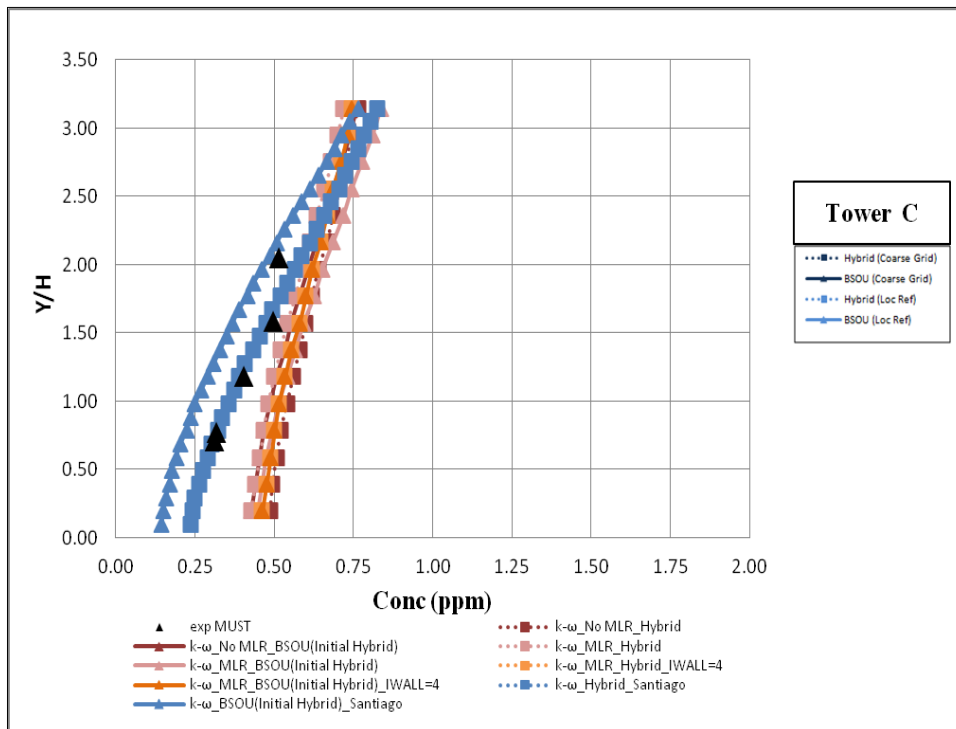
Σχήμα 4.53.: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm), xz-plane, για μοντέλο τύρβης k- ω , χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, με $Sc=0.9$, για πλέγματα: No MLR, MLR, MLR (IWALL=4), Fine, Tower B.

▪ **Tower D**



Σχήμα 4.54.: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm), xz-plane, για μοντέλο τύρβης k- ω , χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, με $Sc=0.9$, για πλέγματα: No MLR, MLR, MLR (IWALL=4), Fine, Tower D.

▪ Tower C



Σχήμα 4.55.: Απεικόνιση των κατακόρυφων προφίλ της μέσης συγκέντρωσης Conc (ppm), xz-plane, για μοντέλο τύρβης k- ω , χρησιμοποιώντας τα αριθμητικά σχήματα Hybrid & BSOU, με $Sc=0.9$, για πλέγματα: No MLR, MLR, MLR (IWALL=4), Fine, Tower C.

Παρατηρώντας τα προαναφερθέντα διαγράμματα συμπεραίνεται ότι η επιβολή της οριακής συνθήκης (IWALL= 4) για πλέγμα με τοπική πυκνωση δεν επηρεάζει τα επίπεδα της συγκέντρωσης του ρύπου στην ατμόσφαιρα – οι καμπύλες με ροζ και πορτοκαλί χρωματισμούς σχεδόν ταυτίζονται- ωστόσο από πλευράς φυσικού περιεχομένου, η επιβολή συνθήκης (IWALL= 4) κρίνεται σωστή διότι επιβάλλει στα όρια του χώρου τις καταστάσεις μεσοκλίμακας που επικρατούν εκτός αυτού και θεωρούνται σταθερές (ανεπηρέαστες από το υπολογιστικό χώρο). Επιπλέον παρατίθενται αποτελέσματα για τους τρεις τύπους πλεγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τις προσομοιώσεις (No MLR, MLR, Fine) . Από τη συγκριτική μελέτη των τριών πλεγμάτων διαφαίνεται το προφανές, ότι το αραιό πλέγμα δίνει τα λιγότερα ακριβή αποτελέσματα. Το πιο ενδιαφέρον βέβαια είναι η σύγκριση μεταξύ των πλεγμάτων με τοπική πυκνωση και πυκνού πλέγματος. Από τα διαγράμματα των κατακόρυφων μέσων συγκεντρώσεων στους πύργους Main Tower, Tower B & Tower D, τα αποτελέσματα των 2 πλεγμάτων αποκτούν μεταξύ τους το ίδιο σχήμα, το οποίο σχήμα ακολουθεί τις πειραματικές τιμές. Συνεπώς επιτυγχάνεται καλή προσομοίωση των πειραματικών δεδομένων κάνοντας χρήση πλέγματος $\approx 3 \times 10^6$ κελιών και πλέγματος $\approx 10 \times 10^6$ κελιών. Άρα η ενσωμάτωση τοπικών περιοχών πυκνωσης συμβάλλουν στην μείωση του υπολογιστικού κόστους και χρόνου ενώ ταυτόχρονα προσδίδουν ακρίβεια στους υπολογισμούς, που είναι και το ζητούμενο στις υπολογιστικές προσομοιώσεις. Όσον αφορά τον πύργο B, παρατηρούνται οι μέσες

συγκεντρώσεις του πυκνού πλέγματος να αποκτούν υψηλότερη τιμή συγκριτικά με το πλέγμα με MLR. Μια πιθανή εξήγηση αποτελεί η θέση του πύργου B, που είναι το πιο κοντινό σημείο καταγραφής συγκέντρωσης στην πηγή εκπομπής, στην οποία περιοχή εμφανίζονται πιο έντονα φαινόμενα τύρβης, ανακυκλοφορίας, ορμής επομένως αυτά προσομοιώνονται ικανοποιητικότερα με το πυκνό πλέγμα σε όλο το υπολογιστικό χωρίο και όχι με το εν μέρει πυκνό πλέγμα. Ίσως η επιλογή λίγο μεγαλύτερης περιοχής πύκνωσης (η προσθήκη 1 ή 2 κοντέινερ) να ευνοούσε την καλύτερη προσομοίωση του φαινομένου.

Κεφάλαιο 5

5.1 Συμπεράσματα

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την υπολογιστική μελέτη προσομοίωσης της διασποράς του ρύπου στο πείραμα MUST. Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να τονιστεί ότι δεν υπάρχουν διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα που να αφορούν τα ροϊκά χαρακτηριστικά της επιλεγείσας δοκιμής του πειράματος MUST, προκειμένου να γίνει επαλήθευση με το υπολογιστικό μοντέλο. Αυτός είναι και ο λόγος που κατά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων δεν παρατίθενται διαγράμματα ταχυτήτων (u, w) και τυρβώδους κινητικής ενέργειας (k). Επίσης, υπήρξε προσπάθεια επικοινωνίας με τους Yee E. και Biltoft C.A, όπως και με την υπηρεσία Defense Threat Reduction Agency (DTRA) των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής προκειμένου να ληφθούν αναλυτικά τα αποτελέσματα, χωρίς ωστόσο ανταπόκριση.

Σε πρώτο στάδιο, απαραίτητη κι άκρως σημαντική παράμετρο αποτελεί η περιγραφή του φυσικού χώρου του προβλήματος. Με χρήση κατάλληλου υπολογιστικού πλέγματος που σέβεται τη γεωμετρία του φυσικού χώρου και τις ιδιαιτερότητές του, εξασφαλίζεται καλύτερη προσέγγιση των φυσικών φαινομένων. Η χρησιμοποίηση υπολογιστικού πλέγματος με ενσωματωμένη την μεθοδολογία πολλαπλής τηλεσκοπικής τοπικής πύκνωσης (Multi - Local Refinement, MLR) και η επιλογή 2 περιοχών τοπικής πύκνωσης εκατέρωθεν σημείων καταγραφής των πειραματικών συγκεντρώσεων (Main Tower, Tower B & Tower D) προσέφερε ικανοποιητικά αποτελέσματα στον υπολογισμό των μέσων τιμών συγκεντρώσεων συγκριτικά με τα ληφθέντα αποτελέσματα του πειράματος MUST. Επίσης η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ του πλέγματος με τοπική πύκνωση (Grid Test 2) και του πυκνού πλέγματος (Grid Test 3) -πλέγμα με την ίδια χωρική διακριτοποίηση (αριθμό κόμβων ανά μήκος πλευράς κτιρίων) σε ολόκληρο το υπολογιστικό χωρίο, με αυτή που επικρατεί στις τοπικές περιοχές πύκνωσης – έδωσε κοντινές τιμές στις μέσες συγκεντρώσεις του ρύπου, γεγονός που οδηγεί στην προτίμηση υπολογιστικού πλέγματος με την τεχνική τοπικής πύκνωσης, διότι αποτελεί συμφέρουσα πρόταση και λόγω χαμηλότερου υπολογιστικού κόστους.

Στη συνέχεια, προκύπτουν δύο βασικά συμπεράσματα από τα αριθμητικά σχήματα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη διακριτοποίηση των εξισώσεων RANS. Από τα διαγράμματα των μέσων τιμών συγκεντρώσεων παρατηρείται ότι το υβριδικό σχήμα (Hybrid scheme) καταφέρνει να αποδίδει μέσες τιμές συγκεντρώσεων πιο «κοντά» στις πειραματικές στους πύργους Main Tower, Tower B συγκριτικά με το σχήμα BSOU. Όμως το σχήμα BSOU, φαίνεται να αποδίδει καλύτερα στον πύργο Tower C. Έτσι λοιπόν δεν μπορεί να εξαχθεί ένα τελικό συμπέρασμα για το ποιο αριθμητικό σχήμα περιορίζει τα φαινόμενα αριθμητικής διάχυσης. Ακόμη, προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με το αριθμητικό σχήμα BSOU. Η ανάλυση του κεφαλαίου 4 σχετικά με τους προτεινόμενους συντελεστές υποχαλάρωσης και η εφαρμογή τους στην παρούσα εργασία, αποτελούν σημαντική πληροφορία για μελλοντικές προσομοιώσεις ροών με τον κώδικα `caffa3d-mlr`. Η γνώση δηλαδή των τιμών των συντελεστών υποχαλάρωσης στις οποίες το αριθμητικό σχήμα BSOU λειτουργεί, διευκολύνει σημαντικά κατά την εφαρμογή του.

Επιπλέον, οι παραμετρικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για το πρόβλημα της διασποράς του ρύπου, στηρίχθηκαν στη φυσική του προβλήματος και όχι στο αριθμητικό-αλγοριθμικό κομμάτι. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκαν οι επιδράσεις διαφορετικών μοντέλων τύρβης, διαφορετικών τιμών του τυρβώδους αριθμού Schmidt, διαφορετικών θερμοκρασιών του αέρα, διαφορετικών γωνιών κατεύθυνσης πρόσπτωσης του ανέμου και τέλος, διαφορετικών ατμοσφαιρικών συνθηκών (ευστάθειας, αστάθειας και ουδέτερης κατάστασης). Στην επίδραση των ατμοσφαιρικών συνθηκών πραγματοποιήθηκε και παραμετρική μελέτη επίδρασης του ύψους τραχύτητας σε κάθε κατάσταση ατμόσφαιρας.

Αρχικά, όσον αφορά την επίδραση του μοντέλου τύρβης, συμπεραίνεται ότι μεταξύ των υπό εξέταση 4 μοντέλων τύρβης $k-\epsilon$, MMK $k-\epsilon$, $k-\omega$, SST $k-\omega$, το μοντέλο εκείνο με τα πλησιέστερα αποτελέσματα στις πειραματικές τιμές του πεδίου MUST, είναι το μοντέλο $k-\omega$, διότι καταφέρνει και διαχειρίζεται την υπερεκτίμηση του ρυθμού καταστροφής της τύρβης εν αντιθέσει με τα μοντέλα $k-\epsilon$.

Ο τυρβώδης αριθμός Schmidt για τον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις είχε τιμή 0.9, βασιζόμενη στη βιβλιογραφία. Το μοντέλο τύρβης των προσομοιώσεων αποτέλεσε το μοντέλο $k-\omega$. Η ανάλυση ευαισθησίας οδήγησε σε προσομοιώσεις του προβλήματος σε ένα εύρος τιμών Schmidt: 0.1//0.5//0.9//1.2. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων κρίθηκαν ικανοποιητικά για τιμή τυρβώδους αριθμού Schmidt ≥ 0.9 . Ωστόσο για την καλύτερη προσομοίωση του εν λόγω φυσικού προβλήματος θα μπορούσε να προτιμηθεί τυρβώδης αριθμός Schmidt μεγαλύτερος του 0.9, όπως η τιμή 1.2, η οποία τιμή έδωσε καλύτερα αποτελέσματα σε δύο θέσεις μετρούμενων συγκεντρώσεων (Tower B & Tower C).

Η θερμοκρασία του αέρα αποτέλεσε παράμετρο περαιτέρω μελέτης. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, η επικρατούσα θερμοκρασία ήταν οι 290K (17⁰ C). Αποφασίστηκε η διερεύνηση της συμπεριφοράς της συγκέντρωσης του ρύπου σε ενδεχόμενη αυξομείωση της θερμοκρασίας του αέρα, σε συνθήκες ευστάθειας (ατμοσφαιρικές συνθήκες πειράματος MUST). Το θερμοκρασιακό εύρος των υπό εξέταση προσομοιώσεων περιελάμβανε τις εξής θερμοκρασίες: 275.15 K, 279.15K, 284.15K, 290K, 296.15K, 302.15K. Η θερμοκρασία των κοντέινερ ήταν 297K. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η συγκέντρωση των ρύπων αυξάνεται σε χαμηλές θερμοκρασίες/υψηλή πυκνότητα αέρα αλλά είναι εμφανής μόνο με τη χρήση τοπικής πυκνώσης. Η αύξηση της πυκνότητας σημαίνει αύξηση του αριθμού Reynolds και πιθανότατα συνδέεται με μεταβολή των τοπικών χαρακτηριστικών της ροής στις θέσεις των πύργων. Τελικά, στην θερμοκρασία των 302.15K παρατηρείται η μικρότερη συγκέντρωση ρύπου.

Η εξέταση των διαφορετικών γωνιών πρόσπτωσης του ανέμου βασίστηκε στην εξ' ορισμού σταθερή διακύμανση της γωνίας του ανέμου για τη μελετηθείσα δοκιμή 16. Προσομοιώθηκαν οι γωνίες $\varphi = -42^0$ και $\varphi = -54^0$, δηλαδή $\pm 6^0$ από την κύρια γωνία πρόσπτωσης του ανέμου $\varphi = -48^0$. Η συμφωνία των υπολογιστικών αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα πειραματικά εξαρτάται από τη θέση και τη μικρή γωνία απόκλισης της προσπίπτουσας κατεύθυνσης ανέμου. Για τις κατακόρυφες συγκεντρώσεις, προέκυψε ότι στον πύργο B (Tower B), οι RANS προσομοιώσεις υπερεκτιμούν τη συγκέντρωση για κάθε γωνία του ανέμου, ενώ στον πύργο D (Tower D) σημειώνεται ότι και για τις τρεις γωνίες ανέμου, η μέση συγκέντρωση υποεκτιμάται και συγκεκριμένα μηδενίζεται. Στους πύργους Tower C & Main Tower, η μέση συγκέντρωση του ρύπου είναι πολύ ευαίσθητη σε μικρές αποκλίσεις της προσπίπτουσας γωνίας του ανέμου και αυτό γιατί οι πύργοι αυτοί βρίσκονται κοντά στην άκρη του πλουμίου όπου οι οριζόντιες κλίσεις της συγκέντρωσης είναι ισχυρές με αποτέλεσμα οι μεταβολές των συγκεντρώσεων να υπερβαίνουν το 100%. Όσον αφορά τις οριζόντιες συγκεντρώσεις ακολουθείται η ίδια συμπεριφορά με τις κατακόρυφες (δηλαδή οι γωνίες $\varphi = -48^0$ και $\varphi = -54^0$ υπερεκτιμούν τη συγκέντρωση, η $\varphi = -42^0$ την υποεκτιμά) αλλά με μικρότερες αποκλίσεις από τις πειραματικές τιμές.

Τέλος, μελετήθηκε η επίδραση των τριών ατμοσφαιρικών καταστάσεων στη διασπορά του ρύπου. Οι συνθήκες του πειράματος MUST αφορούσαν κατάσταση ευστάθειας. Εδώ εφαρμόστηκε κοινή τιμή ταχύτητας του αέρα $\{ u_{(y=4m)} = 4.49 \text{ ms}^{-1} \}$ και ύψους τραχύτητας στις 3 καταστάσεις ατμόσφαιρας. Τα δεδομένα εισόδου της τυρβώδους κινητικής ενέργειας υπολογίστηκαν από βιβλιογραφικές σχέσεις. Τα αποτελέσματα των κατακόρυφων μέσων τιμών των συγκεντρώσεων έδειξαν ότι κυμαίνονται σε χαμηλότερα επίπεδα στην περίπτωση ασταθούς ατμόσφαιρας και σε υψηλότερα στην περίπτωση ευσταθούς ατμόσφαιρας. Η παραμετρική ανάλυση του ύψους τραχύτητας έδωσε ανεπαίσθητες διαφορές ως προς τις τιμές των συγκεντρώσεων λόγω της επικρατέστερης επίδρασης της γεωμετρίας των κτιρίων.

5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Ένα πρόβλημα όπως αυτό που εξετάστηκε και αφορά τη διασπορά ρύπου σε αστική περιοχή, για να εξελιχθεί και να αποτελέσει αντικείμενο μεταγενέστερης έρευνας θα πρέπει να αναλυθεί ως προς τρεις βασικούς άξονες: τη γεωμετρία, τη φυσική του προβλήματος και το αριθμητικό μέρος της υπολογιστικής προσομοίωσης.

Αναφορικά με την πρώτη παράμετρο, το πείραμα πεδίου MUST αποτέλεσε μια πρώτη προσπάθεια προσομοίωσης αστικού περιβάλλοντος που όπως μαρτυρά και το όνομά του αποτελεί μέτρια αστική πολυπλοκότητα. Έτσι λοιπόν, μια εναλλακτική πρόταση θα ήταν η αλλαγή γεωμετρικής διάταξης και η επιλογή μιας γεωμετρίας πιο «κοντά» στις σύγχρονες αστικές πόλεις. Η βιβλιογραφική έρευνα υποδεικνύει πειράματα που έχουν λάβει σε αεροσήραγγα και αφορούν την ημι-εξιδανικευμένη πόλη Michel-Stadt. Σχεδιάστηκε έχοντας ως πρότυπο τυπικές κεντροευρωπαϊκές πόλεις στις οποίες υπάρχουν εσωτερικές αυλές στα οικοδομικά τετράγωνα και οι δρόμοι δεν ακολουθούν συγκεκριμένη ρυμοτομία. Η πόλη, διαστάσεων 1320 x 830 m, περιλαμβάνει πλατείες, κάθετους και λοξούς δρόμους με διακλαδώσεις διαφόρων ειδών και οικοδομές περίπλοκου σχήματος. Η ύπαρξη αναλυτικών και πολύ καλά τεκμηριωμένων αναλύσεων αποτελεί ισχυρό επιχείρημα διότι η ύπαρξη συγκρίσιμων πειραματικών δεδομένων αποτελεί οδηγό για την υπολογιστική προσομοίωση. Επιπλέον, στη βάση δεδομένων περιλαμβάνεται και ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα ίσης τραχύτητας με την πόλη, χωρίς όμως την ύπαρξη κτιρίων. Το οριακό στρώμα αυτό για το οποίο υπάρχουν αναλυτικές μετρήσεις, μπορεί να θεωρηθεί ως είσοδος για την πόλη και έτσι υπάρχει ακρίβεια στις οριακές συνθήκες εισόδου. Μια ακόμη ενδιαφέρουσα περίπτωση μελέτης πειράματος είναι η οδική χαράδρα. Το εργαστήριο κτιρίων & περιβαλλοντικής αεροδυναμικής του Karlsruhe Institute of Technology KIT (Γερμανία), έχει διεξάγει πειράματα σε αεροσήραγγα προσομοίωσης οδικής χαράδρας που μελετούσε τη διασπορά του ρύπου με ύπαρξη δέντρων. Σημαντικό πλεονέκτημα είναι η διάθεση των πειραματικών δεδομένων στην ιστοσελίδα του εργαστηρίου τους (<http://www.windforschung.de/CODASC.htm>)

Αναφορικά με τη φυσική του προβλήματος, και παραμένοντας στην γεωμετρία της εξιδανικευμένης πόλης του πειράματος MUST, η αντιμετώπιση της εκπομπής του ρύπου ως ένα transient φαινόμενο σε συνδυασμό με την ενσωμάτωση ανισοτροπίας της τύρβης θα αποτελούσε μιας πρώτης τάξεως επαφή με τη μεθοδολογία LES (subgrid scale closure models or Large Eddy Simulation, LES). Η χρήση των προτύπων υποπλεγματικής κλίμακας ή προσομοίωσης μεγάλων δινών (LES), βασίζονται στην υπόθεση ότι η τυρβώδης κίνηση θα μπορούσε να αναλυθεί σε συνιστώσα μεγάλης κλίμακας και συνιστώσα υποπλεγματικής (μικρής) κλίμακας, έτσι ώστε ο διαχωρισμός των δύο να μην έχει σημαντική επίδραση στην εξέλιξη των μεγάλων κλιμάκων. Τα πρότυπα αυτά επιλύουν τις χρονικά εξαρτημένες εξισώσεις της ροής για τη μέση ροή και για τις μέγιστες δίνες στις τρεις διαστάσεις του χώρου,

ενώ μοντελοποιούν τις επιδράσεις των μικρότερων δινών. Μια τέτοια προσπάθεια θα απαιτούσε και κατάλληλη ανάπτυξη σε κώδικα της μεθοδολογίας μεγάλων δινών LES.

Η τελευταία πρόταση συνδέεται με την τρίτη παράμετρο που προαναφέρθηκε, δηλαδή το αριθμητικό κομμάτι του προβλήματος. Η επιλογή κατάλληλου αλγορίθμου επίλυσης μεθοδολογίας LES αποτελεί αντικείμενο έρευνας και ενδιαφέροντος.

Βιβλιογραφία

Barron R.M, Ali A. Salehi Neyshabouri, (2003) Effects of under-relaxation factors on turbulent flow simulations, *Int. J. Numer. Meth. Fluids* ,42:923–928.

Biltoft, C.A., (2001) Customer report for Mock Urban Setting Test. DPG Document No. WDTC-FR- 01-121, West Desert Test Center, U.S. Army Dugway Proving Ground, Dugway, Utah, USA.

Camelli FE, Lohner R., Hanna SR (2005) VLES study of MUST experiment. In: 43rdAIAAAerospace Meeting and Exhibit, January 10–13, Reno, Nevada, paper 1279, 19 pp

Cebeci, T., Smith, A.M.O., (1974). *Analysis of Turbulent Boundary Layers (Applied Mathematics and Mechanics, 15)*, Academic Press, 404 pp. ISBN 0121646505

Cheng Y, Lien FS, Yee E, Sinclair R (2003) A comparison of large eddy simulations with a standard $k-\varepsilon$ Reynolds-averaged Navier–Stokes model for the prediction of a fully developed turbulent flow over a matrix of cubes. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 91:1301–1328

Coceal O, Thomas TG, Castro IP, Belcher SE (2006) Mean flow and turbulence statistics over groups urban-like cubical obstacles. *Boundary-Layer Meteorol* 121:491–519

Di Sabatino S, Buccolieri, Olesen H, Ketzler M, Berkowicz R, Franke J, Schatzmann M, Schlünzen H, Leitl B, Britter R, Borrego C, Costa AM, Trini-Castelli S, Reisin T, Hellsten A, Saloranta J, Moussiopulos N, Barmpas F, Brzozowski K, Goricsan I, Balczò M, Bartzis J, Efthimiou G, Santiago JL, Martilli A, Piringer M, Hirtl M, Baklanov A, Nuterman R, Starchenko A (2009) COST 732: in practice: the MUST model evaluation exercise. *Int J Environ Pollut* (in press).

Dobre A, Arnold SJ, Smalley RJ, Boddy JWD, Barlow JF, Tomlin AS, Belcher SE (2005) Flow field measurements in the proximity of an urban intersection in London, UK. *Atmos Environ* 39:4647–4657

Flaherty JE, Stock D, Lamb B (2007) Computational fluid dynamic simulations of plume dispersion in urban Oklahoma City. *J Appl Meteorol Clim* 46:2110–2126

Gatski, T.B., Speziale, C.G., 1993. On explicit algebraic stress models for complex turbulent flows. *Journal of Fluid Mechanics* 254, 59–78.

Google Sketch up 2016, <http://www.sketchup.com/>

Hanna SR, Tehranian S, Carissimo B, Macdonald RW, Lohner R (2002) Comparisons of model simulations with observations of mean flow and turbulence within simple obstacle arrays. *Atmos Environ* 36:5067–5079.

Jones, W.P., Launder, B.E., (1972). The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 15, 301–314.

Kato M., Launder B.E., (1993). The modeling of turbulent flow around stationary and vibrating square cylinders. Proceedings of the Ninth Symposium on Turbulent Shear Flows, Kyoto, Japan, pp. 10-4-1–10-4-6.

Kim JJ, Baik JJ (2004) A numerical study of effects of ambient wind direction on flow and dispersion in urban street canyons using the RNG $k-\varepsilon$ turbulence model. Atmos Environ 38:3039–3048

Koeltzsch, K., (2000). The height dependence of the turbulent Schmidt number within the boundary layer. Atmospheric Environment 34, 1147–1151.

Leitl B., Bezpalcova K., Harms F (2007) Wind Tunnel Modelling Of The MUST Experiment. In: 11th international conference on harmonisation within atmospheric dispersion modelling for regulatory purposes, Cambridge, July 2–5, UK, 5 pp

Mavroidis, I., Andronopoulos, S., Bartzis, J.G. (2012) Computational simulation of the residence of air pollutants in the wake of a 3-dimensional cubical building. The effect of atmospheric stability. Atmospheric Environment 63, 189–202

Menter, F. R. (1993), Zonal Two Equation $k-\omega$ Turbulence Models for Aerodynamic Flows, AIAA Paper 93-2906.

Meroney RN, Pavegeau M, Rafailidis S, Schatzmann M (1996) Study of line source characteristics for 2D physical modelling of pollutant dispersion in street canyons. J Wind Eng Ind Aerodyn 62:37–56

Michioka M, Sato A (2009) Numerical simulations of gas dispersion in a residential area. In: The seventh international conference on urban climate, Yokohama, June 29–July 3, Japan, 4 pp

Milliez M, Carissimo B (2007) Numerical simulations of pollutant dispersion in an idealized urban area for different meteorological conditions. Boundary-Layer Meteorol 122:321–342.

Rodi, W., (1991). Experience with two-layer models combining the $k-\varepsilon$ model with a one-equation model near the wall. AIAA-91-0216, 29th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 7-10 January 1991, Reno, Nevada, USA.

Roland Stull. (2015). Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science, Chapter 18: Atmospheric Boundary Layer, 707pp

Santiago, J.L., Martin, F., 2005. Modelling the air flow in symmetric and asymmetric street canyons. International Journal of Environment and Pollution 25 (1-2), 145–154.

Santiago JL, Martilli A, Martin F (2007) CFD simulation of airflow over a regular array of cubes. Part I: three dimensional simulation of the flow and validation with wind-tunnel measurements. Boundary-Layer Meteorol 122:609–634

Santiago JL, A.Dejoan, A.Martilli, F.Martin, A.Pinelli (2010) Comparison between Large-Eddy Simulation and Reynolds-Averaged Navier–Stokes Computations for the MUST Field Experiment. Part I: Study of the Flow for an Incident Wind Directed Perpendicularly to the Front Array of Containers, Boundary-Layer Meteorol, 135:109–132

Santiago JL, A.Dejoan, A.Martilli, F.Martin, A.Pinelli (2010) Comparison between Large-Eddy Simulation and Reynolds-Averaged Navier–Stokes Computations for the MUST Field Experiment. Part II: Effects of Incident Wind Angle Deviation on the Mean Flow and Plume Dispersion, *Boundary-Layer Meteorol*, 135:133–150

Spalart, P.R., Allmaras, S.R., 1992. A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows. AIAA paper 92-0439, 30th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 6-9 January 1992, Reno, Nevada, USA.

Speziale, C.G., 1987. On nonlinear $k-l$ and $k-\varepsilon$ models of turbulence. *Journal of Fluid Mechanics* 178, 459–475.

Tecplot 360 EX 2016, <http://www.tecplot.com/>

Tominaga, Y., Stathopoulos, T., (2007). Turbulent Schmidt numbers for CFD analysis with various types of flow field. *Atmospheric Environment* 41, 8091–8099.

Tominaga, Y., Stathopoulos, T., (2009). Numerical simulation of dispersion around an isolated cubic building: Comparison of various types of $k-\varepsilon$ models. *Atmospheric Environment* 43, 3200–3210.

Tsai, M.Y., Chen, K.S., (2004) Measurements and three-dimensional modeling of air pollutant dispersion in an Urban Street Canyon. *Atmospheric Environment* 38

Tseng Y-H, Meneveau C., Parlange M (2006) Modeling flow around bluff bodies and predicting urban dispersion using large eddy simulation. *Environ Sci Technol* 40:2653–2662

Tsuchiya, M., Murakami, S., Mochida, A., Kondo, K., Isihida, Y., (1997). Development of a new $k-\varepsilon$ model for flow around pressure fields around bluff body. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 67–68, 169–182.

Verona A., (2009). Monin-Obukhov Similarity Theory Applied to Offshore Wind Data. Validation of Models to Estimate the Offshore Wind Speed Profile in the North Sea. Master of Science Thesis, Delft University of Technology, 30-33

Versteeg H.K., Malalasekera W., (2007) An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method, second ed., Pearson Education Limited, Ch 3. ISBN 9780131274983.

Wilcox D., (1998), *Turbulence Modeling for CFD*, DCW industries, La Canada, California.

Xie Z, Castro IP (2006) LES and RANS for turbulent flow over arrays of wall-mounted obstacles. *Flow Turbul Combust* 76:291–312.

Xie Z, Castro IP (2009) Large-eddy simulation for flow and dispersion in urban streets. *Atmos Environ* 43:2174–2185.

Yakhot A, Anor T, Liu H, Nikitin N (2006) Direct numerical simulation of turbulent flow around a wall mounted cube: spatio-temporal evolution of large-scale vortices. *J Fluid Mech* 566:1–9

Yakhot, V. and Orszag, S.O. (1986) Renormalization group methods in turbulence, *Journal of Scientific Computing* 1(1), 1–51

Yee, E., Bilito, C.A., (2004) Concentration fluctuation measurements in a plume dispersing through a regular array of obstacles. *Boundary-Layer Meteorology* 111, 363–415.

Yee E, Gailis RM, Hill A, Hilderman T, Kiel D (2006) Comparison of wind tunnel and water-channel simulations of plume dispersion through a large array of obstacles with a scales field experiment. *Boundary-Layer Meteorol* 121:389 – 432

Ευθυμίου, Γ.Χ., (2012). Πρόγνωση ατομικής έκθεσης με μοντέλα υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη, 85-87 σελ

Κουτσουράκης Ν.,(2010).Ροή και Διασπορά Ρύπων σε Οδικές Χαράδρες: Ανασκόπηση. *Τεχνικά Χρονικά Επιστημονική, Έκδοση ΤΕΕ 1 (1)*, 175–189 σελ

Κουτσουράκης Ν. (2014) Τυρβώδης ροή και διασπορά ρύπων στο αστικό περιβάλλον, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη, Κεφ.2

Μαρκάτος Ν., (2014) Σημειώσεις Τύρβης στο μάθημα «Ροή Ρευστών (Μεταφορά Ορμής-Θερμότητας και Μάζας)», ΔΠΜΣ Υπολογιστική Μηχανική

Μπούρης Δ, (2007) Εγχειρίδιο υπολογιστικού εργαλείου (caffa3d-mlr) για την αριθμητική διερεύνηση ρευστομηχανικών προβλημάτων, Τμήμα Μηχανικών Διαχείρισης Ενεργειακών Πόρων, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας

Πετρίδου Μ.Α , Περιβολάρης Γ., Μπούρης Δ.Γ, (2009), Αριθμητική μελέτη πεδίου ροής στο εξωτερικό περιβάλλον δομημένων περιοχών, ΡΟΗ 2010,7^ο Πανελλήνιο συνέδριο για τα Φαινόμενα Ροής Ρευστών, Θεσσαλονίκη, 12-13 Νοεμβρίου 2010,2-3 σελ

Ιστοσελίδες

<http://www.windforschung.de/CODASC.htm>