



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ**

«ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ»

ΜΟΝΑΔΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΤΟΞΙΚΩΝ ΟΥΣΙΩΝ
ΕΚΛΥΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΑΠΟΘΗΚΕΣ ΦΥΤΟΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΩΝ
ΠΡΟΙΟΝΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΔΗΛΩΣΗ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ – ΕΦΑΡΜΟΓΗ
ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΟ ΟΙΚΟΔΟΜΙΚΟ ΑΝΑΓΛΥΦΟ**

ΜΠΑΡΚΟΥΤΣΟΣ Κ. ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : Α. Μπουντουβής
ΣΥΝΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : Ν. Μαρκάτος**

ΑΘΗΝΑ 2013



**NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CHEMICAL ENGINEERING
INTERDISCIPLINARY POST-GRADUATE PROGRAM**

“COMPUTATIONAL MECHANICS”

UNIT OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

MASTER THESIS

**MATHEMATICAL SIMULATION OF TOXIC SUBSTANCES
DISPERSION IN CASE OF FIRE IN PESTICIDES WAREHOUSES –
APPLICATION IN COMPLEX BUILDING CONFIGURATION**

BARKOUTSOS K. PANAGIOTIS

**SUPERVISOR : A. Boudouvis
CO-SUPERVISOR : N. Markatos**

ATHENS 2013

Στον παππού μου..

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στη παρούσα μεταπτυχιακή εργασία γίνεται μελέτη της διασποράς ρυπαντών σε περίπτωση πυρκαγιάς σε αποθήκες χημικών – φυτοπροστατευτικών προϊόντων. Η συγκεκριμένη εργασία αποτελεί εξέλιξη προηγούμενων εργασιών που εκπονήθηκαν στη σχολή Χημικών Μηχανικών και επικεντρώνεται στην μελέτη της επιρροής γειτονικών κτιρίων διαφορετικής γεωμετρίας στην διασπορά των αερίων ρυπαντών. Η γνώση και κατανόηση του πεδίου ροής και της συγκέντρωσης ρυπαντών υπό διάφορες μετεωρολογικές και ανεμολογικές συνθήκες, σε απλή και σύνθετη μορφή οικοδομικών συγκροτημάτων, είναι ιδιαίτερα σημαντική στον σχεδιασμό και ανάπτυξη σχεδίων αντιμετώπισης βιομηχανικών ατυχημάτων μεγάλης έκτασης.

Η εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής της σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου στα πλαίσια του Διατμηματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών «Υπολογιστικής Μηχανικής». Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του εργαστηρίου για την συνδρομή και την αμέριστη βοήθεια για την διεξαγωγή της παρούσας εργασίας. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω:

- Τον επιβλέποντα Καθηγητή και Κοσμήτορα της Σχολής Χημικών Μηχανικών κ. Α. Μπουντουβή για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την δυνατότητα που μου πρόσφερε για την εκπόνηση μιας εργασίας σε ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.
- Τον συνεπιβλέποντα και διευθυντή του εργαστηρίου υπολογιστικής ρευστομηχανικής, ομότιμο καθηγητή και τ. Πρύτανη τον κ. Ν. Μαρκάτο για την ανάθεση του παρόντος θέματος, για την συνολική εποπτεία της εργασίας και γενικά για την βοήθεια του στα θέματα υπολογιστικής μηχανικής
- Τον εργαστηριακό υπεύθυνο κ. Μ. Χριστόλη, Περιβαλλοντολόγο DEA και επιστημονικό συνεργάτη, για την ακούραστη και συνεχή καθοδήγηση του καθ' όλη την εργαστηριακή μου πορεία ως προπτυχιακό αλλά και μεταπτυχιακό φοιτητή και για την ιδιαίτερα εποικοδομητική συνεργασία. Επίσης, να τον ευχαριστήσω για την διδασκαλία και τον χρόνο που αφιέρωσε για την βελτίωση και ανάπτυξη της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.
- Τον κ. Γ. Σιδερή, Χημικό Μηχανικό Ε.Μ.Π., η διπλωματικής εργασία του οποίου αποτέλεσε το έναυσμα της ενασχόλησης μου με το συγκεκριμένο θέμα. Επίσης, να τον ευχαριστήσω για την βοήθεια που παρείχε σε θέματα υπολογιστικού κώδικα.

Τέλος, θεωρώ υποχρέωση μου να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου που μου στάθηκαν σε όλη την πορεία μου ως φοιτητής και έδειξαν αμέριστη κατανόηση.

Αθήνα 05/09/2013

Μπαρκούτσος Κ. Παναγιώτης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Π.Κ. Μπαρκούτσος, (2013). «Μαθηματική Προσομοίωση Διασποράς Τοξικών Ουσιών σε Περίπτωση Πυρκαγιάς σε Σύνθετο Οικοδομικό Ανάγλυφο Εγκαταστάσεων Αποθήκευσης Φυτοπροστατευτικών Προϊόντων». Μεταπτυχιακή Εργασία, Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2013

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία αποσκοπεί στην μελέτη της διασποράς τοξικών ρύπων σε περίπτωση πυρκαγιάς σε ένα σύνθετο οικοδομικό ανάγλυφο εγκαταστάσεων αποθήκευσης φυτοπροστατευτικών προϊόντων για διάφορους αριθμούς άνωσης. Πιο συγκεκριμένα εξετάζεται η επίδραση ύπαρξης συστιχίας κτιρίων γύρω από μια αποθήκη σε περίπτωση πυρκαγιάς. Στα πρώτα κεφάλαια δίνεται μια γενική περιγραφή σχετικά με τα βιομηχανικά ατυχήματα και ορισμένα σημαντικά στοιχεία σχετικά με το προς μελέτη φυσικό πρόβλημα. Ακολουθεί το μαθηματικό μοντέλο στο οποίο απαριθμούνται οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν το συγκεκριμένο πρόβλημα. Στη συνέχεια περιγράφεται το αριθμητικό μοντέλο της μεθόδου πεπερασμένων όγκων, που αποτελεί τη βασική μέθοδο επίλυσης για την συγκεκριμένη προσομοίωση. Ακολούθως στο κεφάλαιο του αριθμητικού μοντέλου παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μοντέλου, όπως η διακριτοποίηση, το υπολογιστικό πλέγμα, η γεωμετρία καθώς και ο τρόπος σύνθεσης του προβλήματος. Στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων εξετάζεται η αλληλοεπίδραση δύο αποθηκευτικών εγκαταστάσεων, διαφοροποιώντας την μεταξύ τους απόσταση και παρακολουθώντας τις αλλαγές στα επίπεδα συγκέντρωσης του ρύπου στο επίπεδο του εδάφους. Συνολικά, το φαινόμενο εξετάζεται για πέντε διαφορετικούς αδιάστατους αριθμούς άνωσης και έξι διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ των δύο κτιρίων. Η κατανομή των αποτελεσμάτων γίνεται σε καμπύλες αδιάστατης συγκέντρωσης, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα για μια αρχική εκτίμηση-πρόβλεψη της συγκέντρωσης τοξικών ουσιών ανάλογα με την εκάστοτε περίπτωση. Τέλος, γίνεται μια σύγκριση των αποτελεσμάτων με προηγούμενες σχετικές εργασίες και παρατίθενται κάποια ιδιαίτερα χρήσιμα συμπεράσματα.

Λέξεις κλειδιά: πυρκαγιά, αποθήκες φυτοπροστατευτικών προϊόντων, υπολογιστική ρευστοδυναμική, σύνθετο πολεοδομικό ανάγλυφο

ABSTRACT

P.K. Barkoutsos, 2013, “Mathematical Simulation of Dispersion of Toxic Substances from Pesticides Warehouses in Case of Fire in Complex Building Configuration”, Master Thesis, Unit of Computational Fluid Dynamics, School of Chemical Engineering, National Technical University of Athens, Athens 2013.

The aim of the master thesis presented is to study the dispersion of toxic pollutants in case of fire in a warehouse located in a complex building configuration. The parametric analysis examines the influence of weather conditions and urban terrain in the concentration of pollutants on the ground level. Some theoretical background on Industrial Accidents and analysis of the nature of the problem is also presented. The next chapter provides differential equations describing the mathematical problem. Then the numerical model and some points concerning the Finite Volume Method for computational fluid dynamics simulation are highlighted. Furthermore, certain aspects of the mesh, the discretization techniques and the geometry of the field are obtained. In the chapter referring to the results and the parametric analysis the main problem considered is two different height storage facilities, varying the distance between them and monitoring the changes in the levels of concentration of the pollutant at ground level. Overall, the effect is tested for five different dimensionless numbers of buoyancy and six different distances between the two warehouses.. This dimensionless concentration curves obtained at ground level can be used directly by engineers to avoid and overcome any industrial accidents. Finally, there is a comparison with other relevant papers leading to some general important conclusion.

Key words: fire incident, pesticides warehouse, computational fluid dynamics, pollution, complex building configuration

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	12
1.1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	12
1.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	13
2. ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ (Β.Α.Μ.Ε.).....	17
2.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ	17
2.2 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ Β.Α.Μ.Ε.....	22
2.3 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ Β.Α.Μ.Ε.....	22
2.4 ΖΩΝΕΣ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΩΝ ΔΡΑΣΕΩΝ	25
2.5 ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ	26
3. ΦΥΣΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ	27
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	27
3.2 ΤΥΠΙΚΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΠΟΘΗΚΗΣ	27
3.3 ΤΥΠΙΚΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ	28
3.4 ΤΟ ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ.....	29
3.5 ΤΟ ΠΕΔΙΟ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ	30
4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ.....	32
4.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΟΓΚΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ	32
4.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	33
4.2.1 ΟΛΟΚΛΗΡΩΤΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΤΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ.....	33
4.2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ	34
4.3 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ	38
4.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	38
4.3.2 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ SIMPLEST	39
4.3.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	40
4.4 ΟΙ ΤΕΣΣΕΡΙΣ ΒΑΣΙΚΟΙ ΚΑΝΟΝΕΣ.....	40
4.5 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΥΠΟΧΑΛΑΡΩΣΗΣ.....	42
4.5.1 ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΥΠΟΧΑΛΑΡΩΣΗ	42
4.5.2 ΥΠΟΧΑΛΑΡΩΣΗ ΨΕΥΔΟΥΣ ΧΡΟΝΙΚΟΥ ΒΗΜΑΤΟΣ	42
4.6 ΣΥΓΚΛΙΣΗ.....	43
5. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΥΡΒΗΣ.....	44

5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	44
5.2. ΤΑ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ	47
5.3. ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΥΟ ΔΙΑΦΟΡΙΚΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ-ΜΟΝΤΕΛΟ $k \sim \varepsilon$	48
5.4. ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ RNG-derived $k \sim \varepsilon$	52
6. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	54
6.1 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΔΙΑΦΟΡΙΚΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ	54
6.2 ΑΡΧΕΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ – ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΔΙΑΦΟΡΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ	56
6.3 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	57
6.4 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	61
7. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	64
7.1. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΑΝΩΣΗΣ ΚΑΙ ΕΚΘΕΤΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ ΕΞΑΡΤΗΣΗΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΟ ΥΨΟΣ	64
7.2 ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΛΕΓΜΑ	65
7.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ	70
8. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	74
8.1. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	74
8.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	75
9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ	93
9.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	93
9.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ	94
10. ΑΝΑΦΟΡΕΣ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	95

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Διαίρεση του υπολογιστικού πεδίου σε όγκους ελέγχου	34
Εικόνα 2 Στοιχειώδης Όγκος Ελέγχου.....	35
Εικόνα 3 Σχέδιο του Da Vinci για την τυρβώδη κίνηση των σωματιδίων του ρευστού.....	44
Εικόνα 4 Χρονικοί περίοδοι μελέτης της τύρβης, σύμφωνα με τους <i>Champan</i> και <i>Tobak</i>	46
Εικόνα 5 Συνολικό πεδίο ροής.....	71
Εικόνα 6 Τμήμα του πεδίου ροής στο οποίο βρίσκονται οι αποθήκες....	72
Εικόνα 7 Το υπολογιστικό πλέγμα με τις σχετικές πυκνώσεις ανά υποπεριοχή.....	73
Εικόνα 8 Διανύσματα ταχύτητας υπολογιστικού πεδίου.....	76
Εικόνα 9 Διανύσματα ταχυτήτων γύρω από τα κτίρια	77
Εικόνα 10 Κατανομή συγκέντρωσης γύρω από τα κτίρια.....	78

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1	Ζώνες προστατευτικών δράσεων και οριακές τιμές	26
Πίνακας 2	Κατηγορίες Πυρκαγιάς.....	28
Πίνακας 3	Τιμές των σταθερών του μοντέλου k~ε	50
Πίνακας 4	Τιμές των σταθερών του μοντέλου RNG k~ε.....	60
Πίνακας 5	Οριακές Συνθήκες	63
Πίνακας 6	Διάσταση z για διάφορες αποστάσεις μεταξύ των κτιρίων ...	65
Πίνακας 7	Τιμές διαστάσεων πεδίου ροής	66
Πίνακας 8	Μήκη υποπεριοχών κατά x	66
Πίνακας 9	Μήκη υποπεριοχών κατά y	66
Πίνακας 10	Μήκη υποπεριοχών κατά z	67
Πίνακας 11	Υπολογιστικά Κελιά κατα x.....	67
Πίνακας 12	Υπολογιστικά Κελιά κατα y.....	67
Πίνακας 13	Υπολογιστικά κελιά κατά z.....	68
Πίνακας 14	Αριθμός κελιών υπολογιστικού πλέγματος	68
Πίνακας 15	Συγκεντρωτικά στοιχεία υπολογιστικού πλέγματος	69
Πίνακας 16	Υποπεριοχές στις οποίες υπάρχουν τα κτίρια	70
Πίνακας 17	Τιμές Παραμέτρων για την Προσομοίωση Περιπτώσεων ...	74

ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1 Αδιάστατη Συγκέντρωση για διάφορες αποστάσεις κτιρίων για $F/U^3L=0$	79
Διάγραμμα 2 Αδιάστατη Συγκέντρωση για διάφορες αποστάσεις κτιρίων για $F/U^3L=0.01$	80
Διάγραμμα 3 Αδιάστατη Συγκέντρωση για διάφορες αποστάσεις κτιρίων για $F/U^3L=0.02$	81
Διάγραμμα 4 Αδιάστατη Συγκέντρωση για διάφορες αποστάσεις κτιρίων για $F/U^3L=0.05$	82
Διάγραμμα 5 Αδιάστατη Συγκέντρωση για διάφορες αποστάσεις κτιρίων για $F/U^3L=0.1$	83
Διάγραμμα 6 Αδιάστατη Συγκέντρωση για διάφορους αριθμούς άνωσης και απόσταση $1H$	85
Διάγραμμα 7 Αδιάστατη Συγκέντρωση για διάφορους αριθμούς άνωσης και απόσταση $2H$	86
Διάγραμμα 8 Αδιάστατη Συγκέντρωση για διάφορους αριθμούς άνωσης και απόσταση $4H$	87
Διάγραμμα 9 Αδιάστατη Συγκέντρωση για διάφορους αριθμούς άνωσης και απόσταση $6H$	88
Διάγραμμα 10 Αδιάστατη Συγκέντρωση για διάφορους αριθμούς άνωσης και απόσταση $8H$	89
Διάγραμμα 11 Αδιάστατη Συγκέντρωση για διάφορους αριθμούς άνωσης και απόσταση $10H$	90

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στην σημερινή εποχή παράλληλα με την συνεχή εξέλιξη και τη ταχύτερη ανάπτυξη που παρατηρείται στον βιομηχανικό κλάδο, έχουν αυξηθεί και οι τεχνολογικοί κίνδυνοι και η πιθανότητα εκδήλωσης βιομηχανικών ατυχημάτων.

Σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές, οι περιπτώσεις βιομηχανικών ατυχημάτων μεγάλης έκτασης (B.A.M.E.) δεν είναι σπάνιες και σε πολλές περιπτώσεις οι συνέπειες αυτών των ατυχημάτων δεν περιορίζονται στο βιομηχανικό χώρο. Οι επιπτώσεις έχουν τόσο οικονομικό και κοινωνικό αντίκτυπο όσο και περιβαλλοντικό και για το λόγο αυτό η προσπάθεια αποφυγής τέτοιων συμβάντων είναι ιδιαίτερα σημαντική και αποτελεί σημαντικό θέμα για την εκάστοτε βιομηχανία. Για το λόγο αυτό βασικό μέλημα της κάθε εγκατάστασης που συγκαταλέγεται στις επικίνδυνες μονάδες, σύμφωνα με τις οδηγίες SEVESO I & II, είναι η πρόληψη και η δημιουργία σχεδίου αντιμετώπισης τέτοιων δυσμενών καταστάσεων.

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η προσομοίωση διασποράς τοξικών ουσιών σε περίπτωση πυρκαγιάς σε εγκαταστάσεις αποθήκευσης φυτοπροστατευτικών προϊόντων για σύνθετο οικοδομικό ανάγλυφο. Με βάση αυτή τη προσομοίωση παρατηρείται ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζει τη διασπορά ρυπαντών κατά την πυρκαγιά σε μία αποθήκη, η ύπαρξη γειτονικών κτιρίων (διαφορετικής γεωμετρίας). Επίσης, μπορεί να γίνει πρόβλεψη για την συγκέντρωση του ρύπου στο επίπεδο του εδάφους, ώστε να σχεδιαστεί το ανάλογο σχέδιο δράσης για περίπτωση πυρκαγιάς. Η βασική επιλογή σεναρίων γίνεται με τη μέθοδο επιλογής της δυσμενέστερης περίπτωσης, ώστε ο σχεδιασμός να είναι επιτυχής και να μην υπάρχει περίπτωση αποτυχίας.

Η παρούσα εργασία αποτελεί συνέχεια της έρευνας που έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια στην Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής στη Σχολή Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. για την προσομοίωση των πεδίων ροής και συγκεντρώσεων τοξικών ουσιών γύρω από κτίρια σε κατάσταση πυρκαγιάς, με τη χρήση των αριθμητικών μοντέλων και τη παραμετροποίηση των όρων πηγής. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται αναπτύχθηκε και χρησιμοποιείται από την Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής με ιδιαίτερα ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Για την επίλυση του τρισδιάστατου πεδίου ροής και συγκεντρώσεων χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας PHOENICS v. 3.4, ενώ για την προσομοίωση της τυρβώδους ροής επιλέχθηκε το μοντέλο RNG $k-\epsilon$. Για την ευκολότερη και ταχύτερη επίλυση του προβλήματος το πεδίο ροής διαιρέθηκε σε επιμέρους υποπεριοχές και σε

κάθε μία από αυτές έγινε κατάλληλη επιλογή πυκνώσης του πλέγματος, ώστε αφενός να διασφαλίζεται η ανεξαρτησία των αποτελεσμάτων από την πυκνότητα του πλέγματος και αφετέρου ο υπολογιστικός χρόνος να μην είναι απαγορευτικός.

1.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Η προσομοίωση της διασποράς τοξικών ρύπων σε περίπτωση πυρκαγιάς και σε σύνθετο ανάγλυφο αποτελεί ένα ιδιαίτερα δύσκολο εγχείρημα και η κατανόηση των σχετικών φαινομένων αποτελεί πρόκληση για την επιστημονική κοινότητα. Η πολυπλοκότητα του ροϊκού πεδίου οφείλεται στο γεγονός ότι επηρεάζεται από πολυάριθμους παράγοντες, όπως τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αποθηκών, τα χαρακτηριστικά της φωτιάς οι κρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες, καθώς και το τοπογραφικό και πολεοδομικό ανάγλυφο της περιοχής. Παράλληλα, προσπάθειες έχουν γίνει για την προσομοίωση διασποράς του πλουμίου που βασίζεται κυρίως σε εμπειρικές παρατηρήσεις και διαστατική ανάλυση, που όμως άρχισε να κερδίζει έδαφος τα τελευταία χρόνια λόγω της μεγάλης υπολογιστικής ισχύος που απαιτείται.

Τα διαθέσιμα μοντέλα για την προσομοίωση της διασποράς τοξικών ρύπων πυρκαγιάς-πλουμίου διαχωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες: τα χωρικά ή μοντέλα τύπου Gauss και τα ημιεμπειρικά ή αλλιώς μοντέλα υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Εκτεταμένη έρευνα σχετικά με τα χωρικά μοντέλα έχει πραγματοποιηθεί από πλήθος ερευνητών (*Turner, 1985; Carter, 1989; Wilson, 1993; Zonato et al., 1993; Fisher et al., 2001*). Τα κύρια χαρακτηριστικά των παραπάνω μοντέλων είναι η χρήση γκαουσιανής κατανομής της συγκέντρωσης ρύπων οι οποίοι εκπέμπονται από σχετικά μεγάλο ύψος, οπότε η εφαρμογή τους σε περιπτώσεις εκπομπής ρύπων από αποθήκες χημικών δεν είναι πλήρως αιτιολογημένη. Τα μοντέλα υπολογιστικής ρευστομηχανικής βασίζονται στις διαφορικές εξισώσεις κίνησης και μεταφοράς μάζας/θερμότητας και έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς από πολλούς ερευνητές. Το μειονέκτημα των ημιεμπειρικών μοντέλων, βρίσκεται στο γεγονός ότι απαιτούν μεγάλους υπολογιστικούς χρόνους με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η άμεση εφαρμογή τους σε πραγματικούς χρόνους.

Η πρώτη προσπάθεια προσομοίωσης πυρκαγιών με χρήση ημιεμπειρικών μοντέλων πραγματοποιήθηκε από τους *Markatos et al. (1982)*, ενώ οι *Ghoniem et al. (1993)* και *Zhang και Ghoniem (1993, 1994a, b)* παρουσίασαν Λαγκραζιανές αριθμητικές τεχνικές για την επίλυση των εξισώσεων, βασιζόμενοι στη μέθοδο των δινών (vortex method) για διαφορετικές καταστάσεις στρωματοποιημένης ατμόσφαιρας. Πιο συγκεκριμένα, οι *Ghoniem et al. (1993)* ανέπτυξαν ένα πρότυπο μοντέλο με σκοπό την προσομοίωση διασποράς και απόθεσης πλουμίου από μεγάλες πυρκαγιές για ομογενή ατμόσφαιρα και επίπεδο έδαφος. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην περιγραφή της καθοδικής τροχιάς του πλουμίου καπνού καθοδηγούμενο από πλευρικό άνεμο, καθώς και τη διασπορά του στο έδαφος.

Αργότερα, οι *Zhang & Ghoniem (1993; 1994a; 1994b)* προχώρησαν στην ανάπτυξη ενός πολυδιάστατου αριθμητικού μοντέλου, με σκοπό την περιγραφή της ανύψωσης και διασποράς πλουμίου καπνού σε ουδέτερα στρωματοποιημένη ατμόσφαιρα. Για την επίλυση των εξισώσεων που διέπουν το φαινόμενο έγινε χρήση

Λαγκρανζιανών τεχνικών, βασισμένων στην μέθοδο των δινών (vortex method). Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι είναι δυνατό να γίνει πρόβλεψη της τροχιάς του πλουμίου καθώς και της διασποράς των σωματιδίων του. Επίσης, κατέληξαν στο συμπέρασμα πως το πλούμιο ακολουθεί τρία χαρακτηριστικά στάδια τα οποία είναι: i) σύντομη επιτάχυνση, ii) στάδιο σχηματισμού δύο μεγάλων δινών και iii) στάδιο αποσύνθεσης του πλουμίου.

Το 1996 οι *McGrattan et al (1996)* προχώρησαν σε αριθμητική προσομοίωση της ανύψωσης του πλουμίου καπνού από μεγάλης κλίμακας πυρκαγιές. Κάνοντας χρήση του μοντέλου LES (Large Eddy Simulation) σε συνδυασμό με Λαγκρανζιανές τεχνικές για την προσομοίωση των σωματιδίων καπνού, προχώρησαν σε σύγκριση των αποτελεσμάτων με δύο μεγάλης κλίμακας πυρκαγιές, που πραγματοποιήθηκαν στο Newfoundland το 1993 και στο Prudhoe Bay της Αλάσκας το 1994. Πιο συγκεκριμένα, το πείραμα στο Newfoundland πραγματοποιήθηκε υπό την αιγίδα της Καναδικής υπηρεσίας περιβάλλοντος σε συνεργασία με περιβαλλοντικές υπηρεσίες από τις Η.Π.Α και την Ευρώπη. Σκοπός του πειράματος ήταν η ανάλυση της καύσης μεγάλων ποσοτήτων αργού πετρελαίου σε ανοιχτή θαλάσσια έκταση καθώς και η μελέτη των παραγόμενων ρύπων από την πυρκαγιά. Το πείραμα που πραγματοποιήθηκε στο Prudhoe Bay, έγινε από την ACS (*Alaska Clean Seas*) περιελάμβανε τρεις πυρκαγιές μεσαίας έκτασης. Στόχος του πειράματος ήταν η μελέτη της δυνατότητας καύσης γαλακτώματος πετρελαίου. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων έδειξε πως το μοντέλο ανταποκρίνεται ικανοποιητικά για την ενδιάμεση περιοχή κατόπιν από την πηγή της πυρκαγιάς, η οποία εκτείνεται από λίγες δεκάδες μέτρα από τη φωτιά έως λίγες δεκάδες χιλιόμετρα. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι κοντά στην πυρκαγιά η προσέγγιση Boussinesq δεν είναι έγκυρη, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών και της έντονης ακτινοβολίας που αναπτύσσονται στην πηγή. Επίσης, σε μεγάλες αποστάσεις, το ανάγλυφο του εδάφους και οι μετεωρολογικές συνθήκες παίζουν καθοριστικό ρόλο με αποτέλεσμα αρκετές από της παραδοχές, πάνω στις οποίες στηρίζεται το μοντέλο, να παύουν να ισχύουν.

Το 1999 οι *Trelles et al (1999)* διερεύνησαν την αλληλεπίδραση πολλαπλών καπνών-πλουμίων σε σταθερή στρωματοποιημένη ατμόσφαιρα. Βασίζόμενοι στην μέθοδο δινών (vortex method) και στις αριθμητικές μεθόδους των *Baum & McGrattan (1994)* και *McGrattan et al (1996)*, δημιούργησαν ένα αριθμητικό μοντέλο ικανό να περιγράψει με αρκετή ακρίβεια την μεταβατική περιοχή όπου συμβαίνει η ανάμειξη των πλουμίων. Εντός αυτής της περιοχής γίνεται σταδιακή μείωση των στροβιλισμών του καπνού που οφείλονται στην πυρκαγιά, ενώ παράλληλα γίνεται σταδιακή αύξηση των στροβιλισμών που οφείλονται στις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Τα αποτελέσματα του έδειξαν πως οι αλληλεπιδράσεις πολλαπλών πλουμίων καπνού είναι δυνατόν να μεταφέρουν τα σωματίδια του καπνού σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Αυτό συμβαίνει λόγω του μεγαλύτερου ύψους όπου είναι δυνατόν να φτάσουν τα σωματίδια καπνού λόγω της αλληλεπίδρασης των διαφορετικών καπνών πλουμίων.

Το ίδιο έτος οι *Baum & McGrattan (1999)* κάνοντας χρήση της ίδιας μεθοδολογίας με τους *McGrattan et al (1996)* ανέπτυξαν μεθοδολογία για την προσομοίωση μεγάλων βιομηχανικών πυρκαγιών σε υπαίθριο περιβάλλον για στρωματοποιημένη ατμόσφαιρα. Τα σενάρια που θεώρησαν ήταν για πυρκαγιά στην

οροφή της δεξαμενής και πυρκαγιά περιμετρικά της δεξαμενής, εντός των περιοριστικών αναχωμάτων. Το παραπάνω μοντέλο αναπτύχθηκε με σκοπό να μελετηθεί η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία στις παρακείμενες δεξαμενές.

OD.J. Halletal (1998) μελετώντας την συμπεριφορά της ανύψωσης πλουμίων σε περιπτώσεις ύπαρξης διαφορετικών εμποδίων, κατέληξε στην συσχέτιση της άνωσης με ένα αδιάστατο αριθμό άνωσης ο οποίος αποτέλεσε τη βάση για τη μελέτη περιπτώσεων άνωσης και την αδιαστατοποίηση των περιπτώσεων αυτών. Ο αριθμός αυτός εξελίχθηκε και χρησιμοποιήθηκε σε μοντέλα που δημιουργήθηκαν για τον προσδιορισμό συγκεντρώσεων και διασποράς πλουμίου. Καπνού.

Οι **Fischer et al (2001)** ερευνήσαν την συμπεριφορά ανύψωσης πλουμίου καπνού καθώς και την νέα γενιά εμπειρικών μοντέλων για πρόβλεψη της ανύψωσης και διασποράς καπνού πλουμίου από φωτιές λίμνης. Για την πρόβλεψη της ανύψωσης και διασποράς του πλουμίου έγινε χρήση τριών αριθμητικών μοντέλων για την ανάλυση ευαισθησίας των δεδομένων με σκοπό να είναι δυνατή η παραγωγή νέων εξισώσεων που θα επέτρεπαν καλύτερες προβλέψεις. Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε φωτιές λίμνης μεθανόλης/τολουολίου μικρής κλίμακας ($0.06-0.25 \text{ m}^2$) καθώς και βιντεοσκόπηση και επεξεργασία δεδομένων από φωτιά λίμνης αεροπορικού καυσίμου σε δεξαμενή μεγαλύτερων διαστάσεων (294 m^2). Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν πως για ουδέτερες ατμοσφαιρικές συνθήκες, τα δύο θεωρητικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν, απέδωσαν καλύτερη αναπαράσταση της ανύψωσης και διασποράς του πλουμίου από το εμπειρικό μοντέλο για φωτιές λίμνης μικρής έκτασης. Κατέληξαν επίσης πως τα θεωρητικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για φωτιές λίμνης μικρής έκτασης ($\approx 70 \text{ kW}$) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη συμπεριφοράς του πλουμίου και για πολύ μεγαλύτερης έκτασης.

Μερικά χρόνια αργότερα, ο **K.B McGrattan (2003)** εργαζόμενος στο NIST (National Institute of Standards and Technology) ανέπτυξε το αριθμητικό μοντέλο ALOFT (A Large Outdoor Fire Plume Trajectory). Η δημιουργία του παραπάνω αριθμητικού μοντέλου ήταν αποτέλεσμα του συνδυασμού πληροφοριών και δεδομένων σχετικά με την δομή, τροχιά και σύνθεση του πλουμίου καπνού από πυρκαγιές μεγάλης έκτασης. Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει την δυνατότητα υπολογισμού των συγκεντρώσεων ρύπων στο έδαφος για διαφορετικές τοπογραφικές και μετεωρολογικές συνθήκες.

Το 2008 οι **Argyropoulos et al. (2008a; 2008b)** ανέπτυξαν μεθοδολογία για την αριθμητική προσομοίωση της συμπεριφοράς του πλουμίου και της διασποράς τοξικών ρύπων (καπνός, SO_2 , CO) από δεξαμενές καυσίμων σε κατάσταση πυρκαγιάς. Η ανάπτυξη της μεθόδου στηρίζεται στο μοντέλο δύο διαφορικών εξισώσεων RNG $k-\epsilon$. Ταυτόχρονα, έγινε προσπάθεια καθορισμού ζωνών επικινδυνότητας σε συνάρτηση με τις συγκεντρώσεις ρύπων κοντά στο έδαφος, που υπολογίστηκαν από την αριθμητική προσομοίωση. Η θέσπιση των ζωνών επικινδυνότητας παίζει καθοριστικό ρόλο για την ασφάλεια του προσωπικού καταστολής (πυροσβέστες), που θα αντιμετωπίσει την πυρκαγιά, αλλά και των ανθρώπων που ζουν σε γειτονικές περιοχές από το ατύχημα. Τέλος, είναι σημαντικό να ειπωθεί ότι οι συγκεντρώσεις, που υπολογίστηκαν με τη συγκεκριμένη

μεθοδολογία δεν συνιστούν «δόσεις θανατηφόρας επίπτωσης» λόγω της έκθεσης τόσο σε καπνό όσο και των υπολοίπων τοξικών ρύπων (SO₂, CO).

Το 2009 οι *Markatos et al (2009)* προχώρησαν στην ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου για την πρόβλεψη διασποράς τοξικών ρύπων από πυρκαγιά σε δεξαμενή καυσίμων, καθώς και μεθοδολογία για το καθορισμό επικίνδυνων ζωνών περιμετρικά αυτής. Πιο συγκεκριμένα, η αριθμητική προσομοίωση έγινε με την χρήση του αλγόριθμου SIMPLEST, δεύτερης τάξης MUSCL σύστημα με αναβαλλόμενη διόρθωση για τους όρους συναγωγής, CUPID

Την ίδια χρονιά οι *Argyropoulos et al (2009)* ανέπτυξαν μαθηματικό μοντέλο για την υπολογισμό της διασποράς τοξικών ρύπων στο επίπεδο του εδάφους και την ανύψωση πλουμίου καπνού από πυρκαγιά σε μεγάλη δεξαμενή καυσίμων σε ουδέτερα στρωματοποιημένη ατμόσφαιρα και για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου. Στην συνέχεια, προχώρησαν σε σύγκριση των αποτελεσμάτων με υπάρχοντα όρια ασφαλείας όπως το IDLH (Immediately Dangerous to Life or Health).

Το 2009 οι *B.J Devenish και J.M Edwards* προχώρησαν σε ανάπτυξη μοντέλου για την προσομοίωση της διασποράς πλουμίου καπνού που δημιουργήθηκε κατά την διάρκεια της μεγάλης πυρκαγιάς στο Buncfield Oil Depot το 2005 και προχώρησαν στην σύγκριση αυτών με τις υπάρχουσες μετρήσεις. Σκοπός τους ήταν η αξιολόγηση του μοντέλου LES όταν εφαρμόζεται στις εξισώσεις Boussinesq για την αναπαραγωγή των χαρακτηριστικών του παραγόμενου πλουμίου. Επιπλέον, μελέτησαν την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας καθώς και της ατμοσφαιρικής υγρασίας στην δομή και ανάπτυξη του φαινομένου. Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα τους έδειξαν πως είναι δυνατή η χρήση του μοντέλου LES, εφόσον η προσέγγιση δεν αφορά περιοχές κοντά στην πηγή όπου οι δυνάμεις της άνωσης είναι πολύ μεγάλες. Η ατμοσφαιρική υγρασία επιδρά στην αύξηση της άνωσης, γεγονός που οδηγεί στην επακόλουθη αύξηση του ύψους/επιπέδου όπου εμφανίζεται ουδέτερη άνωση. Η ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει μικρή επίδραση στον καθορισμό του μεγίστου ύψους του πλουμίου, παρόλα αυτά σε μεγάλες αποστάσεις από την πηγή διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην εγκάρσια διασπορά του πλουμίου. Ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζεται εξαρτάται από την συγκέντρωση των σωματιδίων καπνού. Στις περιπτώσεις που οι συγκεντρώσεις είναι υψηλές, η ηλιακή ακτινοβολία δεν επηρεάζει.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ (B.A.M.E.)

2. ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ (B.A.M.E.)

Ο 19ος αιώνας έχει χαρακτηριστεί ως ο αιώνας που έγιναν οι σημαντικότερες εφευρέσεις και ως ο αιώνας της βιομηχανικής επανάστασης. Αποτέλεσμα της βιομηχανικής επανάστασης ήταν η δημιουργία της πρώτης βιομηχανικής κοινωνίας στην Αγγλία. Βέβαια, όπως ήταν φυσικό η εκβιομηχάνιση των αγροτικών τότε κοινωνιών συνεχίστηκε παγκοσμίως και δεν παρέμεινε προνόμιο και εξέλιξη που σημειώθηκε μόνο στην Αγγλία.

Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτής της μεταστροφής ήταν η αύξηση της παραγωγής, που οφειλόταν στην εκτεταμένη χρήση και εφαρμογή νέων τεχνικών, που δεν συνδεόταν πια μόνο με την χειρωνακτική εργασία, όπως η αξιοποίηση νέων μορφών ενέργειας (απόσταξη πετρελαίου (1850), πρώτη ιδιωτική γεώτρηση για την εύρεση πετρελαίου).

Ο 20ος αιώνας σημαδεύτηκε από την περαιτέρω χρήση και εφαρμογή των εφευρέσεων και τεχνικών και οδήγησε σε μεγάλες βιομηχανικές παραγωγές και γρήγορους ρυθμούς ανάπτυξης της βιομηχανίας και όχι μόνο. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω δημιουργήθηκαν μεγαλύτεροι και περισσότεροι χώροι αποθήκευσης των προϊόντων αυτών προκειμένου να καλύπτεται η ολοένα και μεγαλύτερη ζήτηση ενέργειας στην παγκόσμια αγορά. Επιπλέον, με την παραπάνω αύξηση υπήρξε και αύξηση των κινδύνων πρόκλησης Βιομηχανικών Ατυχημάτων Μεγάλης Έκτασης (B.A.M.E).

2.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Πριν την αναφορά και ανάλυση Βιομηχανικών Ατυχημάτων Μεγάλης Έκτασης θα ήταν συνετό να γίνει αναφορά σε κάποιους όρους που παίζουν σημαντικό ρόλο στην κατανόηση των συνθηκών και των αιτιών που προκαλούν ένα βιομηχανικό ατύχημα. Είναι επίσης σημαντικό να υπάρχει σωστός διαχωρισμός των εννοιών προκειμένου να μην υπάρχουν παρερμηνείες και λάθη.

Μεγάλο Ατύχημα (MA)

Σύμφωνα με το κείμενο της οδηγίας Seveso I Μεγάλο Ατύχημα ορίζεται ως « ένα γεγονός τέτοιο όπως η εκπομπή, η πυρκαγιά ή η έκρηξη που έχει το χαρακτηριστικό της μεγάλης έκτασης και προέρχεται από μη ελεγχόμενες εξελίξεις κατά τη διαδικασία μιας βιομηχανικής δραστηριότητας στην οποία χρησιμοποιούνται μία ή περισσότερες επικίνδυνες ουσίες με αποτέλεσμα να προκαλείται σοβαρός κίνδυνος άμεσος ή έμμεσος για την υγεία και ασφάλεια του ανθρώπου, στο

εσωτερικό ή στο εξωτερικό της εγκατάστασης και για το περιβάλλον». Ο ορισμός αυτός παραμένει πρακτικά αναλλοίωτος και στη Οδηγία Seveso II: « συμβάν όπως μεγάλη διαρροή πυρκαγιά ή έκρηξη που προκύπτει από ανεξέλεγκτες εξελίξεις κατά τη λειτουργία οιασδήποτε μονάδας καλυπτόμενης από την παρούσα οδηγία, το οποίο προκαλεί μεγάλους κινδύνους, άμεσους ή αψότερους, για την ανθρώπινη υγεία εντός ή εκτός της μονάδας, ή και για το περιβάλλον και σχετίζεται με μία ή περισσότερες επικίνδυνες ουσίες». Από τους παραπάνω ορισμούς προκύπτει η εξής παρατήρηση: Επειδή προβλέπεται ο τρόπος εκδήλωσης ενός ατυχήματος (διαρροή, πυρκαγιά, έκρηξη) οι επικίνδυνες ουσίες πρέπει να διαθέτουν σχετικές ιδιότητες π.χ. να είναι εκρηκτικές ή εύφλεκτες ή η διαρροή τους να προκαλεί προβλήματα είτε στην ανθρώπινη υγεία είτε στο περιβάλλον. Αμέσως γίνεται αντιληπτό το μεγάλο πλήθος των χημικών ενώσεων που διαθέτουν τέτοιες ιδιότητες. Τέλος, διαπιστώνεται ότι ο μηχανισμός δράσης μιας επικίνδυνης ουσίας μπορεί να ποικίλει εξαιρετικά (*Δοντάς, 2001*).

Βιομηχανικά Ατυχήματα Μεγάλης Έκτασης (B.A.M.E.)

Μεγάλη διαρροή, φωτιά ή έκρηξη που προκαλείται από μη ελεγχόμενες καταστάσεις στην βιομηχανική δραστηριότητα και έχει σαν αποτέλεσμα σοβαρούς κινδύνους για τον άνθρωπο, άμεσους ή έμμεσους, εντός ή εκτός της εγκατάστασης, ή/και στο περιβάλλον εμπλέκοντας μία ή περισσότερες επικίνδυνες ουσίες.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των B.A.M.E. είναι (*Γεωργιάδου, 2001*):

1. Μεγάλος αριθμός νεκρών (άμεσων ή καθυστερημένων) και τραυματιών (εγκαύματα, αναπνευστικά προβλήματα, κ.α.) για τους οποίους απαιτείται ειδική νοσοκομειακή περίθαλψη.
2. Μεγάλη πιθανότητα επέκτασης των επιπτώσεων και εκτός του χώρου μιας εγκατάστασης, μεγάλη πιθανότητα για δημιουργία αλυσιδωτών ατυχημάτων (φαινόμενο Domino).
3. Αρκετές φορές απαιτείται η εκκένωση πληθυσμού σε μεγάλη απόσταση γύρω από το ατύχημα.
4. Για την αντιμετώπιση απαιτείται η συνεργασία πολλών ομάδων παρέμβασης (πυροσβεστική, τροχαία, ασθενοφόρα, τοπικές αρχές).
5. Διατάραξη του κανονικού ρυθμού ζωής.
6. Καταστροφικές επιπτώσεις για το περιβάλλον: καταστροφές από καύση, καταστροφές από υπερπίεση, ρύπανση της ατμόσφαιρας και του εδάφους, ρύπανση νερών, κ.α.
7. Οικονομικές επιπτώσεις.

Γενικό Σχέδιο Αντιμετώπισης Τεχνολογικών Ατυχημάτων Μεγάλης Έκτασης (Γενικό ΣΑΤΑΜΕ):

Γενικό σχέδιο που συντάσσεται από την τοπική αρχή για την περιοχή δικαιοδοσίας της και καθορίζει το οργανωτικό πλαίσιο, τις αρχές, τις στρατηγικές, τις διαδικασίες

και τα μέσα για την κινητοποίηση και την αποστολή των αρμοδίων αρχών (λειτουργίες αντιμετώπισης) σε περίπτωση βιομηχανικής έκτακτης ανάγκης (Μαρκάτος, 1999).

Ασφάλεια και Επικινδυνότητα (Safety and Risk)

Η δήλωση ενός ορισμού της λέξης ασφάλειας (Safety) δεν είναι και ότι πιο εύκολο μπορεί να γίνει γιατί η έννοια δεν είναι προφανής και συνήθως συνδέεται με την απουσία κινδύνου. Αν κάποιος ανατρέξει στις βιβλιογραφικές πηγές για τον ορισμό του κινδύνου θα βρεθεί στη δυσάρεστη θέση να πρέπει να διαλέξει ανάμεσα από μεγάλο αριθμό ορισμών προκειμένου να μπορέσει να βρει αυτό που θέλει. Συγκεκριμένες αναφορές στη βιβλιογραφία για τον ορισμό έχουν κάνει οι Adams (Adams, 1995), Lees (Lees, 1996), IEC 61508 (IEC 61508, 2000). Η IEC 61508 καθορίζει τον κίνδυνο ως τον συνδυασμό της πιθανότητας εμφάνισης του περιστατικού και της δριμύτητάς αυτού. Ο προσδιορισμός του κινδύνου μπορεί να γίνει με την επερώτηση τριών παραγόντων: *γεγονός, πιθανότητα και συνέπειες*:

- Τι μπορεί να πάει στραβά; (γεγονός)
- Ποια είναι η πιθανότητα του περιστατικού; (πιθανότητα)
- Ποιες είναι οι συνέπειες; (συνέπειες)

Οι απαντήσεις των παραπάνω ερωτήσεων περιέχουν καθαρά υποκειμενικό περιεχόμενο σε σχέση πάντα με αυτόν που προσπαθεί να τις απαντήσει. Το ρίσκο ή επικινδυνότητα έχει άμεση σχέση με τον παρατηρητή και επίσης έχει να κάνει με την πιθανότητα του περιστατικού και τις συνέπειες σύμφωνα πάντα με τον Kaplan (Kaplan, 1981).

Σύμφωνα με το Suchman (Shuchman, 1981), ένα γεγονός μπορεί να χαρακτηριστεί ως ατύχημα αν εκπληρώνει τις παρακάτω προϋποθέσεις, δηλαδή είναι απροσδόκητο, αναπόφευκτο και απρομελέτητο. Ο ίδιος έχει προτείνει τα τρία παρακάτω χαρακτηριστικά, για να ορίσει ένα γεγονός ως ατύχημα:

- Ο βαθμός του μη προσδοκώμενου
- Ο βαθμός του αναπόφευκτου
- Ο βαθμός του απρομελέτητου

Επιπλέον ο ίδιος έθεσε και ορισμένα επιπλέον δευτερεύοντα χαρακτηριστικά όπως είναι:

- Ο βαθμός προειδοποίησης
- Η διάρκεια του περιστατικού
- Ο βαθμός αμέλειας
- Ο βαθμός της κακοδιαχείρισης

Επομένως ένα γεγονός αναπτύσσεται σε ατύχημα αν δεν υπάρχει αρκετός χρόνος προειδοποίησης, το φαινόμενο γίνεται γρήγορα ή εάν υπάρχει αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα αμέλειας και κακοδιαχείριση της κατάστασης.

Υπάρχουν πολλοί και ποικίλοι ορισμοί για την επικινδυνότητα και η έννοια που ο κάθε ένας ατομικά προσπαθεί να υιοθετήσει υπόκεινται στις δικές του κρίσεις και ερμηνείες. Έτσι, δεν είναι δυνατόν να θεωρηθεί ένας ορισμός για τον κίνδυνο καθολικός. Διότι η έννοια του κινδύνου γίνεται αντιληπτή διαφορετικά από άνθρωπο σε άνθρωπο και γι' αυτό το λόγω συνίσταται για να γίνει καλύτερα κατανοητός ο όρος, να μετονομαστεί σε «αντίληψη κινδύνου». Επομένως ο όρος ρίσκο – κίνδυνος δεν μπορεί να καθοριστεί μόνο προς μια κατεύθυνση. Έτσι ένα αποδεκτό πρότυπο κινδύνου δεν καθορίζεται αποκλειστικά από την τρέχουσα κατάσταση προόδου της τεχνολογία, αλλά και από τις επιθυμίες, τις φιλοδοξίες του ατόμου και της κοινωνίας (Pasman et al., 2003).

Η ασφάλεια (*Safety*) μπορεί να οριστεί ως η απουσία κινδύνου και μπορεί επίσης να εκφραστεί ως το αντίστροφο του κινδύνου, δηλαδή όσο λιγότερος είναι ο κίνδυνος τόσο μεγαλύτερη είναι η ασφάλεια.

Επιπλέον, η ασφάλεια δεν έχει ένα συγκεκριμένο πλαίσιο αλλά αυτό προσαρμόζεται στην κάθε περίπτωση. Για παράδειγμα ασφάλεια στο δρόμο σημαίνει να περπατάει κάποιος, χωρίς να κινδυνεύει να δεχτεί επίθεση από τους συναθρώπους του. Ενώ κατά τη διάρκεια που οδηγεί κάποιος, ασφάλεια σημαίνει να οδηγεί χωρίς να έχει ανάμειξη σε ένα ατύχημα αυτοκινήτων.

Τέλος, είναι σημαντικό να ορίσουμε και τον όρο «ασφάλεια διαδικασίας» σύμφωνα με τον οποίο ονομάζεται η απουσία περιστατικών κατά τις διάφορες δραστηριότητες επεξεργασίας επικίνδυνων ουσιών.

Ατυχήματα, συμβάντα και παρ' ολίγον ατυχήματα

Η έννοια του ατυχήματος και του συμβάντος χρησιμοποιούνται στον τομέα της βιομηχανικής ασφάλειας σχεδόν με κοινή σημασία, γι' αυτό είναι σημαντικό να γίνει ένας διαχωρισμός αυτών των δύο εννοιών προκειμένου να γίνουν κατανοητοί.

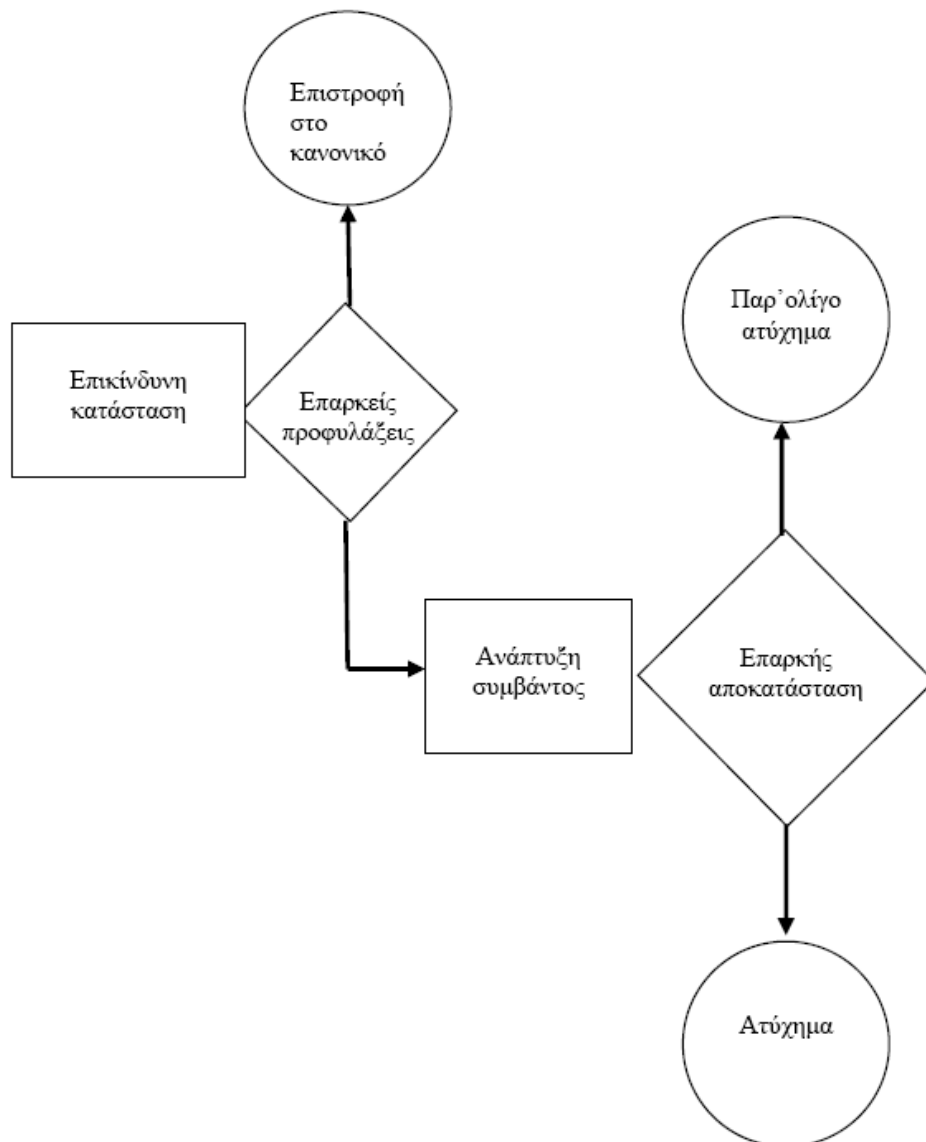
Το ατύχημα και το συμβάν ορίζονται ως οι απροσδόκητες ξαφνικές ακολουθίες γεγονότων με ανεπιθύμητες εκβάσεις, προκαλώντας βλάβες στον άνθρωπο, στην υλικοτεχνική υποδομή και στο περιβάλλον.

Όπως στον κίνδυνο (*risk*), τα ατυχήματα και τα συμβάντα είναι συγκεκριμένες έννοιες, που έχουν υποκειμενικό χαρακτήρα και εξαρτώνται καθαρά από τις αντιλήψεις του κάθε ανθρώπου.

Η διαφορά μεταξύ των συμβάντων και των ατυχημάτων είναι ότι τα ατυχήματα είναι η έκβαση ενός συμβάντος ή μιας σειράς συμβάντων με άσχημες συνέπειες. Επομένως, τα συμβάντα μπορούν να αναπτυχθούν σε ατύχημα σύμφωνα με το Van der Schaaf (*Schaaf van der, 1991*) ο οποίος αναγνωρίζει ένα ενδιάμεσο συμβάν ως παρ' ολίγον ατύχημα. Και ορίζει ένα παρ' ολίγον ατύχημα ως μια κατάσταση στην οποία μια τρέχουσα ακολουθία γεγονότων αποτρέπεται στο να αναπτυχθεί σε ένα γεγονός με καταστροφικές συνέπειες. Συνδυάζοντας τις απόψεις του περί του συμβάντος, του ατυχήματος και του παρ' ολίγον ατυχήματος έφτιαξε το

παρακάτω σχήμα 1, (Schaaf van der, 1992) όπου απεικονίζονται οι παραπάνω όροι. Έτσι σύμφωνα με τη συγκεκριμένη άποψη τα συμβάντα είναι ο συνδυασμός των παρ' ολίγον ατυχημάτων και των ατυχημάτων.

Το σχήμα απεικονίζει ότι ένας οργανισμός μπορεί να αποφύγει επικίνδυνες καταστάσεις που μπορούν να αναπτυχθούν σε ατύχημα αν λάβει κατάλληλα μέτρα και προφυλάξεις. Εάν αυτές οι προφυλάξεις δεν είναι επαρκείς, η επικίνδυνη κατάσταση θα αναπτυχθεί σε ένα γεγονός με χαμηλές αντιληπτές συνέπειες, δηλαδή σε ένα συμβάν. Έτσι ο χειριστής της επικίνδυνης κατάστασης μπορεί επαρκώς να ανακτήσει την κατάσταση και έτσι το συμβάν μετατρέπεται σε παρ' ολίγον ατύχημα. Εντούτοις, αν δεν υπάρξει επαρκής αποκατάσταση, το συμβάν θα αναπτυχθεί σε γεγονός με καταστροφικές συνέπειες, δηλαδή ατύχημα.



Σχήμα 1 Ένα μοντέλο περιγραφής συμβάντων, ατυχημάτων και παρ' ολίγων ατυχημάτων (Schaaf van der,1992)

2.2 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ Β.Α.Μ.Ε.

Στην παρούσα ενότητα γίνεται αναφορά σε έρευνες που πραγματοποιήθηκαν πάνω στη στατιστική μελέτη βιομηχανικών ατυχημάτων και πιο συγκεκριμένα στις έρευνες των Vilchez et al. (*Vilchez et al., 1995*), Κωνσταντινίδου και Νιβολιανίτου (*Κωνσταντινίδου και Νιβολιανίτου, 2003*) και των Khan και Abbasi (*Khan and Abbasi, 1999*). Η στατιστική ανάλυση των ατυχημάτων αυτών δίνει πολλά χρήσιμα στοιχεία τόσο για την πρόβλεψη των ατυχημάτων όσο και για την αντιμετώπισή τους.

Όλες οι παραπάνω έρευνες κάνουν στατιστική ανάλυση μεγάλων βιομηχανικών ατυχημάτων. Οι έρευνες στηρίζονται σε στοιχεία που έχουν συλλέξει από διάφορες βάσεις δεδομένων όπως είναι η MHIDAS, η MARS, καθώς και από βιβλιογραφικές πηγές. Από τα στοιχεία που παρέχονται από τις αναφερόμενες παραπάνω μπορεί να γίνει μελέτη των μεγάλων ατυχημάτων με βάση το είδος της βιομηχανίας, την χώρα και το έτος, τις ουσίες που ενεπλάκησαν σε αυτό, το είδος, τις αιτίες και τις συνέπειες του ατυχήματος, τον τρόπο αντιμετώπισης τους και τα μέτρα πρόληψης για μελλοντικά ατυχήματα, κ.α.

Στην έρευνα των Vilchez et al. (*Vilchez et al., 1995*) χρησιμοποιείται η βάση δεδομένων MHIDAS και η έρευνα τους καλύπτει το χρονικό φάσμα της περιόδου από την αρχή του 19ου αιώνα έως τον Ιούλιο 1992. Το δείγμα της έρευνας περιλαμβάνει 5325 ατυχήματα.

Τα αποτελέσματα της έρευνας των Vilchez επιβεβαιώνονται από όμοια αποτελέσματα που έχουν εξαχθεί από άλλες έρευνες όπως των Haastруп και Brockhoff (*Haastруп and Brockhoff, 1990*) για δεδομένα από το 1960 έως το 1988. Για τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν (5325), ο αριθμός των ατυχημάτων που έγιναν κατά τη διάρκεια κάποιας μεταφοράς ήταν σημαντικά υψηλός με ποσοστό 39%, ακολουθώντας με ποσοστό 24,5% τα ατυχήματα που έλαβαν χώρα σε βιομηχανίες διεργασιών και τέλος με ποσοστό 17,4% τα ατυχήματα σε αποθηκευτικούς χώρους.

Επίσης η έρευνα έδειξε ότι ένα μεγάλο ποσοστό ατυχημάτων (66%) συμβαίνει σε περιοχές με υψηλό πληθυσμό. Και αυτό θα συνεχίσει να ισχύει αφού τα περισσότερα εργοστάσια είναι φτιαγμένα κοντά σε περιοχές με μεγάλο πληθυσμό. Έτσι γίνεται κατανοητή η σημασία των σχεδίων αντιμετώπισης μεγάλων βιομηχανικών ατυχημάτων.

Επιπλέον η ανάλυση δεδομένων έδειξε ότι κατά τη φόρτωση και εκφόρτωση γίνονται συχνά ατυχήματα σε ποσοστό της τάξης του 8%, έτσι είναι αναγκαίος ένας καλύτερος σχεδιασμός των παραπάνω διαδικασιών. Τέλος σε σχέση με την επίδραση στον πληθυσμό, οι θάνατοι ανέρχονται σε ποσοστό 41% στο σύνολο των ατυχημάτων.

2.3 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ Β.Α.Μ.Ε

Οι επιπτώσεις των Β.Α.Μ.Ε. μπορούν να διακριθούν ανάλογα με τα φυσικά φαινόμενα που τα διέπουν. Έτσι οι επικίνδυνοι παράγοντες ταξινομούνται στις ακόλουθες κατηγορίες :

- Θερμική ακτινοβολία: υπολογίζεται ως θερμική ροή σε σχέση με την απόσταση από την πηγή (KW/m²).
- Ωστικό κύμα: υπολογίζεται ως υπερπίεση που παράγεται σε σχέση με την απόσταση από την έκρηξη (kPa).
- Τοξικότητα θεωρείται η παρουσία τοξικών ουσιών στον αέρα και υπολογίζεται ως συγκέντρωση σε σχέση με την απόσταση.

Για τον ποσοτικό προσδιορισμό των άνω οριακών τιμών χρησιμοποιείται η λαμβανόμενη δόση, η οποία υπολογίζεται από την ένταση του φαινομένου της έκθεσης στον επικίνδυνο παράγοντα και το χρόνο έκθεσης. Στην περίπτωση βιομηχανικού ατυχήματος, η έκθεση σε επικίνδυνους παράγοντες είναι περιστασιακή και ενδεικτικά αναφέρεται η έκθεση σε τοξική ουσία στον αέρα η οποία διαρκεί όσο και η διέλευση του τοξικού νέφους από την περιοχή στην οποία στέκεται ή κινείται ένα άτομο. Στην περίπτωση όμως της περιστασιακής έκθεσης, τόσο η ένταση του φυσικού φαινομένου όσο και ο χρόνος έκθεσης δεν είναι σταθερά και απαιτείται ο υπολογισμός της λαμβανόμενης δόσης με τη χρήση μαθηματικών τύπων. Η εκτίμηση των επιπτώσεων από κάποια επιβάρυνση γίνεται είτε με τη μέθοδο της ατομικής διακινδύνευσης είτε με τη μέθοδο της ομαδικής διακινδύνευσης. Η ατομική διακινδύνευση εκφράζει το ποσοστό ατόμων ενός πληθυσμού το οποίο αναμένεται να παρουσιάσει κάποια βλάβη ή εξίσου την πιθανότητα ένα άτομο να υποστεί μια βλάβη για ένα δεδομένο επίπεδο δόσης (*Risk criteria for land-use planning in the vicinity of major industrial hazards, HSE 1989*).

Η σχέση υπολογισμού της λαμβανόμενης δόσης (D) ενός επικίνδυνου παράγοντα δίνεται στην συνέχεια ανάλογα με το φυσικό φαινόμενο. Στην περίπτωση εισπνοής τοξικής ουσίας ισχύουν τα παρακάτω.

Εισπνοή τοξικής ουσίας

$$D_{x,y,z} = C^n(x,y,z) \cdot t$$

όπου $D_{x,y,z}$: η λαμβανόμενη δόση στο σημείο (x,y,z) σε mg/kg

$C(x,y,z)$: η συγκέντρωση της ουσίας σε mg/m³

n : σταθερά

t : η διάρκεια έκθεσης σε λεπτά

Η παραπάνω σχέση ισχύει για συνεχή έκλυση τοξικής ουσίας και σταθερό ρυθμό εκπομπής και εμπεριέχει την παραδοχή ότι ένα άτομο παραμένει σε ένα σημείο (x,y,z) σε όλη τη χρονική περίοδο t (ακίνητος παρατηρητής) και στη συνέχεια απομακρύνεται σε σημείο μηδενικής συγκέντρωσης (Χριστόλης, 1996)

Για την εκτίμηση των επιπτώσεων από την παρουσία τοξικών ουσιών στην ατμόσφαιρα χρησιμοποιούνται συνήθως οριακές τιμές, οι οποίες εκφράζουν τη συγκέντρωση μιας τοξικής ουσίας στον αέρα στην οποία εκτίθεται ένας πληθυσμός (συνήθως για 30 min) στην οποία αντιστοιχούν συγκεκριμένες επιδράσεις. Πιο

συγκεκριμένα, όπως προκύπτει από διερεύνηση της διεθνούς βιβλιογραφίας κατά κανόνα χρησιμοποιούνται τα παρακάτω όρια:

LOC (Level of Concern)

Ορίζεται ως η συγκέντρωση στον αέρα μιας εξαιρετικά τοξικής ουσίας, πάνω από την οποία είναι δυνατόν να υπάρξουν βλάβες στην υγεία ενός ατόμου, για σχετικά μικρό χρονικό διάστημα έκθεσης (συνήθως 30 min). Το LOC προσδιορίζεται έμμεσα και συνήθως από υπολογίζεται από το όριο IDLH (0.1 του IDLH) (*Technical Guidance for Hazards Analysis – Emergency Planning for Extremely Hazardous Substances, 1987*).

IDLH (Immediately Dangerous to Life and Health)

Ορίζεται ως η μέγιστη συγκέντρωση μιας τοξικής ουσίας στον αέρα στην οποία μπορεί να εκτεθεί ένας υγιής εργαζόμενος για 30 min και να διαφύγει χωρίς να υποστεί μη-ανατάξιμες βλάβες στην υγεία του ή τραυματισμούς που εμποδίζουν τη διαφυγή του (κυρίως ερεθισμούς ματιών ή πνευμόνων) (*Technical Guidance for Hazards Analysis – Emergency Planning for Extremely Hazardous Substances, 1987*). Τα όρια IDLH αναφέρονται αποκλειστικά στις βλάβες που επέρχονται με την εισπνοή τοξικής ουσίας και αφορούν σε βλάβες σοβαρές και συγχρόνως μη ανατάξιμες.

LC50 (Lethal Concentration 50)

Ορίζεται ως η συγκέντρωση μιας τοξικής ουσίας στον αέρα στην οποία είναι πιθανόν να συμβεί θάνατος στο 50% του πληθυσμού, με εισπνοή της ουσίας αυτής για καθορισμένο χρόνο έκθεσης (30 min) (*Methods for the determination of possible damage – Green Book, 1989*).

LC1 (Lethal Concentration 1)

Ορίζεται ως η συγκέντρωση μιας τοξικής ουσίας στον αέρα στην οποία είναι πιθανόν να συμβεί θάνατος στο 1% του πληθυσμού, με εισπνοή της ουσίας αυτής για καθορισμένο χρόνο έκθεσης (30 min).

2.4 ΖΩΝΕΣ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΩΝ ΔΡΑΣΕΩΝ

Η διαχείριση βιομηχανικών ατυχημάτων απαιτεί την υιοθέτηση ειδικών ζωνών γύρω από τη θέση του ατυχήματος ανάλογα με την ένταση των επιπτώσεων στον άνθρωπο και απαιτεί επίσης τον καθορισμό των αντίστοιχων ορίων για τον προσδιορισμό των ζωνών αυτών. Στις ΗΠΑ συνήθως προσδιορίζεται μια κυκλική περιοχή, έξω από τα όρια της οποίας ο πληθυσμός θα πρέπει να θεωρείται ασφαλής, ενώ στο εσωτερικό της προσδιορίζονται επί μέρους ζώνες οι οποίες αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες προστατευτικές δράσεις (διάσωση, εκκένωση, παραμονή σε κλειστούς χώρους) καθώς και μια μικρή ζώνη όπου μπορεί να κινείται μόνο αριθμός ατόμων που ασχολείται με την αντιμετώπιση του ατυχήματος (Technical Guidance for Hazards Analysis – Emergency Planning for Extremely Hazardous Substances, 1987).

Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό οι ζώνες που προσδιορίζονται είναι οι ακόλουθες:

- Θερμή περιοχή (hot area): μικρή περιοχή γύρω από το χώρο του ατυχήματος όπου κινούνται μόνο οι ομάδες αντιμετώπισης του ατυχήματος.
- Απαγορευμένη περιοχή (restricted area): περιοχή όπου εκδηλώνονται οι δράσεις προστασίας του πληθυσμού.
- Ασφαλή περιοχή (safe area): στην περιοχή αυτή δεν απαιτείται καμία δράση προστασίας

Από την Ευρωπαϊκή εμπειρία αναφέρεται η μεθοδολογία που ακολουθείται από την Ολλανδική Πυροσβεστική Ακαδημία, η οποία διακρίνει τις ακόλουθες ζώνες (*Smit M.J.H.,1993*)

- Ζώνη πιθανών θανάτων (lethal zone): στη ζώνη αυτή συμβαίνουν σοβαροί τραυματισμοί και θάνατοι σε σημαντικό ποσοστό
- Ζώνη σοβαρών τραυματισμών (injurious zone): για τα περισσότερα άτομα της ζώνης αυτής αναμένονται μη-ανατάξιμες βλάβες στην υγεία τους και πιθανοί θάνατοι σε μικρό ποσοστό του πληθυσμού. Στη ζώνη αυτή γίνονται συστηματικές ενέργειες διάσωσης από τα σωστικά συνεργεία.
- Ζώνη μικρών τραυματισμών (unsafe zone): δεν αναμένονται θάνατοι ενώ σε σχετικά μικρό αριθμό ατόμων αναμένονται βλάβες στην υγεία τους. Η διάσωση γίνεται κύρια με ίδια μέσα από τον πληθυσμό και σε λίγες περιπτώσεις από τα σωστικά συνεργεία.
- Ασφαλής Ζώνη (safe zone): στη ζώνη αυτή δεν απαιτούνται μέτρα προστασίας.

Με βάση τα παραπάνω υιοθετήθηκαν οι παρακάτω ζώνες προστασίας :

Πίνακας 1 Ζώνες προστατευτικών δράσεων και οριακές τιμές

Ζώνη	Τοξικές Ουσίες Συγκέντρωση (mg/m³)	Θερμική Ακτινοβολία Δόση (DTU)	Ωστικό Κόμμα Υπερπίεση (mbar)
Ζώνη 1 Προστασίας δυνάμεων καταστολής	LC50	1500	350
Ζώνη 2 Προστασίας πληθυσμού Σοβαρές επιπτώσεις	LC1	450	140
Ζώνη 3 Προστασίας πληθυσμού Μέτριες επιπτώσεις	IDLH	170	50

2.5 ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ

Η νομοθεσία για την προστασία του πληθυσμού από τον τεχνολογικό κίνδυνο είναι σχετικά πρόσφατη. Ανάλογα με την ανάπτυξη της κάθε χώρας καθορίζεται και το αντίστοιχο νομοθετικό πλαίσιο.

Αρχικά, ο πρώτος κώδικας για την πρόληψη των Β.Α.Μ.Ε. εκδόθηκε το 1998, ενώ αργότερα το 1993 στην Γενεύη γράφτηκε το η 174 Διεθνής Σύμβαση Εργασίας και η 181 Διεθνής Σύσταση Εργασίας (*Γεωργιάδου, 2001*).

Αντίθετα στην Ευρωπαϊκή Ένωση η θέσπιση νομοθεσίας για την αντιμετώπιση ατυχημάτων άρχισε με την οδηγία του 1967 για τις επικίνδυνες ουσίες (Directive 67/548/EEC). Ύστερα τα ατυχήματα στο Flixborough και το Seveso αποτέλεσαν τον κύριο παράγοντα για τη θέσπιση της νομοθεσίας σχετικά με την πρόληψη και την αντιμετώπιση των Β.Α.Μ.Ε.

Έτσι, το 1982 εκδόθηκε η κοινοτική οδηγία SEVESO I (82/501/EEC) η οποία τροποποιήθηκε το 1987 και αποτέλεσε τη βασική νομοθετική οδηγία για όλες τις Ευρωπαϊκές χώρες για τη βιομηχανική ασφάλεια για 14 χρόνια περίπου.

Αργότερα το 1996 ήρθε η οδηγία SEVESO II (96/82/EC). Αναγνωρίζοντας τα κενά και τις παραλείψεις της πρώτης οδηγίας, τα νέα δεδομένα που εισάγουν οι νέες τεχνολογίες και τέλος τα αποτελέσματα ερευνών στον τομέα της ασφάλειας. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα στην πρόληψη των ατυχημάτων μεγάλης έκτασης και στον άμεσα και αποτελεσματικό τρόπο αντιμετώπισης του ατυχήματος. Στην Ελλάδα η νέα οδηγία ενσωματώθηκε το 2001 με Κοινή Υπουργική Απόφαση 5697/590/2001.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΦΥΣΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

3. ΦΥΣΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γνώση του πεδίου συγκεντρώσεων των ρύπων γύρω από αποθήκη τοξικών σε κατάσταση πυρκαγιάς, αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από ατυχήματα σε αποθήκες με χημικές ουσίες. Επίσης, απαιτείται και σε πολλές άλλες περιπτώσεις που αφορούν σε ατμοσφαιρική ρύπανση, όπως στο καθορισμό του ύψους καμινάδας σε βιομηχανίες, στην επιλογή θέσης εξαερισμού κτιρίων κ.α.

Η μελέτη της διασποράς των ρύπων γύρω από αποθήκη τοξικών ουσιών είναι ένα εξαιρετικά πολύπλοκο πρόβλημα επειδή υπεισέρχονται πάρα πολλοί παράγοντες. Όπως το μέγεθος, το σχήμα και ο προσανατολισμός της αποθήκης σε σχέση με την φορά του ανέμου, η ταχύτητα του ανέμου, η ένταση της τύρβης του οριακού στρώματος της ατμόσφαιρας, το ύψος του οριακού στρώματος και άλλα. Όταν επιπλέον η αποθήκη βρίσκεται σε κατάσταση πυρκαγιάς. Το πρόβλημα περιπλέκεται ακόμα περισσότερο, λόγω της ύπαρξης ανωστικών δυνάμεων, που οφείλονται στην έκλυση μεγάλων ποσοτήτων θερμότητας. Στην παράγραφο 3.2 και 3.3 αναλύονται τα χαρακτηριστικά μιας τυπικής αποθήκης και μιας τυπικής πυρκαγιάς. Στις παραγράφους 3.4 και 3.5 αναλύονται τα χαρακτηριστικά του πεδίου ροής και του πεδίου συγκεντρώσεων για μια τυπική αποθήκη σε μια τυπική πυρκαγιά.

3.2 ΤΥΠΙΚΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΠΟΘΗΚΗΣ

Μια τυπική αποθήκη έχει διαστάσεις 30m × 90m × 8m και συνήθως μεταβάλλεται το μήκος, το οποίο μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερο έως και αρκετά μικρότερο ανάλογα με την χρήση της αποθήκης. Γενικά ένα μέσο μήκος αποθήκης είναι 90m, ένα μέσο πλάτος 30m και ένα μέσο ύψος 8m.

Για την αντιμετώπιση πιθανών ατυχημάτων στις περισσότερες αποθήκες υπάρχουν ανοίγματα στην οροφή τα οποία καλύπτονται από ειδικά πλαστικά τα οποία «σπάνε» την κατάλληλη στιγμή, ώστε να εξασφαλίσουν αερισμό και ασφαλή εκτόνωση των καυσαερίων σε περίπτωση πυρκαγιάς στο εσωτερικό της αποθήκης. Τα ανοίγματα αυτά τοποθετούνται διάσπαρτα στην οροφή. Ένα συνηθισμένο άνοιγμα έχει επιφάνεια 3m² και βρίσκεται στο μέσο της οροφής.

Σε αποθήκες χημικών ουσιών, όπως είναι και τα φυτοπροστατευτικά προϊόντα ο αέρας στην περίπτωση της πυρκαγιάς θεωρείται πως σε συνδυασμό με την άνωση παρασύρουν το σύνολο των αιωρούμενων σωματιδίων και του καπνού έξω από την αποθήκη μέσω των ανοιγμάτων της οροφής από τη στιγμή που θα γίνει ρήξη των πλαστικών προστατευτικών.

3.3 ΤΥΠΙΚΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

Η εκλούμενη θερμότητα κατά την εκδήλωση πυρκαγιάς σε εγκαταστάσεις φυτοφαρμάκων, θεωρείται ότι προέρχεται από την καύση όλων των αποθηκευμένων υλικών, ήτοι από τις ουσίες Seveso, τις ουσίες non-Seveso και τα υλικά συσκευασίας και αποθήκευσης. Οι κυριότερες παράμετροι που επηρεάζουν την εξέλιξη της πυρκαγιάς, είναι τα είδη των καύσιμων υλών, το ύψος αποθήκευσης, ο βαθμός κάλυψης του δαπέδου, η έκταση ανοιγμάτων φυσικού αερισμού, κ.ά. Η παραγόμενη θερμότητα απορροφάται σε μεγάλο βαθμό από το σκελετό του κτιρίου (σε ποσοστό μέχρι και 40%, πριν από την κατάρρευση της οροφής), ενώ ένα σημαντικό ποσοστό διαφεύγει με τη μορφή ακτινοβολίας.

Πίνακας 2 Κατηγορίες Πυρκαγιάς

	Καύσιμες Ύλες	Ρυθμός Καύσης	Διάρκεια σε sec
Φωτιά Μεγάλης Έντασης	Εύφλεκτα υγρά (π.χ. προϊόντα σε διαλύτες), που χύνονται στο δάπεδο και προκαλείται φωτιά λίμνης. Επίσης αδρανή τεχνικά συστατικά ή προϊόντα που περιέχουν σημαντική ποσότητα διαλυτών	Υψηλός	6500
Φωτιά Μεσαίας Έντασης	Αδρανή τεχνικά συστατικά ή προϊόντα, που περιέχουν μικρή ποσότητα διαλυτών.	Μέτριος	7000
Φωτιά Μικρής Έντασης	Αδρανή τεχνικά συστατικά ή προϊόντα σε εύφλεκτη συσκευασία.	Χαμηλός	13000

Πιο συγκεκριμένα, η ανάπτυξη της πυρκαγιάς περιλαμβάνει τις ακόλουθες 3 χαρακτηριστικές φάσεις [7]:

Φάση μεγέθυνσης: Ο ρυθμός καύσης αυξάνεται εκθετικά και στη φάση αυτή ολοκληρώνεται η καύση των υλικών συσκευασίας. Η διάρκειά της κυμαίνεται μεταξύ 1500 sec και 3000 sec.

Φάση ισορροπίας: Στη φάση αυτή έχει αποκατασταθεί η ισορροπία στον αερισμό του κτιρίου, με την αστοχία των διαφραγμάτων κάποιων ανοιγμάτων οροφής και ο ρυθμός καύσης διατηρείται σταθερός. Η διάρκειά της κυμαίνεται μεταξύ 5000 sec και 10000 sec.

Φάση εξασθένισης: Στην τελική φάση, ο ρυθμός καύσης μειώνεται εκθετικά και η διάρκειά της λαμβάνεται για όλες τις περιπτώσεις ίση με 1800 sec.

Από τις παραπάνω φάσεις, ενδιαφέρον για την εκτίμηση επιπτώσεων παρουσιάζουν οι δύο πρώτες φάσεις, δηλαδή αυτές της μεγέθυνσης και ισορροπίας, γιατί στο διάστημα αυτό θεωρείται ότι συμπαρασύρονται οι άκαυστες τοξικές ουσίες.

3.4 ΤΟ ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ

Η ροή γύρω από μια αποθήκη τοξικών είναι εξαιρετικά περίπλοκη, τρισδιάστατη, με ζώνες ανακυκλοφορίας, μέσα στις οποίες παρατηρείται έντονη τυρβώδης ανάμιξη και ως εκ τούτου η γνώση του πεδίου ροής είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την πρόβλεψη του πεδίου συγκεντρώσεων. Οι παράμετροι που επηρεάζουν το πεδίο ροής είναι πολυάριθμοι. Αναλυτικά είναι:

- Τα δυναμικά χαρακτηριστικά της προσπίπτουσας ροής, δηλαδή η ταχύτητα του ανέμου και η ένταση της τύρβης. Η ταχύτητα του ανέμου είναι ένας από τους κυριότερους παράγοντες που επηρεάζουν το ύψος του οριακού στρώματος και επομένως και τη διασπορά των ρύπων. Στην περίπτωση της ροής γύρω από αποθήκη σε κατάσταση πυρκαγιάς, οι δυνατοί άνεμοι παρασύρουν τους ρύπους σε χαμηλά επίπεδα όπου είναι δυνατόν να εγκλωβιστούν σε κάποια κλειστή ζώνη ανακυκλοφορίας κυρίως πίσω από την αποθήκη με αποτέλεσμα να έχουμε τοπικά αυξημένες συγκεντρώσεις ρύπων
- Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κτιρίου. Το σχήμα και το μέγεθος του κτιρίου παίζουν καθοριστικό ρόλο στο πεδίο ροής. Ο λόγος μήκους προς το ύψος της αποθήκης είναι ένας καθοριστικός παράγοντας που επηρεάζει και αυτός το μήκος ανακυκλοφορίας πίσω και πάνω από την αποθήκη. Έχουν γίνει διάφορες αναφορές για τον υπολογισμό της διασποράς ρύπων γύρω από κυβικά, ορθογωνικά και τριγωνικά κτίρια. Η παρουσία άλλων κτιρίων μεταβάλλει το πεδίο ροής και το πρόβλημα γίνεται πιο περίπλοκο. Η παρουσία κάποιου ψηλού κτιρίου επηρεάζει τη διεύθυνση, την ένταση και τη φορά του ανέμου που προσπίπτει στην αποθήκη που εξετάζεται με επιπτώσεις σε όλο το πεδίο ροής. Η παρουσία κτιρίου με μικρό ύψος επηρεάζει την διασπορά, όμως αν αυτό είναι σχετικά μικρό ως προς την αποθήκη που εξετάζεται, επηρεάζει μόνο την τύρβη του ανέμου και μπορεί να συμπεριληφθεί στα μοντέλα ανάλυσης ως τραχύτητα εδάφους.
- Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας και ορμής μέσω των αερίων καύσης. Οι ρύποι που εξέρχονται από την πηγή θερμότητας έχουν σαφώς μεγαλύτερη θερμοκρασία από αυτήν του περιβάλλοντος αέρα και έχουν την τάση να ανέβουν προς τα πάνω. Οι διαφορές θερμοκρασίας δημιουργούν διαφορές στην πυκνότητα με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια ανωστική τάση. Όσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα της θερμότητας που εκλύεται από την πηγή, τόσο πιο έντονο είναι το φαινόμενο της άνωσης και η ανωστική ορμή μεγαλύτερη.
- Ο προσανατολισμός της αποθήκης σε σχέση με την διεύθυνση του ανέμου. Η ροή γύρω από αποθήκη εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τον προσανατολισμό της αποθήκης ως προς τον άνεμο, αφού με αυτόν τον τρόπο ο λόγος μήκους προς ύψος της αποθήκης αλλάζει, αλλά κυρίως γιατί το πεδίο ροής επηρεάζεται από τις ισχυρές διατμητικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στις γωνίες της αποθήκης.

- Το πάχος του οριακού στρώματος της ατμόσφαιρας. Η τυρβώδης φύση της ατμόσφαιρας είναι ο παράγοντας που στην ουσία κάνει τα προβλήματα διασποράς περίπλοκα. Το οριακό στρώμα της ατμόσφαιρας βρίσκεται σε τυρβώδη κατάσταση όπου οι διάφορες μετεωρολογικοί παράμετροι (άνεμος, θερμοκρασία, υγρασία κ.λ.π.) έχουν τυχαίες διακυμάνσεις γύρω από τη μέση τιμή τους, συναρτήσει του χώρου και του χρόνου. Η φύση και το ύψος του οριακού στρώματος σχετίζεται επίσης με την άνοση της ατμόσφαιρας δημιουργείται λόγω διαφοράς θερμοκρασίας των στρωμάτων αέρα. Γενικά, το ύψος του οριακού στρώματος είναι ανάλογο με ταχύτητα του ανέμου. Το ύψος του οριακού στρώματος σε σχέση με το ύψος της αποθήκης κτιρίου είναι μια καθοριστική παράμετρος, που επηρεάζει το μήκος ανακυκλοφορίας πίσω και πάνω από την αποθήκη, έχοντας σαν συνέπεια την τοπικά αυξημένη συγκέντρωση ρύπων.

3.5 ΤΟ ΠΕΔΙΟ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ

Γενικά οι ισχυροί άνεμοι βοηθούν στην καλύτερη και ταχύτερη διασπορά των ρύπων. Στην περίπτωση της ροής γύρω από αποθήκη σε κατάσταση πυρκαγιάς, οι δυνατοί άνεμοι παρασύρουν τους ρύπους σε χαμηλά επίπεδα όπου εγκλωβίζονται σε κλειστές ζώνες ανακυκλοφορίας κυρίως πίσω από την αποθήκη, με αποτέλεσμα να έχουμε τοπικά αυξημένες συγκεντρώσεις ρύπων. Στην άμεση γειτονιά της αποθήκης, σε απόσταση 10-50 m περίπου από την αποθήκη, παρατηρείται μια περίπλοκη αλληλεπίδραση μεταξύ του ανωστικού πλουμίου και του αεροδυναμικού φαινομένου, το οποίο οφείλεται στην επίδραση του ανέμου. Αυτή η αλληλεπίδραση επηρεάζει την αρχική ανύψωση και την διασπορά του πλουμίου και κατά συνέπεια τις συγκεντρώσεις των τοξικών ουσιών στο επίπεδο του εδάφους.

Ο τρόπος με τον οποίο απελευθερώνεται το πλούμιο από την αποθήκη έχει ιδιαίτερη σημασία για την ανύψωσή του: κατά την διάρκεια της πυρκαγιάς, το πλούμιο μπορεί να απελευθερώνεται είτε από κάποιες σχισμές και τα παράθυρα που βρίσκονται ψηλά στο οικοδόμημα, είτε από ένα μικρό σχετικά άνοιγμα (ή μερικά ανοίγματα) στην οροφή και ανοιχτές πόρτες ή από μεγάλα ανοίγματα και τελικά από όλη την επιφάνεια της οροφής σε περίπτωση κατάρρευσής της, στα επόμενα στάδια της πυρκαγιάς. Η κατανομή της πηγής ανωστικών δυνάμεων σε μεγάλες περιοχές της αποθήκης επηρεάζει την ανύψωση του πλουμίου, γιατί τείνει να αυξήσει την μάζα του αέρα που εισέρχεται, με αποτέλεσμα τη μείωση των ανωστικών δυνάμεων ανά μονάδα όγκου.

Σε μεγαλύτερες αποστάσεις από την αποθήκη, πέρα από 500m-1km, οι τοπικές αεροδυναμικές επιδράσεις της αποθήκης στη διάχυση του πλουμίου αρχίζουν να χάνουν τη σημασία τους και οι συγκεντρώσεις των ρύπων μπορούν να υπολογιστούν με τη χρήση ενός συμβατικού μοντέλου διασποράς. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι, τα χαρακτηριστικά διασποράς του πλουμίου, σε μικρή ή σε μεγαλύτερη απόσταση από αποθήκη, εξαρτώνται από τις αρχικές συνθήκες

απελευθέρωσης του πλουμίου και από την αλληλεπίδραση του με το πεδίο ανέμου γύρω από την αποθήκη.

Καθοριστικός παράγοντας για την διασπορά των ρύπων είναι η θέση της πηγής των ρύπων. Επειδή το πεδίο ροής δεν είναι συμμετρικό γύρω από την αποθήκη, η διασπορά των ρύπων εξαρτάται από την θέση της πηγής. Σε ατυχήματα φωτιάς, η πηγή είναι συνήθως εσωτερικά της αποθήκης αλλά οι ρύποι εξέρχονται από τις πόρτες, τα παράθυρα, από ανοίγματα στην οροφή ή από σχισμές που υπάρχουν στους τοίχους. Έτσι η διασπορά του πλουμίου έχει τελείως διαφορετική μορφή όταν η πηγή είναι στα προσήνεμα της αποθήκης, όταν είναι στα υπήνεμα και όταν είναι στην οροφή. Το πεδίο ροής και συγκεντρώσεων μεταβάλλεται σημαντικά ακόμα και όταν η πηγή έχει διαφορετικές θέσεις πάνω στην οροφή της αποθήκης.

Υπάρχουν και πολλοί άλλοι παράγοντες που μπορούν να επιδράσουν στην διασπορά των ρύπων αλλά θα τους θεωρήσουμε δευτερεύοντες, δηλαδή ότι δεν επηρεάζουν σημαντικά, γιατί το πρόβλημα περιπλέκεται ακόμη περισσότερο. Τέτοιοι παράγοντες είναι η υγρασία που απορροφά τους ρύπους και ελαττώνει εν γένει τη ρύπανση, η ηλιοφάνεια που επηρεάζει τις φωτοχημικές αντιδράσεις της ατμόσφαιρας, οι αλληλεπιδράσεις των ρύπων, που μπορεί να είναι φυσικές ή χημικές, η τραχύτητα του εδάφους που επηρεάζει την ένταση της τύρβης κ.α.

Η προσομοίωση της διασποράς του πλουμίου γύρω από αποθήκες και πολύ περισσότερο στην περίπτωση πυρκαγιάς, δεν αποδίδεται ικανοποιητικά με τα συμβατικά μοντέλα τύπου Gauss, τα οποία έχουν ικανοποιητική απόδοση για καμινάδες σχετικά μεγάλου ύψους. Για τον λόγο αυτό, παρόμοια προβλήματα συνήθως διερευνώνται με πειράματα μικρής κλίμακας σε αεροσήραγγα ή με μοντέλα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, όπως στην παρούσα εργασία. Στα μοντέλα αυτά επιλύονται οι πλήρεις διαφορικές εξισώσεις Navier-Stokes και χρησιμοποιούνται τα πλέον 'αξιόπιστα' σήμερα μοντέλα τύρβης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

4.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΟΓΚΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ

Για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων ελέγχου. Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια ειδική περίπτωση της κατηγορίας πεπερασμένων διαφορών. Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (*Finite Difference Method*) μαζί με τις μεθόδους των πεπερασμένων στοιχείων (*Finite Element Method*) αποτελούν τις σημαντικότερες μεθόδους αριθμητικής επίλυσης. Οι αριθμητικές τεχνικές επίλυσης προβλημάτων ακολουθούν κάποια συγκεκριμένα βήματα τα οποία καθορίζουν τη διαδικασία επίλυσης [1]. Τα βήματα αυτά είναι τα ακόλουθα:

- Προσέγγιση των άγνωστων μεταβλητών ροής με τη βοήθεια απλών διαδικασιών
- Διακριτοποίηση με μετασχηματισμό των διαφορικών εξισώσεων σε αλγεβρικές σε εξισώσεις
- Επίλυση των αλγεβρικών εξισώσεων

Οι κύριες διαφορές μεταξύ των διαφορετικών μεθόδων επίλυσης σχετίζονται με τις προσεγγίσεις των μεταβλητών ροής και με τη διαδικασία διακριτοποίησης. Το πιο μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου των πεπερασμένων όγκων ελέγχου είναι ότι η προκύπτουσα λύση τηρεί την ολοκληρωτική διατήρηση μάζας, ορμής και θερμότητας για όλους τους όγκους ελέγχου και συνεπώς για ολόκληρο το πεδίο ροής. Η ιδιότητα αυτή τηρείται για οποιοδήποτε αριθμό πλεγματικών σημείων και δεν έχει την έννοια της οριακής ισχύος όταν ο αριθμός των πλεγματικών σημείων αυξάνει πολύ [2,3]. Αν όντως αυξηθεί ο αριθμός των πλεγματικών σημείων, η υπολογιζόμενη λύση θα προσεγγίζει περισσότερο την πραγματική. Ως εκ τούτου η συγκεκριμένη μέθοδος είναι ίσως η πιο διαδεδομένη για τους κώδικες υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) και παραδείγματα εμπορικού λογισμικού που χρησιμοποιεί αυτή τη μέθοδος είναι τα *Phoenics* (Cham UK Ltd.), *Fluent* (Fluent Inc.), *CFX* (Ansys) κ.α.

Στην συγκεκριμένη εργασία για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου τρισδιάστατου προβλήματος επιλέχθηκε η χρήση του *Phoenics*, του οποίου η ονομασία προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων **Parabolic Hyperbolic Or Elliptic Numerical Integration Code Series** της εταιρείας Cham Ltd.

Ο υπολογιστικός κώδικας χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων ελέγχου (*Finite Volume Method*), η οποία ανήκει στις ολοκληρωτικές μεθόδους αριθμητικής επίλυσης μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η μέθοδος είναι ευρείας εφαρμογής και μπορεί να επιλύσει με επιτυχία προβλήματα θερμότητας, μάζας και ορμής.

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην διακριτοποίηση του πεδίου ροής σε μικρότερους όγκους ελέγχου που δεν αλληλοεπικαλύπτονται και περιβάλλουν καθένα ένα ξεχωριστό πλεγματοειδές σημείο. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει τρία στάδια: τη δημιουργία πλέγματος, τη διακριτοποίηση και τέλος την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων [4].

4.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

4.2.1 ΟΛΟΚΛΗΡΩΤΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΤΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Η διαφορική μορφή της γενικευμένης εξίσωσης μεταφοράς περιγράφεται παρακάτω ως εξής (*Versteeg and Malalasekera, 1995*):

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \text{div } \rho \mathbf{u} \phi = \text{div } \Gamma \text{grad } \phi + S_{\phi}$$

Όπου: t: ο χρόνος

ρ: η πυκνότητα του ρευστού

φ: μεταβλητή Φ ανά μονάδα μάζας

u : η ταχύτητα

Γ: ο συντελεστής διάχυσης της ποσότητας Φ

S: ο ρυθμός παραγωγής ή κατανάλωσης της Φ

Η παραπάνω μορφή της γενικευμένης εξίσωσης μεταφοράς εκφράζεται σε λέξεις

ως εξής:

$$\begin{aligned} & \text{Ρυθμός αύξησης της μεταβλητής } \Phi \text{ του στοιχείου ρευστού} \\ & + \\ & \text{Καθαρός ρυθμός εκροής } \Phi \text{ από το στοιχείο ρευστού.} \\ & = \\ & \text{Ρυθμός αύξησης της μεταβλητής } \phi \text{ λόγω διάχυσης} \\ & + \\ & \text{Ρυθμός αύξησης της μεταβλητής } \Phi \text{ λόγω πηγών} \end{aligned}$$

Με άλλα λόγια η εξίσωση μεταφοράς αποτελείται από τους αντίστοιχους όρους κατά σειρά εμφάνισης: το μεταβατικό όρο, τον όρο συναγωγής, τον όρο διάχυσης και τον όρο πηγής.

Η εξίσωση μεταφοράς χρησιμοποιείται ως το αρχικό στάδιο της υπολογιστικής διεργασίας για τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων ελέγχου.

Ξεκινώντας από την παραπάνω διαφορική μορφή της εξίσωσης μεταφοράς μπορούμε να ολοκληρώσουμε πάνω σε ένα τρισδιάστατο πεπερασμένο όγκο ελέγχου CV, οπότε θα έχουμε:

$$\int_{CV} \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \int_{CV} \text{div } \rho \mathbf{u} \phi dV = \int_{CV} \text{div } \Gamma \text{grad } \phi dV + \int_{CV} S_{\phi} dV$$

Με την εφαρμογή του θεωρήματος απόκλισης του Gauss μετασχηματίζεται ο όρος της συναγωγής και της διάχυση; ως επιφανειακό ολοκλήρωμα πάνω στην επιφάνεια του όγκου ελέγχου, που για άνυσμα a θα γίνει:

$$\text{div } a dV = \int_A n a dA$$

Όπου το $n a$ είναι η συνιστώσα του a στη διεύθυνση του n που είναι το κάθετο μοναδιαίο άνυσμα στην επιφάνεια A .

Επομένως προκύπτει:

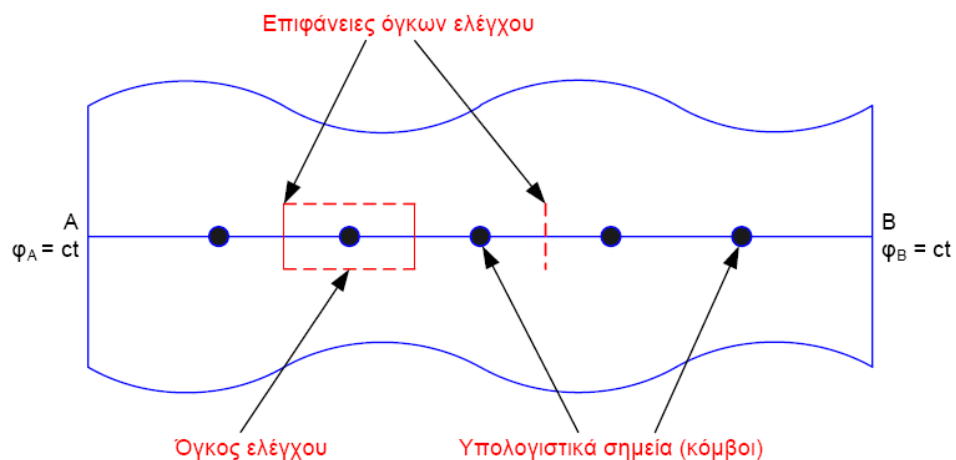
$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho \phi dV + \int_A n \rho u_i dA = \int_A n \Gamma \text{grad} \phi dA + \int_{CV} S_\phi dV$$

4.2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

Η μαθηματική μέθοδος που θα περιγραφεί στη συνέχεια, αποτελεί ουσιαστικά τα στάδια της μεθόδου των πεπερασμένων όγκων ελέγχου, δηλαδή τη δημιουργία πλέγματος, τη διακριτοποίηση και την επίλυση των τελικών εξισώσεων που προκύπτουν καθώς και την αντιμετώπιση των όρων πηγής, διάχυση; και συναγωγής.

Στάδιο 1ο: Δημιουργία πλέγματος - Όγκοι Ελέγχου

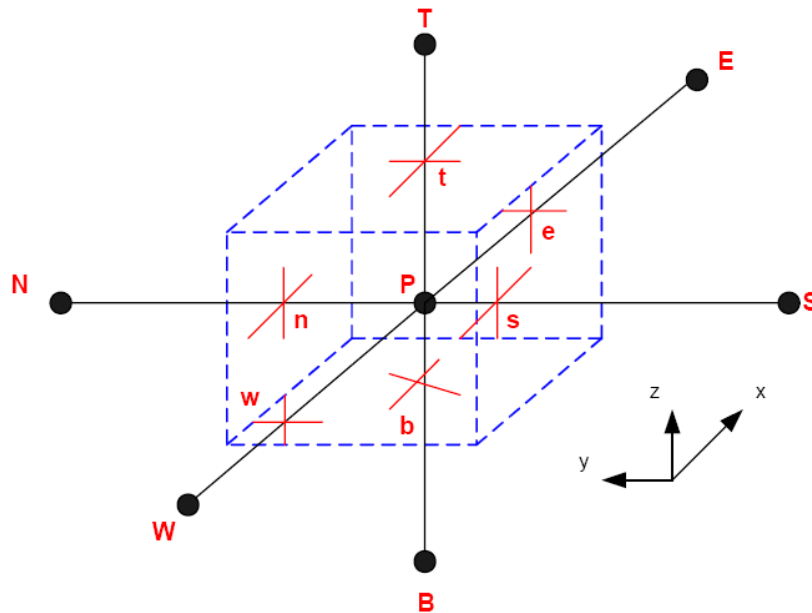
Το αρχικό βήμα στη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων ελέγχου είναι η διαίρεση του πεδίου σε επιμέρους όγκους ελέγχου όπως στο παρακάτω σχήμα Έπειτα υφίσταται ολοκλήρωση όλων των εξισώσεων διατήρησης του ρευστού πάνω σε όλους τους πεπερασμένους όγκους ελέγχου του χωρίου επίλυσης.



Εικόνα 1 Διαίρεση του υπολογιστικού πεδίου σε όγκους ελέγχου

Για το σκοπό αυτό το πεδίο κατανέμεται σε πεπερασμένους όγκους τυχαίου

μεγέθους αλλά πάντοτε σε καρτεσιανές συντεταγμένες. Τέλος οι όγκοι ελέγχου μπορεί να έχουν σχήμα μη-ορθογωνίου, αλλά θα έχουν πάντα έξι ακμές και έξι πλευρές, στη τρισδιάστατη δομή. Στο εσωτερικό κάθε όγκου ελέγχου υπάρχει το σημείο P όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα που αποτελεί το χώρο στο οποίο εισάγονται οι τιμές των βαθμωτών μεγεθών. Η θέση των κόμβων είναι απαραίτητη για τη δημιουργία του πλέγματος. Εν συνεχεία στο διάστημα μεταξύ δύο κόμβων και κάθετα στη γραμμή που τους ενώνει υπάρχουν τα μέτωπα των όγκων ελέγχου.



Εικόνα 2 Στοιχειώδης Όγκος Ελέγχου

Στάδιο 2^ο: Διακριτοποίηση

Επομένως, ορίζονται τέσσερα πλέγματα, το αρχικό των βαθμωτών μεγεθών και τα τρία μετατοπισμένα πλέγματα ή πλέγματα ταχυτήτων. Έπειτα μετά την διακριτοποίηση του χώρου λαμβάνει χώρα η διακριτοποίηση των διαφορικών εξισώσεων. Επιτυγχάνεται με τη μετατροπή σε κάθε κόμβο του πλέγματος της διαφορικής εξίσωσης σε αλγεβρική καθώς και τη μετατροπή των αρχικών και οριακών συνθηκών της διαφορικής εξίσωσης σε εκφράσεις πεπερασμένων διαφορών, στους κόμβους που βρίσκονται πάνω ή κοντά στο όριο του πεδίου ροής (*Μπεργελές, 1999*).

Ως εκ τούτου με εφαρμογή της εξίσωσης μεταφοράς για τον όγκο ελέγχου του θα έχουμε:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \varphi V_P + g_e - g_w + g_n - g_s + g_h - g_t = S_V V_P$$

όπου

$$g_i = \int_{A_e} \rho u_i \varphi - \Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x} dA_i$$

με $i=e,t,s,n,b,w$ είναι η ανηγμένη ροή της ποσότητας φ από την επιφάνεια του όγκου ελέγχου.

Στη συνέχεια η διακριτοποίηση της εξίσωσης μεταφοράς γίνεται σύμφωνα με τις εξής παραδοχές:

1. Ομοιόμορφη κατανομή των διαφορών μεγεθών στον όγκο ελέγχου, άρα θα έχουμε:

$$\rho \varphi V_P = \rho_P \varphi_P V_P \quad \text{και} \quad S_\varphi V_P = S_{\varphi,P} V_P$$

2. Ομοιόμορφη κατανομή των ποσοτήτων στα μέτωπα του όγκου ελέγχου
3. Μόνιμες συνθήκες. Οπότε υφίσταται απαλειφή ο όρος της μερικής παραγώγου ως προς το χρόνο.

Οπότε σύμφωνα με τις παραπάνω παραδοχές η εξίσωση μεταφοράς παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$CE + DE - CW + DW + CN + DN - CS + DS + CT + DT - CB + DB = S_{\varphi,P} V_P$$

$$\text{Συναγωγή: } CE = \rho u_e A_e \varphi_e \quad \text{και} \quad \text{διάχυση: } DE = \Gamma_e A_e \frac{\partial \varphi}{\partial x}_e$$

Οι τιμές της πυκνότητας ρ και του συντελεστή Γ στα μέτωπα των όγκων ελέγχου υπολογίζονται με γραμμική παρεμβολή. Σε περίπτωση που οι συντελεστές εναλλαγής παρουσιάζουν ασυνέχειες στα μέτωπα του όγκου ελέγχου είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί ο μέσος αρμονικός των τιμών.

Οι τιμές των μερικών παραγώγων διακριτοποιούνται με δι'αφορες μεθόδους από τις τιμές του μεγέθους στα κέντρα των γειτονικών κελιών.

Ο αριθμός Peclet ορίζεται ως εξής:

$$Pe = \frac{F_i}{D_i}$$

όπου

$F_i = A_i u_i \rho_i$, η ποσότητα που αντιπροσωπεύει την μεταφορά της φ λόγω συναγωγής και

$D_i = \frac{\Gamma_{\varphi,i} A_i}{\delta_i}$, η ποσότητα που αντιπροσωπεύει την μεταφορά της φ λόγω διάχυσης, με

A_i η επιφάνεια του μετώπου i και δ_i η απόσταση του κέντρου από το μέτωπο.

Οι τιμές της φ στα μέτωπα του κελιού προσεγγίζονται με το «υβριδικό σχήμα», σύμφωνα με το οποίο:

α) Όταν $Pe > 2$, χρησιμοποιείται το σχήμα των «ανάντη διαφορών», σύμφωνα με το οποίο η τιμή της φ στο μέτωπο ισούται με την τιμή στο κεντρικό πλεγματοειδές σημείο που βρίσκεται ανάντη της διεπιφάνειας.

β) Όταν $Pe < 2$, χρησιμοποιείται το σχήμα των «κεντρικών διαφορών», σύμφωνα με το οποίο η τιμή της φ στο μέτωπο μεταβάλλεται γραμμικά από το ένα πλεγματοειδές σημείο στο άλλο.

Τέλος, ο όρος πηγής γραμμικοποιείται ως εξής:

$$S_{\varphi} = S_C + S_P \Phi_P$$

όπου

$$S_C = S_{\varphi}^0 - \frac{dS_{\varphi}}{d\varphi} \Phi_P^0$$

$$S_P = \frac{dS_{\varphi}}{d\varphi}$$

Και ο εκθέτης 0 υποδηλώνει τιμές της προηγούμενης επανάληψης ή εκτιμημένες τιμές για την πρώτη επανάληψη.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι οριακές συνθήκες που επιβάλλονται στα όρια του πεδίου, και όχι μόνο, υπεισέρχεται στις εξισώσεις σαν όροι πηγής και γραμμικοποιούνται με τον παραπάνω τρόπο.

Μετά την διακριτοποίηση όλων των όρων της εξίσωσης, αυτό που προκύπτει τελικά είναι μια αλγεβρική εξίσωση για κάθε πλεγματοειδές σημείο P η οποία λύνεται επαναληπτικά, και έχει την μορφή:

$$a_P - S_P V_P \Phi_P = \sum_i a_i \varphi_i + S_C V_P, \quad i = E, W, N, S, H, L.$$

Στάδιο 3^ο: Επίλυση αλγεβρικών εξισώσεων

Τέλος έχουμε επίλυση των αλγεβρικών εξισώσεων (μερικές διαφορικές εξισώσεις) με χρήση επαναληπτικής μεθόδου. Χρησιμοποιούμε επαναληπτική μέθοδο επίλυσης διότι έχουμε συστήματα γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων και σε σχέση με τις άμεσες μέθοδοι είναι πολύ καλύτερες τόσο σε αποτελέσματα όσο και στην αποτελεσματικότητά τους. Οι επαναληπτικές μέθοδοι διακρίνονται για την καλύτερη αποτελεσματικότητά τους σε σχέση με τις άμεσες μεθόδους, διότι εκμεταλλεύονται την αραιή μορφή του πίνακα των συντελεστών. Επίσης μεγάλο πλεονέκτημά τους είναι ότι δεν κουράζουν το υπολογιστικό δυναμικό αφού δεν πραγματοποιούν πράξεις με το μηδέν. Το μόνο πρόβλημα που υπάρχει σε αυτές τις μεθόδους είναι η σύγκλιση της επαναληπτικής διαδικασίας, δηλαδή οι συνθήκες στις οποίες είναι δυνατή η σύγκλιση. Τέλος η αρχή εφαρμογής των επαναληπτικών μεθόδων έγκειται στην αναδιάταξη του αρχικού συστήματος αλγεβρικών εξισώσεων, έτσι ώστε η επίλυσή του να χρησιμοποιεί όσο γίνεται λιγότερο υπολογιστικό χρόνο. Αναφορικά μερικές από αυτές τις μεθόδους είναι η μέθοδος Jacobi, η μέθοδος Gauss-Siedel, η μέθοδος της διαδοχικής υποχαλάρωσης κ.α.

4.3 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

4.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για την επίλυση μιας ορισμένης Φ μεταβλητής όπως της παραπάνω εξίσωσης θα απαιτηθεί μια εξίσωση όπου η Φ να είναι κυρίαρχη μεταβλητή. Για την επίλυση τέτοιων εξισώσεων χρησιμοποιούνται κάποιοι αλγόριθμοι μερικοί από τους πιο γνωστούς αναφέρονται παρακάτω:

- **SIMPLE** (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)
- **SIMPLER** (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations Revised)
- **SIMPLEST** (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations Shortened)
- **SIMPLEC** (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations Consistent)
- **PISO** (Pressure Implicit with Splitting of Operators)

Από τους παραπάνω αλγόριθμους αν εξαιρεθεί ο αλγόριθμος **PISO** όλοι οι άλλοι είναι επεκτάσεις του πολύ πετυχημένου αλγόριθμου **SIMPLE**. Ο αλγόριθμος **SIMPLE** γράφτηκε από του Patankar και Spalding το 1972 (*Patankar and Spalding, 1972*) και κατά καιρούς έχουν αναφερθεί και άλλοι (*Caretto et al., 1972*), (*Patankar, 1975*). Αν και πολύ πετυχημένος ο αλγόριθμος **SIMPLE** απαιτεί υποχαλάρωση και πολλές επαναλήψεις, ιδιαίτερα για πυκνά πλέγματα. Ως εκ τούτου προτάθηκαν βελτιωμένες μορφές του, προκειμένου να απαλειφθούν τα μειονεκτήματά του.

Μια από αυτές τις βελτιωμένες μορφές είναι ο αλγόριθμος **SIMPLER** (*Patankar, 1979*), (*Patankar, 1980*) όπου προτάθηκε με την προσδοκία να βελτιώσει την σύγκλιση. Η λειτουργία του στηρίζεται στον υπολογισμό του πεδίου των p^* από τα πεδία των u, v, w , που ικανοποιούν την εξίσωση συνέχειας. Επίσης, ο συγκεκριμένος αλγόριθμος λύνει μια επιπλέον εξίσωση τύπου Poisson για τα p^* με ADI. Η εξίσωση αυτή δημιουργείται με την εισαγωγή στην εξίσωση συνέχειας «ψευδοταχυτήτων» u, v, w , έτσι υπάρχει δημιουργία «ψευδοσφαλμάτων». Η εξίσωση του p^* είναι ίδια με αυτή του p' , ενώ οι «ψευδοταχύτητες» προκύπτουν από τις εξισώσεις ορμής χωρίς την κλίση πίεσης (*Μαρκάτος, 1988*).

Επομένως, ο **SIMPER** χρειάζεται περισσότερο υπολογιστικό χρόνο από τον **SIMPLE** αλλά συγκλίνει ευκολότερα.

Τον ίδιο χρόνο ο Spalding πρότεινε μια περαιτέρω βελτίωση του **SIMPLE** τον **SIMPLEST** (*Spalding, 1980*) όπου είναι και ο αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος που πραγματεύεται η εργασία. Ο **SIMPLEST** θα αναλυθεί περισσότερο στην επόμενη ενότητα.

Το 1984 οι Van Doormal και Raithby πρότειναν μια νέα βελτίωση του **SIMPLE** τον **SIMPLEC** (*Van Doormal and Raithby, 1984*). Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος βελτιώθηκε ως προς την εξίσωση διόρθωσης της πίεσης με συνέπεια να μην χρειάζεται υποχαλάρωση. Επιπλέον, στις εξισώσεις ορμής μπορούν να χρησιμοποιηθούν σχετικά μεγαλύτεροι συντελεστές υποχαλάρωσης επιτρέποντας, έτσι μια ταχύτερη σύγκλιση της επίλυσης.

Τέλος, το 1986 ο Issa πρότεινε μια παραλλαγή του **SIMPLE** τον **PISO** (Issa, 1986). Ο **PISO** είναι ένας αλγόριθμος που επιλύει μια εξίσωση πίεσης – ταχύτητας

για τον μη-επαναληπτικό υπολογισμό των ασταθών συμπίεσιμων ροών. Επίσης, έχει εφαρμοστεί με μεγάλη επιτυχία για επαναληπτική ακολουθία λύσης σε μη χρονικά μεταβαλλόμενα προβλήματα. Τέλος, ο αλγόριθμος **PISO** περιλαμβάνει ένα περαιτέρω στάδιο διόρθωσης σε σχέση με το **SIMPLE** (*Versteeg and Malalasekera, 1995*).

4.3.2 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ SIMPLEST

Ο αλγόριθμος **SIMPLEST** (*Spalding, 1980*) αντιμετωπίζει αυτό το πρόβλημα εκτιμώντας ένα πεδίο πίεσης και στη διόρθωση αυτού μέχρι οι ταχύτητες που προκύπτουν, να ικανοποιούν την εξίσωση συνέχειας και τις εξισώσεις ορμής.

Ως εκ τούτου, τα βήματα του αλγόριθμου που είναι αντίστοιχα ίδια με του **SIMPLE** είναι (*Μαρκάτος και Ασημακόπουλος, 1995*):

1. Εκτίμηση πεδίου πίεσης p^*
2. Επίλυση εξισώσεων ορμής για (u^*, v^*)
3. Επίλυση εξίσωσης διόρθωσης πίεσης
4. Υπολογισμός σωστής πίεσης από $p = p^* + p'$
5. Διόρθωση ταχυτήτων από τη σχέση: $u'_w = u_w^* + DU \cdot (p'_w - p'_p)$
6. Επίλυση εξισώσεων βαθμωτών μεγεθών (θερμότητα, συγκέντρωση συστατικού)
7. Επιστροφή στο Βήμα 1, θέσε $p^* = p$ και επανέλαβε μέχρι να πραγματοποιηθεί η σύγκλιση.

Ο αλγόριθμος **SIMPLEST** είναι μια βελτιωμένη εκδοχή του αλγόριθμου **SIMPLE**. Η διαφορά στους δύο αλγόριθμους είναι ότι στη περίπτωση του πρώτου οι όροι συναγωγής των διακριτοποιημένων εξισώσεων ορμής διαχωρίζονται από τους όρους διάχυσης και συγκεντρώνονται μαζί με τους όρους πηγής όπου αντιμετωπίζονται ως γνωστές σταθερές. Κατά αυτόν τον τρόπο, στην εξίσωση διόρθωσης των ταχυτήτων χρησιμοποιούνται μονάχα οι όροι διάχυσης σε αντίθεση με τη περίπτωση του **SIMPLE** που εισάγονται και οι όροι διάχυσης και οι όροι συναγωγής.

Έτσι το πλεονέκτημα του **SIMPLEST** είναι ότι χειρίζεται τη διάχυση με μεθόδους ταυτόχρονης επίλυσης, ενώ τη μεταφορά δια συναγωγής με μεθόδους σημείο – προς – σημείο. Τέλος, στη περίπτωση του αλγόριθμου **SIMPLEST** που χρησιμοποιεί τη μέθοδο Jacobi, έχουμε ταχύτερη και πιο ομαλή σύγκλιση σε σχέση με τον **SIMPLE** και επιπλέον απαιτούνται μικρότερες υποχαλαρώσεις (*Markatos and Pericleous, 1984*).

4.3.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με τον Jang (*Jang et al, 1986*) σε μια σύγκριση που έκανε για τους αλγόριθμους **PISO**, **SIMPER** και **SIMPLEC** πάνω σε προβλήματα μόνιμης ροής έδειξε ότι για προβλήματα στα οποία οι εξισώσεις κίνησης δεν συνδυάζονται με μια κλιμακωτή μεταβλητή, ο αλγόριθμος **PISO** έδειξε καλή συμπεριφορά σύγκλισης και χρειάστηκε λιγότερο υπολογιστικό χρόνο σε σχέση με τους υπόλοιπους αλγόριθμους. Επίσης παρατηρήθηκε ότι όταν οι κλιμακωτές μεταβλητές συνδυάζονταν κλειστά με τις ταχύτητες, ο αλγόριθμος **PISO** δεν είχε σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με τους άλλους αλγόριθμους. Γενικά πάντως έχει αποδειχτεί από συγκρίσεις ότι η αποδοτικότητα των αλγόριθμων εξαρτάται από τις συνθήκες ροής, το βαθμό συνδυασμού των εξισώσεων κίνησης και των μεταβλητών εξισώσεων. Οι επαναληπτικές μέθοδοι πάντως χρησιμοποιούν κυρίως τους αλγόριθμους **SIMPER** και **SIMPEC** επειδή έχουν πολύ καλή σύγκλιση, αλλά τίποτα δεν μπορεί να βεβαιώσει ότι ο ένας σε σχέση με τον άλλο αλγόριθμο είναι ανώτερός του ή όχι. Επιπλέον είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί ότι όλοι οι αλγόριθμοι χρειάζονται υποχαλάρωση προκειμένου να εξασφαλίσουν σταθερότητα στις επαναληπτικές μεθόδους.

Ο Anderson και οι ομάδα του (*Anderson et al., 1984*) υποστηρίζουν ότι ο αλγόριθμος **SIMPER** κάνει 30% περισσότερο υπολογισμούς σε σχέση με τον **SIMPLE**, έτσι η γρήγορη σύγκλιση μειώνει τον υπολογιστικό χρόνο κατά 30 – 50%.

Τέλος, ο αλγόριθμος **SIMPLE** υπήρξε επιτυχής, αλλά έχει αρκετά μειονεκτήματα και όσο περνάει ο καιρός τόσο λιγότερο χρησιμοποιείται. Οι αλγόριθμοι **SIMPLER** και **SIMPLE** αποτελούν προσπάθειες εξάλειψης των μειονεκτημάτων του **SIMPLE** και δημιουργίας μια άριστης μεθόδου. Ταυτόχρονα η έρευνα συνεχίζεται και έχει πολύ δρόμο μέχρι τον τελικό σκοπό της, αφού υπάρχει μεγάλο πεδίο βελτίωσης και διερεύνησης (*Μαρκάτος, 1988*).

Έχοντας καθορίσει την μέθοδο (πεπερασμένοι όγκοι ελέγχου) και τον αλγόριθμο επίλυσης **SIMPLET**, η ολοκλήρωση της αριθμητικής επίλυσης θα γίνει με την αναφορά των τεσσάρων βασικών κανόνων που θα πρέπει να πληρεί η μοντελοποίηση του προβλήματος.

4.4 ΟΙ ΤΕΣΣΕΡΙΣ ΒΑΣΙΚΟΙ ΚΑΝΟΝΕΣ

Για να εξασφαλιστεί η ρεαλιστική λύση και να κλείσει το ολικό ισοζύγιο, οι εξισώσεις διακριτοποίησης του χώρου πρέπει να υπακούουν σε τέσσερις βασικούς κανόνες.

Οι τέσσερις κανόνες που πρέπει να πληρεί κάθε πιθανή μοντελοποίηση ενός προβλήματος που επιλύεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων είναι οι ακόλουθοι [4,5]:

- 1. Αντιστρεπτότητα:** Όταν μια επιφάνεια είναι κοινή σε δύο γειτονικούς όγκους ελέγχου, τότε η ροή διαμέσου της επιφάνειας αυτής πρέπει να αναπαριστάται από την ίδια έκφραση στις διακριτοποιημένες εξισώσεις για τους δύο όγκους ελέγχου.

Έτσι, η θερμική ροή που εγκαταλείπει ένα όγκο ελέγχου διαμέσου μιας επιφάνειας του πρέπει να είναι ίδια με την ροή που εισέρχεται στο επόμενο όγκο ελέγχου διαμέσου της ίδιας επιφάνειας, αλλιώς το συνολικό ισοζύγιο δεν θα ικανοποιείται.

2. Θετικοί συντελεστές: Οι περισσότερες περιπτώσεις προβλημάτων είναι τέτοιας μορφής ώστε οι τιμές μιας εξαρτημένης μεταβλητής σε ένα κόμβο να επηρεάζονται από τις τιμές της στους γειτονικούς κόμβους μόνο μέσω συναγωγής και διάχυσης. Συνεπώς η αύξηση μιας τιμής πρέπει να οδηγήσει σε αύξηση της τιμής στο γειτονικό κόμβο και όχι σε μείωση, όταν οι άλλες συνθήκες παραμένουν αμετάβλητες. Επομένως, αύξηση της T_E πρέπει να οδηγεί σε αύξηση της T_P οπότε οι συντελεστές a_E και a_P πρέπει να είναι ομόσημοι. Επιλέγοντας τους συντελεστές να είναι θετικοί προκύπτει ότι, όλοι οι συντελεστές θα πρέπει να είναι πάντα θετικοί.

3. Γραμμικοποίηση πηγών με αρνητική κλίση: Σύμφωνα με τις εξισώσεις που χαρακτηρίζουν τη μέθοδο ακόμα και στην περίπτωση που όλοι οι γειτονικοί συντελεστές είναι θετικοί, ο συντελεστής του κεντρικού σημείου μπορεί να προκύψει αρνητικός μέσω του όρου πηγής S_P . Ο κίνδυνος αυτός αντιμετωπίζεται αν απαιτηθεί ο όρος S_P να μην είναι θετικός. Ο κανόνας αυτός αν και φαίνεται αυθαίρετος δεν είναι. Ο μεγάλος αριθμός των φυσικών διεργασιών παρουσιάζει σχέση αρνητικής κλίσης μεταξύ της μεταβλητής και του όρου πηγής. Πράγματι, αν το S_P ήταν θετικό, η φυσική διεργασία μπορεί να γινόταν ασταθής. Θετικό S_P σημαίνει ότι η πηγή αυξάνει με το T_P , πράγμα το οποίο οδηγεί σε νέα αύξηση του T_P . Τέλος, από υπολογιστικής άποψης είναι απολύτως απαραίτητο να είναι αρνητικό το S_P ώστε να μην δημιουργηθούν ασταθής και μη ρεαλιστικές συνθήκες στη λύση του προβλήματος.

4. Άθροισμα των γειτονικών συντελεστών: Πολλές φορές οι διαφορικές εξισώσεις περιέχουν μόνο παραγώγους των μεταβλητών. Τότε Φ και $\Phi+c$ (όπου c μια αυθαίρετη σταθερά) ικανοποιούν την διαφορική εξίσωση. Η ιδιότητα αυτή της διαφορικής εξίσωσης θα πρέπει να αντικατοπτρίζεται και στην αντίστοιχη διακριτοποιημένη εξίσωση. Ως εκ τούτου, η αλγεβρική εξίσωση θα πρέπει να ικανοποιείται αν αυξηθούν όλα τα T_P και όλα τα T_γ κατά μια οποιαδήποτε σταθερά. Έτσι, προκύπτει ο τέταρτος κανόνας σύμφωνα με τον οποίο θα πρέπει $a_P = -a_\gamma$ στις περιπτώσεις που η διαφορική εξίσωση ικανοποιείται από το Φ και το $\Phi+c$. Ο κανόνας αυτός υπονοεί πως η κεντρική τιμή T_P είναι ένας σταθμισμένος μέσος όρος των γειτονικών τιμών των T_γ . Όταν όμως ο όρος πηγής εξαρτάται από τη θερμοκρασία τότε παρατηρείται ότι ισχύει $a_P = a_\gamma - S_P$. Στην περίπτωση αυτή ο κανόνας δεν εφαρμόζεται αλλά δεν παραβιάζεται κιόλας. Όταν ο όρος πηγής εξαρτάται από την θερμοκρασία τότε η διαφορική εξίσωση δεν ικανοποιείται από τη Φ και από την $\Phi+c$. Ακόμα όμως και σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να ισχύει ότι $S_P=0$. Όταν δεν υπάρχει όρος πηγής και όλα τα T_γ είναι ίσα τότε θα

πρέπει και η κεντρική διαφορά T_P να είναι ίση με τις γειτονικές. Μόνο μια πολύ κακή μέθοδος δεν θα έδινε τέτοια λύση υπό αυτές τις συνθήκες.

4.5 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΥΠΟΧΑΛΑΡΩΣΗΣ

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. Στον λογισμικό του PHOENICS χρησιμοποιούνται κυριώς δύο τεχνικές υποχαλάρωσης, η γραμμική υποχαλάρωση και η υποχαλάρωση ψευδούς χρονικού βήματος.

4.5.1 ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΥΠΟΧΑΛΑΡΩΣΗ

Η γραμμική υποχαλάρωση (*linear relaxation*) χρησιμοποιείται για τη πίεση και τις μεταβλητές που δεν υπολογίζονται από τις διαφορικές εξισώσεις. Επίσης, είναι η πιο κοινή τεχνική υποχαλάρωσης της λύσης. Έτσι, η νέα τιμή της λύσης, έστω φ^{new} , υποχαλαρώνεται και προκύπτει :

$$\varphi^{\text{new}} = \alpha \varphi^{\text{new}} + (1 - \alpha) \varphi^{\text{old}}$$

Ο α είναι ο συντελεστής υποχαλάρωσης και δεν υπάρχουν γενικοί κανόνες εκλογής του. Η τιμή του εξαρτάται από τη φύση του προβλήματος, τον αριθμό των κόμβων και τη μέθοδο επίλυσης. Η τιμή του α μπορεί να μεταβάλλεται από επανάληψη σε επανάληψη, ακόμα και από κόμβο σε κόμβο.

4.5.2 ΥΠΟΧΑΛΑΡΩΣΗ ΨΕΥΔΟΥΣ ΧΡΟΝΙΚΟΥ ΒΗΜΑΤΟΣ

Η υποχαλάρωση μέσω ψευδούς χρονικού βήματος (*false time step relaxation*), η οποία χρησιμοποιείται για όλες τις υπόλοιπες μεταβλητές εκτός της πίεσης, τροποποιεί τις εξισώσεις των πεπερασμένων όγκων, εισάγοντας ένα ψευδομεταβατικό όρο πηγής :

$$S_\varphi = \rho V_P \frac{\varphi^{\text{old}} - \varphi^{\text{new}}}{df_t}$$

Εν συνεχεία η γραμμικοποίηση του παραπάνω όρου δίνει τους ακόλουθους όρους :

$$S_u = \frac{\rho V_P}{df_t} \varphi^{\text{old}}$$

$$S_p = - \frac{\rho V_P}{df_t}$$

Ο συντελεστής df_t ονομάζεται συντελεστής υποχαλάρωσης και εκφράζει το ψευδές χρονικό βήμα. Όσο μικρότερος είναι ο συντελεστής τόσο αυτός, τόσο πιο

μεγάλη είναι η τιμή των όρων S_D και S_P . Ως εκ τούτου η νέα λύση τείνει να ταυτιστεί με τη προηγούμενη επανάληψη (ισχυρή υποχαλάρωση).

4.6 ΣΥΓΚΛΙΣΗ

Η σύγκλιση είναι το αποτέλεσμα μετάθεσης του λάθους και της εξάλειψης του στα όρια που επιλέγονται στην εκάστοτε περίπτωση. Όσον αφορά την επίτευξη σύγκλισης εφαρμόζονται τα παρακάτω κριτήρια :

1. Η πτώση των υπολοίπων στις εξισώσεις κάτω από μια συγκεκριμένη τιμή που έχει επιλεγεί από τον χρήστη. Τα υπόλοιπα εκφράζουν τις διαφορές των μεταβλητών μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων.
2. Η σταθερότητα της τιμής μιας μεταβλητής σε κάποιο κρίσιμο σημείο (Spot Value), δηλαδή σε κάποιο σημείο όπου υπάρχουν απότομες κλίσεις των επιλυόμενων μεταβλητών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΥΡΒΗΣ

5. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΥΡΒΗΣ



Εικόνα 3 Σχέδιο του Da Vinci για την τυρβώδη κίνηση των σωματιδίων (J.McDonough, 2004)

“ . . . the smallest eddies are almost numberless, and large things are rotated only by large eddies and not by small ones, and small things are turned by small eddies and large.”–

« . . . οι μικρότερες δίνες είναι σχεδόν αμέτρητες, και μεγάλα αντικείμενα περιστρέφονται μόνο με μεγάλες δίνες και όχι από μικρές, και μικρά αντικείμενα γυρίζουν από μικρές δίνες και μεγάλες.» [Da Vinci's SketchBook]

5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το κεφάλαιο της τύρβης όπως είναι γνωστό από την μηχανική των ρευστών είναι πολύ εκτεταμένο και δύσκολο στην κατανόηση του, σε τέτοια έκταση που έκανε τον H.Lamb να το κατατάξει ως το πιο δύσκολο επιστημονικό θέμα του 20^{ου} αιώνα (Γ.Μπεργελές, 2006). Για τον λόγο αυτό η κατανόηση και η εξιχνίαση του φαινομένου αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις για την κλασσική φυσική και τους ερευνητές (Χ.Α. Αργυρόπουλος, 2008).

Παρακολουθώντας με χρονολογική σειρά την έρευνα που έχει γίνει για το φαινόμενο πρώτος που παρατήρησε το φαινόμενο και προσπάθησε να το περιγράψει ήταν ο da Vinci δίνοντας το έναυσμα σε μεταγενέστερους επιστήμονες να θέσουν τις βάσεις για τη μελέτη της τύρβης σαν ένα φαινόμενο της ροής των ρευστών (J.McDonough, 2004). Το 1877 επηρεασμένος από τη σχέση τάσεων και ρυθμού

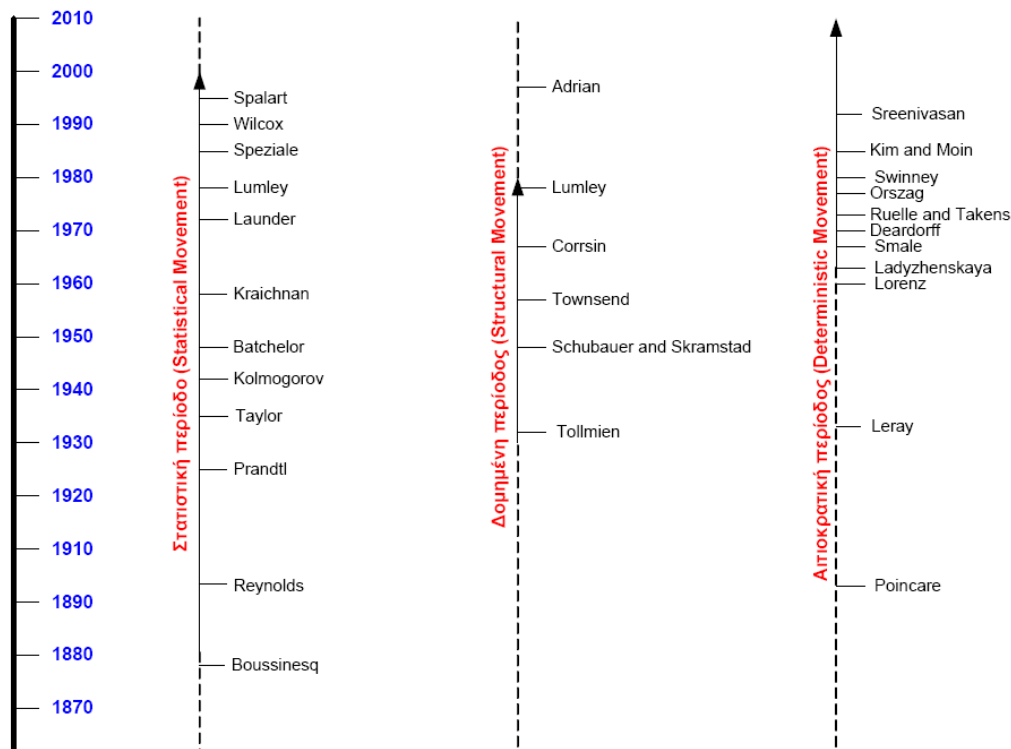
παραμόρφωσης του Newton και τις μελέτες του Reynolds για τις ιξώδης τάσεις, ο Boussinesq διετύπωσε μια παρόμοια έκφραση και για τις τάσεις Reynolds, γνωστή ως υπόθεση Boussinesq (*Γ.Μπεργελές, 2006*). Κατά τον 20^ο αιώνα επιστήμονες, όπως ο Prandtl, ο Taylor, ο Kologorov και αρκετοί ακόμα έδωσαν προσεγγιστικές λύσεις στο πρόβλημα της τύρβης για οποιαδήποτε ρευστό σε οποιαδήποτε επιφάνεια ανάλογα με τον αριθμό Reynolds στην εκάστοτε περίπτωση (*N.C.Markatos, 1985*).

Πέραν του επιστημονικού ενδιαφέροντος υπάρχει και η πρακτική ανάγκη της ποσοτικής πρόβλεψης μιας τυρβώδους ροής για σχεδιαστικούς και όχι μόνο λόγους [4]. Η τύρβη έχει μεγάλη σημασία γιατί εμφανίζεται στις βιομηχανικές διεργασίες αλλά και στην ατμόσφαιρα της Γης και άλλων πλανητών, στους ωκεανούς καθώς και στα βιολογικά συστήματα ανθρώπων, ζώων ακόμα και μερικών φυτών (*N.C.Markatos, 1998*)

Η τύρβη είναι ένα τόσο δυσνόητο θέμα την μηχανικής των ρευστών που ακόμα και ο ορισμός του φαινομένου καθίσταται δύσκολος έως αδύνατος. Γενικά, οι ομοιότητες που παρατηρούνται σε διάφορες χαοτικές ροές πολλαπλών κλιμάκων ομαδοποιούνται ως τύρβη, αν και δεν υπάρχει ισχυρό θεωρητικό υπόβαθρο ώστε να προταθεί η τύρβη ως κάποια «παγκόσμια» φυσική σταθερά (*Liakos et al., 1998*). Ένας απλουστευμένος και ευρέως γνωστός ορισμός για την τύρβη δόθηκε από τον Richardson (Cambridge University) το 1922, σύμφωνα με τον οποίο «Big whorls have little whorls, which feed on their velocity, and little whorls have lesser whorls, and so on to viscosity» - « οι μεγάλες σπείρες έχουν τις μικρές σπείρες, οι οποίες τροφοδοτούνται με την ταχύτητα τους, και οι μικρές σπείρες έχουν τις μικρότερες σπείρες οι οποίες τροφοδοτούνται από το ιξώδες» (*Richardson, 1922*). Ένας ακόμα γενικός ορισμός που δόθηκε στην τύρβη από τον T. von Karman το 1938 είναι «Turbulence is an irregular motion which in general makes its appearance in fluids, gaseous or liquid, when they flow past solid surfaces or even when neighboring streams of the same fluid flow past or over one another» - «η τύρβη είναι μια μη κανονική κίνηση που κάνει την εμφάνισή της σε ρευστά, τόσο υγρά όσο και αέρια, όταν αυτά διέρχονται από στερεές επιφάνειες ή όταν γειτονικά στρώματα του ρευστού διέρχονται το ένα από το άλλο» (*T. von Karman, 1938*)

Κανένας από τους παραπάνω ορισμούς δεν χαρακτηρίζει απόλυτα τις τυρβώδεις ροές λόγω αδυναμίας πρόβλεψης, a priori, των συνθηκών ροής και της πιθανότητας δημιουργίας ή μη δινών και ανάλογων φαινομένων τύρβης. Σύμφωνα με τους Charman και Tobak, η ανάλυση της τύρβης μπορεί να γίνει μέσα από τρεις διαφορετικές περιοχές, την στατιστική, την δομική και την ντετερμινιστική. Σύμφωνα με την τελευταία, «Turbulence is any chaotic solution to the 3-D Navier–Stokes equations that is sensitive to initial data and which occurs as a result of successive instabilities of laminar flows as a bifurcation parameter is increased through a succession of values». Ο τελευταίος ορισμός προϋποθέτει μια ροή τριών διαστάσεων, γεγονός το οποίο συμφωνεί και με τους κλασσικούς μελετητές της τύρβης, όπως είναι οι *Tenekes και Lumley* και οι *Spalding και Launder*, πράγμα το οποίο βασίζεται στη

θεώρηση ότι η τύρβη προέρχεται από την ανάπτυξη τάσεων που μπορεί να συμβεί μόνο σε επίπεδο χώρου (3 διαστάσεις) και χρόνου.



Εικόνα 4 Χρονικοί περίοδοι μελέτης της τύρβης, σύμφωνα με τους *Chapman και Tobak*

Στην πραγματικότητα κάθε ροή που υπερβαίνει τον κρίσιμο – μεταβατικό αριθμό Reynolds θεωρείται χρονικά μεταβαλλόμενη. Κατά την αύξηση της ταχύτητας, τροφοδοτείται ένας μηχανισμός, που προκαλεί αστάθεια στα επί μέρους στρώματα του ρευστού, με αποτέλεσμα την μη παράλληλη μετακίνηση του ενός με του άλλου και τη δημιουργία στροβιλισμών.

Οι συνιστώσες ταχύτητας και πίεσης έχουν ένα προφίλ περιοδικό ή μη με το χρόνο, το οποίο συνήθως κυμαίνεται γύρω από μία μέση τιμή. Ο μόνος τρόπος επίλυσης είναι η μοντελοποίηση του πεδίου ροής σε όλες τις χρονικές και χωρικές κλίμακες, συμπεριλαμβανομένης και της κίνησης των πιο μικρών δινών. Αυτό είναι πρακτικά αδύνατο λόγω ανεπαρκούς υπολογιστικής μνήμης για την κάλυψη των απαιτήσεων ενός τέτοιου συστήματος.

Για τον λόγο αυτό οι επικρατέστερες προσεγγίσεις είναι η προσομοίωση μεγάλων δινών ή Large Eddy Simulation (LES) και οι χρονικά μέσες μορφές των εξισώσεων Navier – Stokes RANS (Reynolds Averaged Navier – Stokes Equations) (*G. T. Chapman and M. Tobak, 1985*)

Οι δίνες μεγάλου μήκους περιέχουν την τυρβώδη κινητική ενέργεια ενώ οι δίνες μικρού μήκους είναι υπεύθυνες για την απορρόφηση της. Βασικά, οι δίνες μεγάλου μήκους είναι αυτές που επιδρούν στην ανάπτυξη του πεδίου ροής ή του θερμοκρασιακού πεδίου και κατά συνέπεια είναι αυτές που η μελέτη τους παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Επίσης, οι δίνες μικρού μήκους παρουσιάζουν

αρκετά χαρακτηριστικά ισοτροπικότητας και συνεπώς η μοντελοποίηση τους είναι σχετικά εύκολη.

Οι ιδέες για το μοντέλο των μεγάλων δινών (LES) ξεκίνησαν γύρω στα 1973 από το National Center of Atmospheric Research, Colorado, U.S.A. και σήμερα τίθεται σε έλεγχο κυρίως από ορισμένες ερευνητικές ομάδες του πανεπιστημίου του Standford. Η ιδέα έγκειται στο να εφαρμοσθεί φιλτράρισμα στις δίνες ανάλογα με τη διάστασή τους, σύμφωνα με τους *Pope* (2003) και *Sagaut* (2005). Τα βασικά προβλήματα του μοντέλου είναι η αντιμετώπιση των οριακών συνθηκών κοντά σε στερεό όριο, καθώς και η εναλλαξιμότητα της διαφορίσεως και του φιλτραρίσματος. Επιπρόσθετα, το μοντέλο LES είναι πολύ δαπανηρό από άποψη χρόνου υπολογισμού, διότι απαιτεί την επίλυση των εξισώσεων Navier–Stokes σε χρονικά μεταβαλλόμενη μορφή, σε αντίθεση με τις εξισώσεις Reynolds που δεν εισάγουν την παράμετρο του χρόνου.

Η προσέγγιση RANS αποτελεί την πιο δημοφιλή πρακτική. Πιο συγκεκριμένα, το υπολογιστικό κόστος είναι σημαντικά μικρότερο, και συνήθως οι βιομηχανικές εφαρμογές δεν ενδιαφέρονται για τις διακυμάνσεις ταχυτήτων και πιέσεων, αλλά ενδιαφέρονται για μια σωστή χρονική ολοκλήρωση των εξισώσεων που θα αποδώσει σωστά τις επιπτώσεις της κινητικής ενέργειας και του διασκεδασμού της τύρβης ανά μονάδα χρόνου.

5.2. ΤΑ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΗΣ ΤΥΡΒΗΣ

Η τύρβη είναι ένα τρισδιάστατο μη γραμμικό φαινόμενο που εξαρτάται από το χρόνο και για την προσομοίωση της απαιτούνται, εκτός από τις μέσες εξισώσεις Navier–Stokes, ένα σετ εξισώσεων, οι οποίες πλασματικά εκφράζουν τις σχέσεις μεταξύ των όρων των εξισώσεων αυτών. Τα διάφορα μοντέλα μεταφοράς δεν εκφράζουν τα ακριβή χαρακτηριστικά της τύρβης και με αυτόν τον τρόπο υποβαθμίζουν την φυσική διεργασία την οποία έχουν ως σκοπό να παρουσιάσουν.

Γενικά, η περιγραφή της τύρβης επιχειρήθηκε με πέντε διαφορετικούς τρόπους:

- i. Με αναλυτικές θεωρίες τύρβης, οι οποίες ακολουθούν αναλύσεις Fourier (κυματαριθμούς και συχνότητες). Αυτές είναι πολύπλοκες και δεν έχουν ακόμα εφαρμοστεί σε σύνθετα προβλήματα μηχανικής.
- ii. Μοντέλα κλεισίματος υποκλίμακας. Αυτά βασίζονται στην υπόθεση ότι η τυρβώδης κίνηση μπορεί να διαχωριστεί σε μεγάλης και μικρής κλίμακας κινήσεις έτσι ώστε ο διαχωρισμός αυτός να μην έχει σημαντική επίδραση στην εξέλιξη των μεγάλων κλιμάκων. Αυτές οι μέθοδοι παρόλο που είναι ελπιδοφόρες απαιτούν ακόμα πολύ υπολογιστικό χρόνο ώστε να βρουν πρακτικές εφαρμογές.
- iii. Άμεση αριθμητική προσομοίωση. Αυτή η μέθοδος επιδιώκει να προσομοιώσει απευθείας όλες τις δυναμικά σημαντικές κλίμακες των τυρβώδων ροών με υψηλούς αριθμούς Reynolds. Βασίζεται στην υπόθεση ότι η άμεση προσομοίωση μπορεί να εκτελεστεί με τεχνητή μείωση του αριθμού Reynolds στο σημείο εκείνο όπου οι σημαντικές κλίμακες να μπορούν να

προσομοιώσουν επακριβώς στους υπάρχοντες υπολογιστές, και ένας επαρκής αριθμός μεγάλων κλιμάκων να παραμένει αμετάβλητος με την αλλαγή του αριθμού Reynolds. Και αυτή η μέθοδος απαιτεί πολύ μεγάλο υπολογιστικό χρόνο.

- iv. Μοντέλα μεταφοράς τύρβης. Αυτά τα μοντέλα αποτελούν τη βάση της προσέγγισης του μηχανικού, όπου γίνονται προσπάθειες για την εύρεση απλουστευμένων μοντέλων των όρων που ελέγχουν την μεταφορά ορμής κ.τ.λ. Τα μοντέλα αυτά μοιάζουν με τις αναλυτικές τυρβώδεις θεωρίες στο ότι και οι δύο επεξεργάζονται τις δυναμικές ποσότητες σαν μέσα στατιστικά πεδία. Στα μοντέλα μεταφοράς τύρβης όμως προσομοιάζονται χονδρικά τα χαρακτηριστικά της τύρβης καθώς οι αναλυτικές θεωρίες δίνουν προσοχή στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διαφόρων κλιμάκων κίνησης.
- v. Μοντέλα τύρβης δύο ρευστών. Η χρήση αυτών των μοντέλων επιτρέπει δύο διαφορετικά ρευστά να υπάρχουν και να αλληλεπιδρούν στον ίδιο χώρο, προσομοιάζοντας την τμηματικότητα της τύρβης.

Το αρχικό σημείο όλων αυτών των μοντέλων είναι η εξίσωση Reynolds και το πρόβλημα «κλεισίματος» του συστήματος ανάγεται σε μοντελοποίηση των τάσεων Reynolds σε όρους ποσοτήτων της μέσης ροής. Τα απλά μοντέλα χρησιμοποιούν μια υπόθεση ιξώδους συνεκτικότητας βάση της αναλογίας μεταξύ των μοριακών και τυρβώδων κινήσεων.

Η κατάταξη των διάφορων μοντέλων εξαρτάται από τον αριθμό των συμπληρωματικών εξισώσεων που πρέπει να επιλυθούν. Αυτός ο αριθμός κυμαίνεται από μηδέν, για τα μοντέλα μηδενικής εξίσωσης έως δώδεκα για τα πιο πολύπλοκα μοντέλα τάσεων Reynolds.

Με βάση τα παραπάνω διαχωρίζονται σε:

- i. Μοντέλα μηδενικής εξίσωσης-μοντέλο μήκους ανάπτυξης
- ii. Μοντέλα μίας διαφορικής εξίσωσης
- iii. Μοντέλα δύο διαφορικών εξισώσεων-μοντέλο $k-\epsilon$
- iv. Μοντέλα εξισώσεων τάσεων Reynolds
- v. Μοντέλα αλγεβρικών εξισώσεων τάσεων Reynolds

5.3. ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΥΟ ΔΙΑΦΟΡΙΚΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ-ΜΟΝΤΕΛΟ $k-\epsilon$

Η δυσκολία καθορισμού της κλίμακας μήκους κυρίως σε ροές με ανακυκλοφορία οδήγησε τους ερευνητές στην βελτίωση του μοντέλου μιας διαφορικής εξίσωσης, έτσι ώστε να αποκτήσει ευρύτητα χρήσης. Η βελτίωση του μοντέλου έγκειται στην διαμόρφωση και προσθήκη μιας διαφορικής εξίσωσης, της οποίας η λύση να δίνει την κατανομή της κλίμακας μήκους της τύρβης. Έτσι, στην διαμόρφωση των τυρβώδων χαρακτηριστικών του πεδίου ροής σε κάποια θέση λαμβάνεται υπόψη και η επίδραση της μεταφοράς από τη μέση ροή και της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και της κλίμακας μήκους.

Για την επιτυχή θεμελίωση μιας γενικής έκφρασης για τα εμπειρικά δεδομένα είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός μιας γενικής διαφορικής εξίσωσης η οποία θα καθορίζει το L ή κάποιο συνδυασμό του L με το k . Η πρώτη έκφραση αντιμετώπισης του προβλήματος διατυπώθηκε από τον A.N.Kolmogorov (1903 – 1987) εισάγοντας μια διαφορική εξίσωση για τη «συχνότητα», $f=k^{1/2}/L$ (*Mathieu and J. Scott, 2000*). Η συγκεκριμένη εξίσωση αποτέλεσε σημαντική πρόοδο στους υπολογισμούς της τύρβης, καθώς επέτρεψε την πρόβλεψη μιας κλίμακας μήκους, με επίλυση μιας επιπλέον διαφορικής εξίσωσης και την εισαγωγή επιπλέον εμπειρικών σταθερών (*Frisch, 1995*).

Το μοντέλο που τράβηξε περισσότερο την προσοχή της ερευνητικής κοινότητας χρησιμοποιεί ως δεύτερη εξίσωση αυτή για την «σοτροπική απορρόφηση» D , βασισμένη στην ακριβή εξίσωση μεταφοράς του D , που προκύπτει από την διαφοροποίηση ως προς x_i -συνιστώσες των εξισώσεων Navier-Stokes, τον πολλαπλασιασμό της προκύπτουσας εξίσωσης με $\frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ και τη λήψη του χρονικού μέσου όρου της. Σε υψηλούς αριθμούς Reynolds η διαφορά μεταξύ ε και D είναι μικρή και για ευκολία χρησιμοποιείται το ε ως ανεξάρτητη μεταβλητή. Φυσικά η εξίσωση του ε υπονοεί μια εξίσωση μεταφοράς για το L , με την ταυτόχρονη χρήση της εξίσωσης του k .

Η ακριβής εξίσωση για το ε προκύπτει από τις εξισώσεις Navier-Stokes, και έχει προταθεί ανεξάρτητα, από τους *Davidov* (1961), τους *Harlow & Nakayama* (1968) και *Hanjalic* (1970). Αργότερα, με τις βελτιώσεις των *Jones & Launder* (1972), *Launder & Sharma* (1974) και *Launder & Spalding* (1974) υιοθετήθηκε η μορφή του standard $k\sim\varepsilon$. Έτσι, για συμπιεστή ροή θα έχουμε:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = & -2\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_m} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_m}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \frac{\partial u'_j}{\partial x_m} - 2\nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_m \partial x_j} u'_k \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} - 2\nu \frac{\partial u'_i}{\partial x_m} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_m}{\partial x_j} - \\ & - 2\nu \frac{\partial^2 u'_i}{\partial x_m \partial x_j} - \nu \frac{\partial}{\partial x_m} u'_m \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_m} \frac{\partial p'}{\partial x_j} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} - \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x_m^2} \end{aligned}$$

Όπου όλοι οι παραπάνω όροι με λόγια εκφράζονται ως εξής:

ρυθμός αλλαγής του ε (I)	(+)	μεταφορά του ε με συναγωγή(II)	=	ρυθμός παραγωγής του ε από τη μέση ροή (III), (IV)	(+)
ρυθμός παραγωγής του ε με αυτοτέντωμα στοιχείων στροβιλισμού (V)	(-)	ρυθμός ιξώδους απορρόφησης του ε (VI)	(+)	μεταφορά του ε με διάχυση (VII), (VIII), (IX)	

Η ερμηνεία της εξίσωσης αυτής δεν δείχνει εύκολη όταν το ε θεωρηθεί ως ο ρυθμός ιξώδους απορρόφησης της ενέργειας της τύρβης. Η μοντελοποίηση της όμως

μπορεί να γίνει κατά αναλογία με την εξίσωση του **Chou** για το μέσο όρο του τετραγώνου των διακυμάνσεων του στροβιλισμού $w'_i w'_i$, που μοιάζει με την εξίσωση του ε . Σε υψηλούς αριθμούς Reynolds ισχύει ότι:

$$\varepsilon = 2\nu S_{ij} S_{ij} \cong \nu w'_i w'_i$$

όπου το S_{ij} είναι το συμμετρικό τμήμα του ρυθμού της διακύμανσης των παραμορφώσεων $\frac{\partial u'_i}{\partial x_j}$.

Σε αντίθεση με το ε που είναι μια παθητική βαθμωτή ποσότητα ο διακυνόμενος στρόβιλισμός w'_i μπορεί να θεωρηθεί ως μια ενεργητική βαθμωτή ιδιότητα της τύρβης μικρής κλίμακας, ενώ το πλείστο του στροβιλισμού συνδέεται την κίνηση μικρής κλίμακας. Με αυτές τις αρχές η εξίσωση για το ε ερμηνεύεται ευκολότερα σε όρους $w'_i w'_i$. Όμως η πλέον άμεση ερμηνεία της είναι ως μια εξίσωση για το ρυθμό με το οποίο η κινητική ενέργεια της τύρβης μεταφέρεται διαμέσου του φάσματος από μεγάλες δίνες (ή μικρούς αριθμούς κύματος) σε όλο και μικρότερες δίνες (ή όλο και μεγαλύτερους αριθμούς κύματος). Με βάση τις παρατηρήσεις αυτές το k - ε μοντέλο περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις και στον επόμενο πίνακα δίνονται οι τιμές των σταθερών του μοντέλου:

$$\frac{dk}{dt} \cong \frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} \cong \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} + P_k - \varepsilon$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} \cong \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \cong \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

$$P_k = -u'_i u'_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \cong v_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 2\nu_t S_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

$$v_t \cong C_\mu \bar{k} L_\mu \cong C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

και οι ανάλογες σταθερές θα είναι:

Πίνακας 3 Τιμές των σταθερών του μοντέλου k - ε

$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	C_μ	σ_k	σ_ε
1,44	1,92	0,09	1,0	1,3

Οι υποθέσεις που διέπουν όλα ή πλείστα από τα μοντέλα δύο εξισώσεων είναι:

i. Σχεδόν ομογενή τύρβη. Αυτή είναι η πρώτη παραδοχή για τη χρήση της σχέσης:

$$u'v' = -\bar{k} L_k \frac{\partial u}{\partial y}$$

για τους όρους πηγής που περιέχουν τις διατμητικές τάσεις.

- ii. Ομοιότητα της φασματικής κατανομής των ιδιοτήτων της τύρβης.
- iii. Η διάχυση είναι βαθμωτή. Για απλότητα χρησιμοποιούνται σταθεροί οι ενεργοί αριθμοί Prandtl.
- iv. Η απορρόφηση του k μπορεί να εκφραστεί ως $\varepsilon = C_D k^3 / L_k$ ενώ θεωρούνται αμελητέοι οι όροι ιξώδους διάχυσης και ο συντελεστής C_D θεωρείται παγκόσμια σταθερά.

Οι υποθέσεις αυτές είναι τόσες πολλές ώστε να μην ισχύουν όλες στις ροές πρακτικού ενδιαφέροντος, με αποτέλεσμα οι συντελεστές να μην έχουν γενικευμένο χαρακτήρα αλλά να αποτελούν συναρτήσεις χαρακτηριστικών παραμέτρων της εκάστοτε ροής.

Τα πλεονεκτήματα του μοντέλου $k\sim\varepsilon$, σύμφωνα με τους *Versteeg και Malalasekera*, είναι τα εξής:

- Η εξίσωση για το ε προκύπτει από τις εξισώσεις *Navier-Stokes*.
- Ο αριθμός Prandtl για το ε έχει λογική τιμή η οποία ταιριάζει με τις πειραματικές για την εξάπλωση των διαφόρων ποσοτήτων μακριά από τα τοιχώματα.
- Το μοντέλο $k\sim\varepsilon$ έχει καλή λειτουργία σε πολλές βιομηχανικές ροές και είναι από καλά μελετημένο. Ενώ είναι το απλούστερο μοντέλο τύρβης για το οποίο απαιτούνται μόνο αρχικές και οριακές συνθήκες.

Αντίστοιχα υπάρχουν και ορισμένα μειονεκτήματα για το μοντέλο αυτό, τα οποία είναι:

- Πιο δαπανηρό σε υπολογιστικό χρόνο σε σχέση με τα μοντέλα μήκους ανάπτυξης (δύο επιπλέον διαφορικές εξισώσεις).
- Δεν εμφανίζει σωστή λειτουργία σε αρκετές περιπτώσεις όπως μερικές ελεύθερες ροές, ροές με μεγάλες πρόσθετες παραμορφώσεις και περιστρεφόμενες ροές.
- Το μοντέλο $k\sim\varepsilon$ και τα συναφή μοντέλα αγνοούν τον διακοπτόμενο χαρακτήρα της τύρβης, την περιοδικότητα και θεωρούν γενικά διάχυση που προκαλείται από τις κλίσεις των μεταβλητών, ενώ υπάρχουν και άλλοι μηχανισμοί διάχυσης. Επιπλέον, τα μοντέλα απαιτούν προσδιορισμό σταθερών για τον οποίο δεν υπάρχει άμεσος τρόπος.
- Τέλος, το μοντέλο $k\sim\varepsilon$ παρουσιάζει σοβαρά μειονεκτήματα όταν εφαρμόζεται για την πρόβλεψη ροών με περίπλοκα πεδία παραμορφώσεων ή με σημαντικές δυνάμεις σώματος. Κάτω από τέτοιες συνθήκες οι τάσεις Reynolds δεν παριστάνονται ικανοποιητικά από την προσέγγιση Boussinesq ακόμα και αν η κινητική ενέργεια της τύρβης υπολογίζεται με ικανοποιητική ακρίβεια.

Για την αντιμετώπιση των προαναφερθέντων προβλημάτων έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα δεύτερης τάξης, με σπουδαιότερο το μοντέλο RNG $k\sim\varepsilon$ των Yakhot και Orszag το 1986 [18].

5.4. TO MONTEΛΟ RNG-derived k~ε

Το μοντέλο που χρησιμοποιείται για την αριθμητική προσομοίωση του παρόντος φυσικού προβλήματος είναι το RNG k~ε το οποίο αποτελεί μια παραλλαγή του απλού μοντέλου k~ε και η κύρια διαφοροποίησή του συνίσταται στην πρόβλεψη ενός πρόσθετου όρου πηγής στην εξίσωση του ε. Το συγκεκριμένο μοντέλο τύρβης επινοήθηκε από τους *Yakhot* και *Orszag* (1986) και *Yakhot* και *Smith* (1992) στο Princeton University, ενώ τα αρχικά RNG προέρχονται από τις λέξεις Renormalization Group. Οι παραπάνω εργασίες παρουσιάζουν αποτελέσματα τύρβης μικρής κλίμακας με χρήση τυχαίας λειτουργίας των Navier-Stokes. Η διαδικασία του μοντέλου αυτού μετακινεί συστηματικά της μικρής κλίμακας κίνηση από τις εξισώσεις εκφράζοντας τις επιδράσεις σε κινήσεις μεγαλύτερης κλίμακας καθώς και σε μεταβλητό ιξώδες.

Η εξίσωση για την κινητική ενέργεια της τύρβης (k) είναι:

$$\frac{\partial y}{\partial x} + u_j \frac{\partial y}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k + G_b - \varepsilon$$

Ενώ αντίστοιχα η εξίσωση για τον διασκεδασμό της τύρβης (ε) θα είναι:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon + C_{\varepsilon 3} G_b - \frac{\varepsilon}{k} \frac{C_\mu \eta^3}{1 + \beta_1 \eta^3} \frac{1 - \eta}{\eta_0} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

όπου $v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, το τυρβώδες κινηματικό ιξώδες, $P_k = v_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$, ο όρος παραγωγής ή καταστροφής της τυρβώδους ενέργειας εξαιτίας των διατμητικών τάσεων, $G_b = -g\beta \frac{v_t}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial y}$, ο όρος παραγωγής ή καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας λόγω ανωστικών δυνάμεων, $n = S \frac{K}{\varepsilon}$, $S = 2S_{ij}S_{ij}^{\frac{1}{2}}$, $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$, ο ρυθμός παραμόρφωσης της μέσης χρονικά ροής και υείναι η ταχύτητα της μέσης ροής. Ο όρος $\frac{C_\mu \eta^3}{1 + \beta_1 \eta^3} \frac{1 - \eta}{\eta_0} \frac{\varepsilon^2}{k}$ συμβολίζεται και ως R.

Γενικά, το μοντέλο RNG k~ε, σε σχέση με το κλασσικό k~ε μοντέλο, καταλήγει σε μειωμένη τυρβώδη συνεκτικότητα, λόγω της μειωμένης τιμής του συντελεστή $C_{\varepsilon 2}$ και ενός επιπρόσθετου όρου, ο οποίος υπολογίζεται από περιοχές με έντονη διάτμηση. Ειδικότερα έχουμε:

- Ο συντελεστής του όρου απορρόφησης του ε είναι σημαντικά μικρότερος από τον αντίστοιχο του μοντέλου τύρβης k~ε (1,68 έναντι 1,92), με αποτέλεσμα την αύξηση της τιμής του ε και κατά συνέπεια τη μείωση της τυρβώδους συνεκτικότητας.
- Σε περιοχές με σχετικά μικρές τιμές του δείκτη η, ο όρος R τείνει να αυξήσει την τυρβώδη συνεκτικότητα, η οποία όμως υπολείπεται και πάλι της τιμής του k~ε.

- Σε περιοχές με μεγάλες τιμές του η , όπου παρατηρείται έντονη ανισοτροπία, ο όρος R αποτελεί πηγή παραγωγής του ε και κατά συνέπεια επιφέρει μείωση της τυρβώδους συνεκτικότητας.

Ουσιαστικά ο πρόσθετος όρος R , εισάγει ένα μηχανισμό που επηρεάζει το ισοζύγιο μεταξύ των όρων παραγωγής και απορρόφησης στην εξίσωση του ε , και σε αυτόν κατά κύριο λόγο οφείλεται η αξιοσημείωτη βελτίωση προσομοίωσης με το μοντέλο RNG $k\sim\varepsilon$, σε περιοχές με παρουσία ανισοτροπικών δινών μεγάλης κλίμακας.

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για τις τιμές του δείκτη η από 3,43 μέχρι 10, ο συντελεστής στον πρόσθετο όρο R , λαμβάνει τιμές από 0,71 μέχρι 50, έτσι αυξάνει ραγδαία με την αύξηση του η . Το η εκφράζει το λόγο της κλίμακας χρόνου της τυρβώδους ροής προς αυτής της μέσης παραμόρφωσης.

Ο συντελεστής C_μ έχει σχεδόν την ίδια τιμή και στα δύο μοντέλα, όπως συμβαίνει και με το συντελεστή $C_{\varepsilon 1}$, του όρου παραγωγής στην εξίσωση του ε . Διαφοροποίηση παρατηρείται επίσης και στους συντελεστές σ_k και σ_ε , γεγονός που καθιστά τον ρυθμό τυρβώδους διάχυσης μεγαλύτερο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

6. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

6.1 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΔΙΑΦΟΡΙΚΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

Οι γραμμικές και οι ημι-γραμμικές μερικές διαφορικές εξισώσεις κατατάσσονται μαθηματικά σε τρεις βασικές κατηγορίες, ελλειπτικού, παραβολικού και υπερβολικού τύπου και διαφοροποιούνται ανάλογα με τη μέθοδο μετατροπής της εξίσωσης και ανάλογα με τον εκάστοτε αλγόριθμο επίλυσης.

Η γενική μορφή των διαφορικών εξισώσεων είναι:

$$a \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + 2b \frac{\partial \Phi}{\partial x \partial y} + c \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + d \frac{\partial \Phi}{\partial x} + e \frac{\partial \Phi}{\partial y} + f \Phi = g$$

Όπου οι συντελεστές a, b, c, d, e, f και g είναι συναρτήσεις μόνο των x, y και των μερικών παραγώγων της ποσότητας Φ ως προς x και y αντίστοιχα. Συνεπώς, ο τύπος της εξίσωσης καθορίζεται μόνο από τους όρους με τάξη παραγώγου μεγαλύτερη της μονάδας. Έτσι προκύπτει ότι:

- Ελλειπτικού τύπου αν $b^2 - ac < 0$
- Παραβολικού τύπου αν $b^2 - ac = 0$
- Υπερβολικού τύπου αν $b^2 - ac > 0$

Σύμφωνα με τους Kevorkian (**Kevorkian, 1993**) και Μπεργελέ (**Μπεργελέ, 1993**) ο μετασχηματισμός για τις ελλειπτικού τύπου μερικές διαφορικές εξισώσεις είναι :

$$y - \lambda_1 x = \xi + i\eta$$

$$y - \lambda_2 x = \xi - i\eta$$

όπου λ_1 και λ_2 οι ρίζες του πολυωνύμου $a\lambda^2 - 2b\lambda + c$ και i η μιγαδική μονάδα. Με τον παραπάνω μετασχηματισμό η εξίσωση παίρνει την απλούστερη μορφή:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \eta^2} + k\Phi = h(\xi, \eta)$$

Για παραβολικού τύπου εξισώσεις ο μετασχηματισμός των συντεταγμένων:

$$y - \lambda_1 = \eta$$

$$ay + \beta x = \xi$$

με α και β σταθερές, τέτοιες ώστε η Ιακωβιανή του μετασχηματισμού να μην γίνεται μηδέν και λ η διπλή ρίζα του τριωνύμου, μετατρέπει την αρχική εξίσωση στη μορφή:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \xi^2} + \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} = h(\xi, \eta)$$

Τέλος, για υπερβολικού τύπου εξισώσεις ο μετασχηματισμός των συντεταγμένων είναι:

$$y - \lambda_1 x = \xi + \eta$$

$$y - \lambda_2 x = \xi - \eta$$

και η νέα μορφή της αρχικής διαφορικής γίνεται:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \eta^2} + 2D \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} + 2E \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} + F\Phi = G(\xi, \eta)$$

Οι διάφορες κατηγορίες των μερικών διαφορικών εξισώσεων συνδέονται, γενικά με διαφορετικούς τύπους προβλημάτων ροής. Εξισώσεις που εξαρτώνται από το χρόνο οδηγούν συνήθως σε προβλήματα παραβολικού ή υπερβολικού τύπου. Αν υπάρχουν φυσικοί μηχανισμοί (π.χ. ισχυρές διατμητικές τάσεις ή θερμική αγωγή) τότε η εξίσωση θα είναι παραβολικού τύπου με αποτέλεσμα οι βαθμίδες της εξαρτημένης ποσότητας να εξομαλύνονται με το χρόνο και η λύση να γίνεται όλο και πιο πολύ επίπεδη. Αν δεν υπάρχουν μηχανισμοί σκέδασης η λύση θα διατηρεί σταθερό πλάτος αν η εξίσωση είναι γραμμική ή ακόμα θα είναι αυξανόμενου πλάτους εάν η εξίσωση δεν είναι γραμμική. Η λύση αυτή είναι τυπική για την περίπτωση των υπερβολικού τύπου εξισώσεων. Οι ελλειπτικές εξισώσεις καθορίζουν συνήθως προβλήματα μόνιμης κατάστασης ή ισορροπίας (**Μαρκάτος και Ασημακόπουλος, 1995**).

Οι παραπάνω όροι που χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση των διαφορικών εξισώσεων από τους μαθηματικούς, αντιστοιχούν επίσης και σε διεργασίες Φαινομένων Μεταφοράς ως εξής:

- Μια διεργασία είναι παραβολική αν υπάρχει μια τουλάχιστον συντεταγμένη τέτοια που οι συνθήκες σε μια δεδομένη θέση αυτής της συντεταγμένης, να επηρεάζονται από αλλαγές που συμβαίνουν μόνο από τη μία πλευρά αυτής της θέσης. Οι ροές αυτής της μορφής στη μηχανική των ρευστών καλούνται ροές «Οριακού Στρώματος».
- Ελλειπτικές διεργασίες είναι εκείνες στις οποίες οι συνθήκες σε δεδομένη θέση, οποιασδήποτε συντεταγμένης, επηρεάζονται από τις αλλαγές συνθηκών που συμβαίνουν σε οποιαδήποτε πλευρά αυτής της θέσης. Σε σχέση με την μηχανική των ρευστών οι ροές αυτές λέγονται ροές επανακυκλοφορίας.
- Υπερβολικό είναι εκείνο το πρόβλημα στο οποίο παρουσιάζεται μονόδρομη συμπεριφορά όχι κατα μήκος των συντεταγμένων αλλά κατα μήκος ειδικών γραμμών, οι οποίες ονομάζονται «χαρακτηριστικές» γραμμές του

προβλήματος. Η ανάλυση των υπερβολικών διεργασιών είναι αντίστοιχη με αυτή των παραβολικών.

6.2 ΑΡΧΕΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ – ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΔΙΑΦΟΡΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ

Η πολυπλοκότητα των διεργασιών που υπάρχουν στα Φαινόμενα Μεταφοράς και των φυσικών μηχανισμών που τις διέπουν επιβάλλουν την δημιουργία κατάλληλων μεθόδων ποσοτικής πρόβλεψης. Με τον τελευταίο όρο ονομάζεται η γνώση του πεδίου τιμών της εξαρτημένης μεταβλητής (*Γ.Μπεργελές, 2006*).

Ωστόσο από τη μέθοδο ποσοτικής πρόβλεψης απαιτείται αξιοπιστία, ταχύτητα, οικονομία, διαθεσιμότητα και ευλυγισία.

Λόγω της δυσκολίας των εξισώσεων στις περισσότερες περιπτώσεις η επίλυση τους δεν είναι δυνατή σε κλειστή μορφή. Αλλά με τη βοήθεια των αριθμητικών μεθόδων και με ισχυρή υπολογιστική δύναμη δίδεται η δυνατότητα επίλυσης τους και η προσέγγιση δύσκολων σχεδιαστικών προβλημάτων.

Η αρχή διατήρησης για μια φυσική ποσότητα Φ (ισοζύγιο μάζας) σε συντεταγμένες Euler θα έχει την εξής μορφή (*X.N. Μαρκάτος, 1995*):

$$\text{Συσσώρευση} + \text{Εκροή} - \text{Εισροή} = (\text{Παραγωγή} - \text{Κατανάλωση})$$

Η φυσική ποσότητα Φ που διατηρείται μπορεί να είναι η μάζα, m , το κλάσμα μάζας του συστατικού j , ω_j , η ταχύτητα, u_j , η ενέργεια, e , η ενθαλπία, h , η θερμοκρασία, T .

Έπειτα η αρχική διατήρηση μάζας για ένα πεπερασμένο όγκο ελέγχου σε μορφή καρτεσιανών τανυστών περιγράφεται ως :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0$$

Η διατήρηση ορμής γράφεται και πάλι σε μορφή καρτεσιανών τανυστών ως:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho u_m + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho u_i u_m = \frac{\partial}{\partial x_i} p_{m,i} + g_m - f_m$$

Για την Αρχή Διατήρησης Μάζας Συστατικού θα είναι σε μορφή καρτεσιανών τανυστών:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \omega_i + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho u_i \omega_i + J_{l,i} = R_i$$

Τέλος, ο νόμος διατήρησης της ενέργειας περιγράφεται σε μορφή καρτεσιανών τανυστών ως εξής:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h - \rho) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i h + q_i + w_{s,i} + h_l J_{l,i}) = S_{\text{rad}} + \dots$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις γίνεται εύκολα κατανοητό ότι έχουν την ίδια μορφή, έτσι η διαφορική εξίσωση της γενικευμένης μορφής θα μπορούσε να γραφτεί σε διαφορική μορφή ως εξής:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \varphi + \operatorname{div} \rho u \varphi + J_{\varphi} = S_{\varphi}$$

όπου φ παριστάνει τις φυσικές ποσότητες u_m, ω_1, h , ή τη μονάδα (στην περίπτωση της εξίσωσης της συνέχειας).

6.3 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Γενικές Εξισώσεις Προβλήματος

Η ανάπτυξη του αριθμητικού μοντέλου στην παρούσα εργασία βασίζεται σε ένα σύνολο ελλειπτικών διαφορικών εξισώσεων. Οι εξισώσεις που διέπουν το φυσικό πρόβλημα είναι η εξίσωση συνέχειας, οι εξισώσεις ορμής, η εξίσωση θερμότητας, η εξίσωση συγκέντρωσης χημικού είδους, η εξίσωση κινητικής ενέργειας τύρβης και η εξίσωση κατανάλωσης κινητικής ενέργειας τύρβης.

Για μόνιμη ροή οι εξισώσεις που καλούμαστε να επιλύσουμε δεν είναι άλλες από τις διαφορικές εξισώσεις που παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Εξίσωση συνέχειας

Η γενική μορφή της εξίσωσης συνέχειας, σε συμβολισμό δεικτών (σύμβαση Einstein) είναι:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho u_j = 0$$

Με βάση την εξίσωση αυτή προσεγγίζεται η πυκνότητα και η ταχύτητα του ρευστού σε κάθε σημείο του πεδίου ροής.

Η εξίσωση συνέχειας ισχύει για κάθε περίπτωση τρισδιάστατης μορφής ενός καθαρού ρευστού ή ενός ομοιογενούς μίγματος ρευστών, υπό την προϋπόθεση ότι δεν συμβαίνουν αντιδράσεις στον απειροστό όγκο ελέγχου (*A.Θ. Παπαϊωάννου, 2002*).

Ση συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε τρισδιάστατη, μόνιμη ροή και συμπίεστη ροή με αποτέλεσμα η εξίσωση συνέχειας με τη μορφή δεικτών να γίνεται:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0$$

Αν τώρα στην παραπάνω εξίσωση θέσουμε όπου j τις τιμές των x, y, z , αντίστοιχα και αθροίζοντας τις επιμέρους παραγώγους θα έχουμε την τελική εξίσωση, η οποία θα έχει την παρακάτω μορφή:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0$$

Εξίσωση ορμής (Navier-Stokes)

Η γενική μορφή της εξίσωσης Navier-Stokes σε συμβολισμό δεικτών θα είναι η εξής:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}$$

Για να ισχύει η παραπάνω εξίσωση θα πρέπει να ισχύουν οι παρακάτω παραδοχές:

- i. Νευτώνικό ρευστό
- ii. Ασυμπίεστη ροή
- iii. Σταθερό ιξώδες

Από την προαναφερθείσα εξίσωση προκύπτουν οι καρτεσιανές συντεταγμένες x, y, z στην θέση του ελεύθερου δείκτη i θέσουμε την ανάλογη συντεταγμένη και στον επαναλαμβανόμενο δείκτη j τα x, y, z (για κάθε τιμή του i). Συνεπώς για μια τριδιάστατη ροή οι ανάλογες εξισώσεις θα είναι οι παρακάτω

x – Διεύθυνση

$$\rho \frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right)$$

y – Διεύθυνση

$$\rho \frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right)$$

z – Διεύθυνση

$$\rho \frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right)$$

Οι εξισώσεις Navier – Stokes είναι μερικές διαφορικές εξισώσεις δευτέρου βαθμού. Οι εξισώσεις αυτές είναι μη γραμμικές λόγω της παρουσίας του τελεστή μεταφοράς $u \cdot \nabla$. Έτσι η αναλυτική τους λύση είναι αδύνατη σε μία γενική περίπτωση. Συνήθως η επίλυση γίνεται με διάφορες αριθμητικές μεθόδους, οι οποίες όμως καταλήγουν σε προσεγγιστικές λύσεις [4].

Βασικό τους πλεονέκτημα είναι ότι μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιοδήποτε πρόβλημα ροής, χωρίς να απαιτείται κάθε φορά να καταστρωθούν ξεχωριστά ισοζύγια δυνάμεων για την εκάστοτε περίπτωση.

Εξίσωση Θερμότητας

Η γενική μορφή της εξίσωσης θερμότητας είναι η παρακάτω:

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} + u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + S_T$$

Στον όρο S_T εκτός από τον όρο πηγής συμπεριλαμβάνεται και ο όρος $\frac{dP}{dx} + u_j \frac{dP}{dj}$, ο οποίος στα πλαίσια της αριθμητικής προσομοίωσης θεωρείται ως πηγή. Εάν το φυσικό πρόβλημα δεν εμφανίζει μεγάλες κλίσεις πίεσης και δεν είναι μεταβατικό τότε ο παραπάνω όρος αμελείται. Τέλος, ο όρος S_T αναφέρεται και στον όρο παραγωγής ή κατανάλωσης που πιθανόν να υπάρχει στο πεδίο ροής.

Εξίσωση Συγκέντρωσης

Η γενική μορφή της εξίσωσης συγκέντρωσης θα είναι:

$$\rho \frac{\partial C}{\partial t} + u_x \frac{\partial C}{\partial x} + u_y \frac{\partial C}{\partial y} + u_z \frac{\partial C}{\partial z} = \rho D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) + S_C$$

Ο όρος S_C αναφέρεται στον όρο παραγωγής ή κατανάλωσης που τυχόν υπάρχει στο πεδίο.

Εξισώσεις Επίλυσης του Προβλήματος

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του προβλήματος, με τη θεώρηση ασυμπέσστης ροής και της παραδοχής Boussinesq για τον όρο άνωσης, παρατίθενται παρακάτω και αποτελούν την βάση για την ανάπτυξη του μοντέλου προσομοίωσης.

1. Εξίσωση Συνέχειας

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0$$

2. Εξίσωση Ορμής

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu + \nu_t \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + g_i \frac{T - T_{ref}}{T_{ref}}$$

όπου

P: είναι η διαφορά της πίεσης στην αδιαβατική κατάσταση

ρ : είναι η πυκνότητα στο επίπεδο του εδάφους

3. Εξίσωση Θερμότητας

$$u_j \frac{\partial h}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v}{Pr} + \frac{v_T}{\sigma_T} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j}$$

4. Εξίσωση Συγκέντρωσης

$$u_j \frac{\partial C}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v}{Sc} + \frac{v_T}{\sigma_C} \right) \frac{\partial C}{\partial x_j}$$

5. Εξίσωση Κινητικής Ενέργειας Τύρβης

$$u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(v + \frac{v_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} + P_k + G_b - \varepsilon$$

6. Εξίσωση Κατανάλωσης Κινητικής Ενέργειας Τύρβης

$$u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(v + \frac{v_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} + C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon + C_{\varepsilon 3} G_b \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 4} \frac{\sigma_k^2}{k}$$

7. Εξισώσεις των όρων Παραγωγής και Κατανάλωσης Κινητικής Ενέργειας Τύρβης

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} = C_\mu k^{1.5} L_k$$

$$G_b = -g\beta \frac{v_t}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial y}$$

$$P_k = v_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

Οι σταθερές του μοντέλου RNG derived k-ε δίνονται στον παρακάτω Πίνακα:

Πίνακας 4 Τιμές των σταθερών του μοντέλου RNG k-ε

C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{\varepsilon 3}$	n_0	σ_k	σ_ε	β
0.0845	1.42	1.68	$\tanh(u/v)$	4.38	0.719	0.719	0.012

6.4 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι ακόλουθες:

- Είσοδος: Διατήρηση των τιμών από τις αρχικές συνθήκες, στα όρια του πεδίου
- Έξοδος: Οι κλίσεις των μεταβλητών, κατά την διεύθυνση της ροής λαμβάνονται ίσες με μηδέν
- Στερεά Όρια: Πρότυπες Συναρτήσεις Τοίχου (Standard Wall Functions).

Στα στερεά όρια στο πλέγμα γίνεται χρήση των «**συναρτήσεων τοίχου**» (wall functions), όπου επιτρέπουν υπολογισμούς με τα ελάχιστα πλεγματικά σημεία. Συνεπώς, η παράλληλη προς το τοίχωμα ταχύτητα και η διατμητική τάση που ασκείται υπολογίζονται από διαφορετικές συσχετίσεις στην περιοχή κοντά στο τοίχωμα.

Οι συναρτήσεις τοίχου ακολουθούν το λογαριθμικό νόμο που δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\frac{\varphi}{\varphi^*} = \frac{\sigma_\varphi}{k} \ln \frac{z}{z_0}$$

όπου:

σ_φ , ο τυρβώδης αριθμός Prandtl

k , η σταθερά VonKarmann

Φ , το φυσικό μέγεθος

Επίσης χρησιμοποιείται για τις συναρτήσεις τοίχου ως κριτήριο η αδιάστατη απόσταση από το τοίχωμα:

$$y^+ = \frac{\rho y}{\mu} \frac{\tau_w}{\rho}^{\frac{1}{2}}$$

όπου

y : η απόσταση από το τοίχωμα.

Όταν το πλεγματικό σημείο βρίσκεται μέσα στο υπόστρωμα της στρωτής ροής θα ισχύει:

$$u^+ = y^+ \qquad u^+ = \frac{u_p}{u^*}$$

όπου

u^+ : η αδιάστατη ταχύτητα

u^* : η ταχύτητα τύρβης

u_p : η ταχύτητα στο πλεγματικό σημείο P

Όταν το πλεγματικό σημείο βρίσκεται στο αδρανειακό στρώμα θα ισχύει ότι ο λογαριθμικός νόμος δίνει συντελεστή τριβής (s):

$$s = \frac{u^*{}^2}{U}$$

όπου

U: η ταχύτητα στον πρώτο κόμβο

Ο συντελεστής τριβής για τυρβώδη ροή είναι:

$$s = \frac{k}{\ln ER_{\epsilon} s^{\frac{1}{2}}}$$

Τώρα αν το πλεγματικό σημείο βρίσκεται έξω από το υπόστρωμα στρωτής ροής, τότε:

$$s = \frac{1}{R}$$

όπου

k: η σταθερά Von Karman (k=0.416)

ε: η παράμετρος τραχύτητας η οποία είναι συνάρτηση της τραχύτητας και των διαμηθικών τάσεων (για λείο τοίχο ε=8.6).

Για τις παραμέτρους k και ε του τυρβώδους μοντέλου που χρησιμοποιείται συναρτήσεις τοίχου περιγράφονται από τις σχέσεις:

$$k = \frac{u_*^2}{C_{\mu}}$$

και για το ε:

$$\epsilon = \frac{0.1643k^{\frac{3}{2}}}{0.41y}$$

Εκτός από τις οριακές συνθήκες τοίχου θα πρέπει να εφαρμοστούν και οι κατάλληλες οριακές συνθήκες που θα περιγράφουν το πεδίο ροής.

Η ταχύτητα του αέρα στο αριστερό άκρο του πεδίου (είσοδος) δίνεται από τον εκθετικό νόμο μέχρι το ύψος του οριακού στρώματος και παραμένει σταθερή για μεγάλα ύψη. Η πίεση θεωρείται ομοιόμορφη σε όλο το πεδίο καθώς επίσης και η θερμοκρασία. Στην έξοδο του πεδίου η ροή θεωρείται παραβολική και στο άνω όριο του πεδίου θεωρείται πως έχουμε μηδενική μεταβολή των παραμέτρων που επιλύονται.

Το σύνολο των οριακών συνθηκών παρουσιάζεται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5 Οριακές Συνθήκες

Μεταβλητή	Είσοδος	Στερεά Όρια	Άνω Όριο	Πλευρικά Όρια	Έξοδος
w	0	Πρότυπες Συναρτήσεις Τοίχου	$\frac{\partial}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial}{\partial x} = 0$
v	0	Πρότυπες Συναρτήσεις Τοίχου	$\frac{\partial}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial}{\partial x} = 0$
u	$u = u_{\infty}(y/\delta)^{1/7}$	Πρότυπες Συναρτήσεις Τοίχου	$\frac{\partial}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial}{\partial x} = 0$
k	$k = \frac{1}{C_{\mu}^{1/2}} u_*^2 \left(1 - \frac{z}{\delta}\right)^2$ για $z \leq 0.9\delta$ $k = 0.01 \frac{1}{C_{\mu}^{1/2}} u_*^2$ για $z > 0.9\delta$	Πρότυπες Συναρτήσεις Τοίχου	$\frac{\partial}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial}{\partial x} = 0$
ε	$\varepsilon = \frac{C_{\mu}^{3/4} k^{1.5}}{l_m}$ $l_m = 0.41z, l_{m_{\max}} = 0.09\delta$	Πρότυπες Συναρτήσεις Τοίχου	$\frac{\partial}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial}{\partial x} = 0$
P_{dyn}	-	-	-	0	0

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

7. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

7.1. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΑΝΩΣΗΣ ΚΑΙ ΕΚΘΕΤΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ ΕΞΑΡΤΗΣΗΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΤΟ ΥΨΟΣ

Αδιάστατοι αριθμοί

Για την καλύτερη περιγραφή ορισμένων μεγεθών ώστε να είναι και πιο εύκολη η σύγκριση με άλλα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται οι παρακάτω αδιάστατοι αριθμοί:

$$\text{Αδιάστατος αριθμός άνωσης: } \frac{F}{U^3 L}$$

όπου U: η ταχύτητα στο ύψος του κτιρίου (m/sec)

L: χαρακτηριστικό μήκος ίσο με το ύψος του κτιρίου (m)

Η παράμετρος Fείναι η ροή άνωσης η οποία ορίζεται ως εξής :

$$F = g \frac{\Delta \rho V}{\rho_a \pi} \text{ m}^4 \text{ sec}^3$$

όπου g: η επιτάχυνση της βαρύτητας (m/sec²)

Δρ: η διαφορά πυκνότητας σε σχέση με την πυκνότητα του αέρα (kg/m³)

ρ_a: η πυκνότητα του αέρα (kg/m³)

V: η ογκομετρική παροχή της πηγής (m³/sec)

Η ροή άνωσης μπορεί να εκφραστεί και σε όρους απελευθέρωσης θερμότητας, Q (σε MW):

$$F = 8.95 Q$$

$$\text{Αδιάστατη συγκέντρωση (K): } \frac{\rho_a C U L^2}{Q}$$

όπου ρ_a :η πυκνότητα του αέρα (kg/m³)

C: η συγκέντρωση του ρύπου (kg ρύπου/kgαέρα)

U: η ταχύτητα στο ύψος του κτιρίου (m/sec)

L: χαρακτηριστικό μήκος ίσο με το ύψος του κτιρίου (m)

Q: ο ρυθμός εκπομπής του ρύπου (kg ρύπου/sec)

Η ταχύτητα του ανέμου καθορίζει αν το πλούμιο του καπνού θα ανυψωθεί ή θα παραμείνει σε μικρό ύψος πάνω από το έδαφος. Όταν η ταχύτητα του αέρα είναι μικρή, ο καπνός ανυψώνεται σχεδόν κατακόρυφα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μικρή συγκέντρωση τοξικών στην περιοχή κοντά στην εστία της φωτιάς αλλά το πλούμιο μεταφέρεται σε μεγαλύτερη απόσταση. Αντίθετα, στην περίπτωση ισχυρού ανέμου το πλούμιο του καπνού έρπει σε μικρό ύψος πάνω από το έδαφος και επομένων παρουσιάζονται μεγάλες συγκεντρώσεις στο επίπεδο του κτιρίου και προς την κατεύθυνση του ανέμου, ενώ η διασπορά περιορίζεται σε μικρότερη απόσταση.

Η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται σε σχέση με το ύψος. Για την περιγραφή της εξάρτησης αυτής χρησιμοποιείται συνήθως ο εκθετικός νόμος:

$$u = u_{\delta} \frac{h}{\delta}^{\alpha}$$

όπου u : η ταχύτητα σε ύψος h

u_{δ} : η ταχύτητα του αέρα σε ύψος ίσο με το οριακό στρώμα

h : το ύψος στο οποίο υπολογίζεται η ταχύτητα

δ : το ύψος του οριακού στρώματος της ατμόσφαιρας

α : ο εκθέτης ο οποίος λαμβάνεται στη συγκεκριμένη περίπτωση ίσος με 1/7

7.2 ΠΕΔΙΟ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΛΕΓΜΑ

Το πεδίο ροής που χρησιμοποιείται για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος είναι τρισδιάστατο με δύο σταθερές και μία μεταβλητή διάσταση. Η μεταβλητή διάσταση z , εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των δύο προς μελέτη κτιρίων στην εκάστοτε περίπτωση. Δηλαδή η διάσταση z θα είναι:

$$Lz = 756 + NARRAY * 8$$

όπου NARRAY: ένας ακέραιος αριθμός που καθορίζει την απόσταση μεταξύ των κτιρίων. Για NARRAY=0 η απόσταση είναι 1H, για NARRAY=1 η απόσταση είναι 2H κ.τ.λ.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τιμές της διάστασης z για διάφορες αποστάσεις των δύο κτιρίων.

Πίνακας 6 Διάσταση z για διάφορες αποστάσεις μεταξύ των κτιρίων

Απόσταση Κτιρίων	NARRAY	LZ
1H	0	756
2H	1	764
4H	3	780
6H	5	796
8H	7	812
10H	9	828

Οι άλλες δύο διαστάσεις (x,y) παραμένουν σταθερές και ίσες με:

Πίνακας 7 Τιμές διαστάσεων πεδίου ροής

Διάσταση	Τιμή (m)
x	101
y	500

Το πλάτος του υπολογιστικού πεδίου είναι το μισό σε σχέση με την πραγματικότητα και αυτό οφείλεται στην ύπαρξη συμμετρίας, η οποία επιτρέπει την επίλυση του προβλήματος στο μισό χωρικό πεδίο και με χρήση της συμμετρίας ταυτόχρονα υπολογίζεται και το υπόλοιπο μισό. Αυτό δίνει επίσης και την δυνατότητα σημαντικής μείωσης του υπολογιστικού χρόνου και εξασφαλίζει την αμεσότητα της λύσης.

Για την δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος σε κάθε διάσταση δημιουργήθηκαν ορισμένες υποπεριοχές, οι οποίες με τη σειρά τους χωρίστηκαν σε κελιά. Ανάλογα με την πυκνωση και τις διαφορετικές ανάγκες για χαρακτηρισμό των κελιών το πεδίο ροής χωρίστηκε σε 5 υποπεριοχές κατά τη χδιεύθυνση, σε 6 κατά την y και 25 κατά την z. Οι περιοχές αυτές και τα μήκη της κάθε μίας φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 8 Μήκη υποπεριοχών κατά x

Υποπεριοχή x	Μήκος (m)
LX1	48
LX2	8
LX3	9
LX4	35.25
LX5	0.75

Πίνακας 9 Μήκη υποπεριοχών κατά y

Υποπεριοχή y	Μήκος (m)
LY1	2
LY2	6
LY3	6
LY4	2
LY5	8
LY6	24
LY7	40
LY8	476

Πίνακας 10 Μήκη υποπεριοχών κατά z

Υποπεριοχή z	Μήκος (m)	Υποπεριοχή z	Μήκος (m)
LZ1	72	LZ14	1.143
LZ2	8	LZ15	3
LZ3	3	LZ16	9
LZ4	9	LZ17	2
LZ5	2	LZ18	2
LZ6	2	LZ19	2
LZ7	2	LZ20	9
LZ8	9	LZ21	3
LZ9	3	LZ22	8
LZ10	1.143	LZ23	40
LZ11	2.286	LZ24	160
LZ12	1.142+8*N	LZ25	400
LZ13	2.286		

Για την κάθε υποπεριοχή ανάλογα με την θέση της και την πολυπλοκότητα του ροϊκού πεδίου στην συγκεκριμένη περιοχή αποδίδεται ένας συγκεκριμένος αριθμός κελιών. Για την εύρεση του αριθμού αυτού ακολουθήθηκε μια εμπειρική μέθοδος για μια αρχική εκτίμηση και στη συνέχεια εφαρμόστηκε μια διαδικασία ανεξαρτησίας πλέγματος, ώστε να εξασφαλιστεί πως το πλέγμα δεν επηρεάζει και το αποτέλεσμα είναι ανεξάρτητο της πυκνωσης. Για την ανεξαρτησία πλέγματος έγιναν αρκετά δοκιμαστικά τρεξίματα για πυκνότερα πλέγματα και τελικά επιλέχθηκε το βέλτιστο πλέγμα ώστε να έχουμε τον ελάχιστο δυνατό υπολογιστικό χρόνο με το σωστό και ικανοποιητικό αποτέλεσμα.

Οι αντίστοιχοι πίνακες για τα κελιά του υπολογιστικού πλέγματος ανά περιοχή παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Πίνακας 11 Υπολογιστικά Κελιά κατά x

Υποπεριοχή x	Αρ. Κελλιών
NX1	6
NX2	4
NX3	4
NX4	25
NX5	2

Πίνακας 12 Υπολογιστικά Κελιά κατά y

Υποπεριοχή y	Αρ. Κελλιών
NY1	2
NY2	6
NY3	6
NY4	2
NY5	10
NY6	20
NY7	8
NY8	13

Πίνακας 13 Υπολογιστικά κελιά κατά z

Υποπεριοχή z	Αρ. Κελλιόν	Υποπεριοχή z	Αρ. Κελλιόν
NZ1	9	NZ14	3
NZ2	6	NZ15	3
NZ3	3	NZ16	7
NZ4	7	NZ17	2
NZ5	2	NZ18	2
NZ6	2	NZ19	2
NZ7	2	NZ20	7
NZ8	7	NZ21	3
NZ9	3	NZ22	10
NZ10	2	NZ23	6
NZ11	3	NZ24	10
NZ12	4	NZ25	10
NZ13	2		

Το συνολικό υπολογιστικό πλέγμα θα έχει τις διαστάσεις που φαίνονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 14 Αριθμός κελιών υπολογιστικού πλέγματος

Διάσταση	Αρ. Κελιών
NX	41
NY	54
NZ	117

Και ο συνολικός αριθμός κελιών είναι **259.038 κελιά** για τη βασική περίπτωση (απόσταση κτιρίων 1 H). Συγκεντρωτικά για το υπολογιστικό πλέγμα της βασικής περίπτωσης προκύπτει ο επόμενος πίνακας.

Πίνακας 15 Συγκεντρωτικά στοιχεία υπολογιστικού πλέγματος

ΠΕΡΙΟΧΗ	ΜΗΚΟΣ (m)	ΑΡ. ΚΕΛΙΩΝ
TOTAL X	101	41
X1	48	6
X2	8	4
X3	9	4
X4	35.25	25
X5	0.75	2
TOTAL Y	500	54
Y1	2	2
Y2	6	6
Y3	6	6
Y4	2	2
Y5	8	10
Y6	24	20
Y7	40	8
Y8	476	13
TOTAL Z	756	117
Z1	72	9
Z2	8	6
Z3	3	3
Z4	9	7
Z5	2	2
Z6	2	2
Z7	2	2
Z8	9	7
Z9	3	3
Z10	1.143	2
Z11	2.286	3
Z12	1.142	4
Z13	2.286	2
Z14	1.143	3
Z15	3	3
Z16	9	7
Z17	2	2
Z18	2	2
Z19	2	2
Z20	9	7
Z21	3	3
Z22	8	10
Z23	40	6

Z24	160	10
Z25	400	10

7.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

Για την προσομοίωση της πυρκαγιάς στο υπολογιστικό πλέγμα χρησιμοποιήθηκε μια ορισμένη γεωμετρία η οποία προσεγγίζει στο μέγιστο δυνατό τις πραγματικές συνθήκες.

Τα δύο κτίρια θεωρήθηκαν ως μη διαπερατά εμπόδια και σχηματίστηκαν με επιλογή υποπεριοχών. Τα κτίρια εκτείνονται στις υποπεριοχές που φαίνονται παρακάτω.

Πίνακας 16 Υποπεριοχές στις οποίες υπάρχουν τα κτίρια

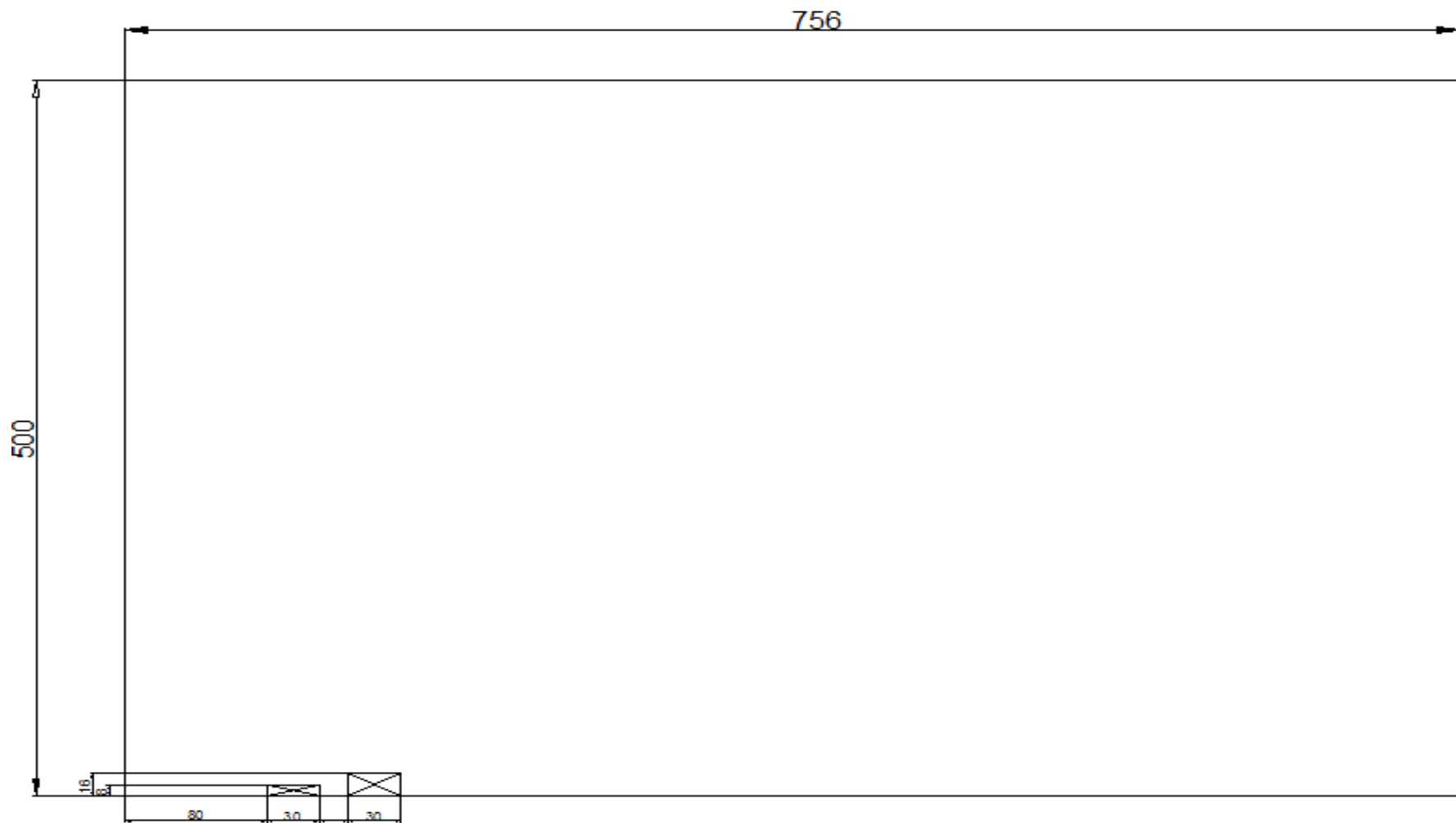
Άξονας	Κτίριο 1	Κτίριο 2
κατά x	LX3 έως LX5	LX3 έως LX5
κατά y	LY1 έως LY2	LY1 έως LY4
κατά z	LZ3 έως LZ9	LZ15 έως LZ21

Η είσοδος του αέρα γίνεται στην περιοχή LZ1 και για την ταχύτητα ανέμου δίνεται ένα παραβολικό προφίλ το οποίο εκτείνεται από το έδαφος (μηδενική ταχύτητα) έως το τέλος του οριακού στρώματος και πάνω(σταθερή ταχύτητα). Στην έξοδο θεωρούμε μηδενική διαφορά πίεσης, ώστε να έχουμε φυσιολογική ροή αέρα.

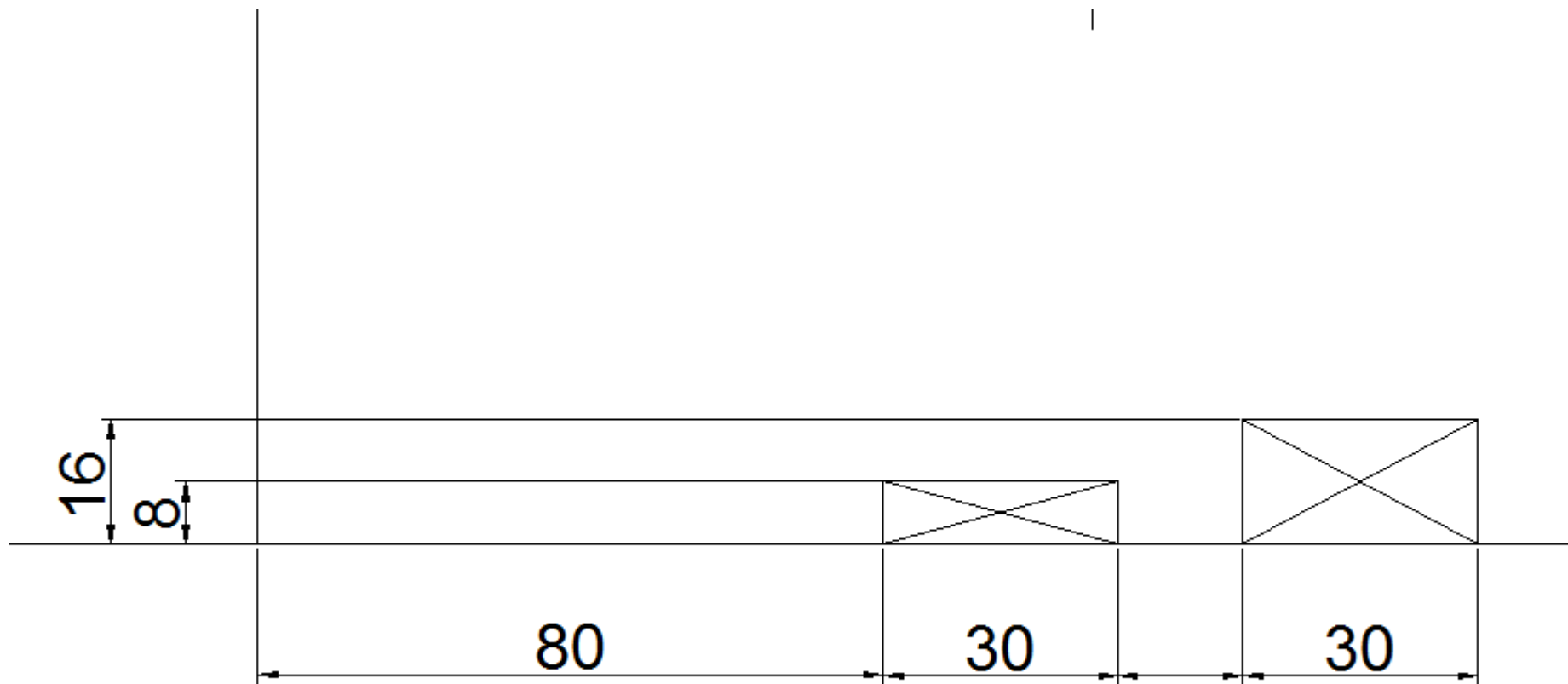
Στα ανοίγματα της οροφής θεωρούμε μια πηγή ρύπου με θερμοκρασιακή διαφορά ώστε να εξασφαλίζεται η άνωση και ανάλογα με την ταχύτητα του αέρα υπολογίζεται ο αδιάστατος αριθμός άνωσης.

Η γεωμετρία του πεδίου ροής και οι διαστάσεις των κτιρίων και του συνολικού πεδίου φαίνονται στις παρακάτω εικόνες. Στην πρώτη περίπτωση έχουμε το συνολικό πεδίο ροής και στην δεύτερη εικόνα φαίνεται ένα τμήμα του πεδίου ροής στο οποίο βρίσκονται τα κτίρια.

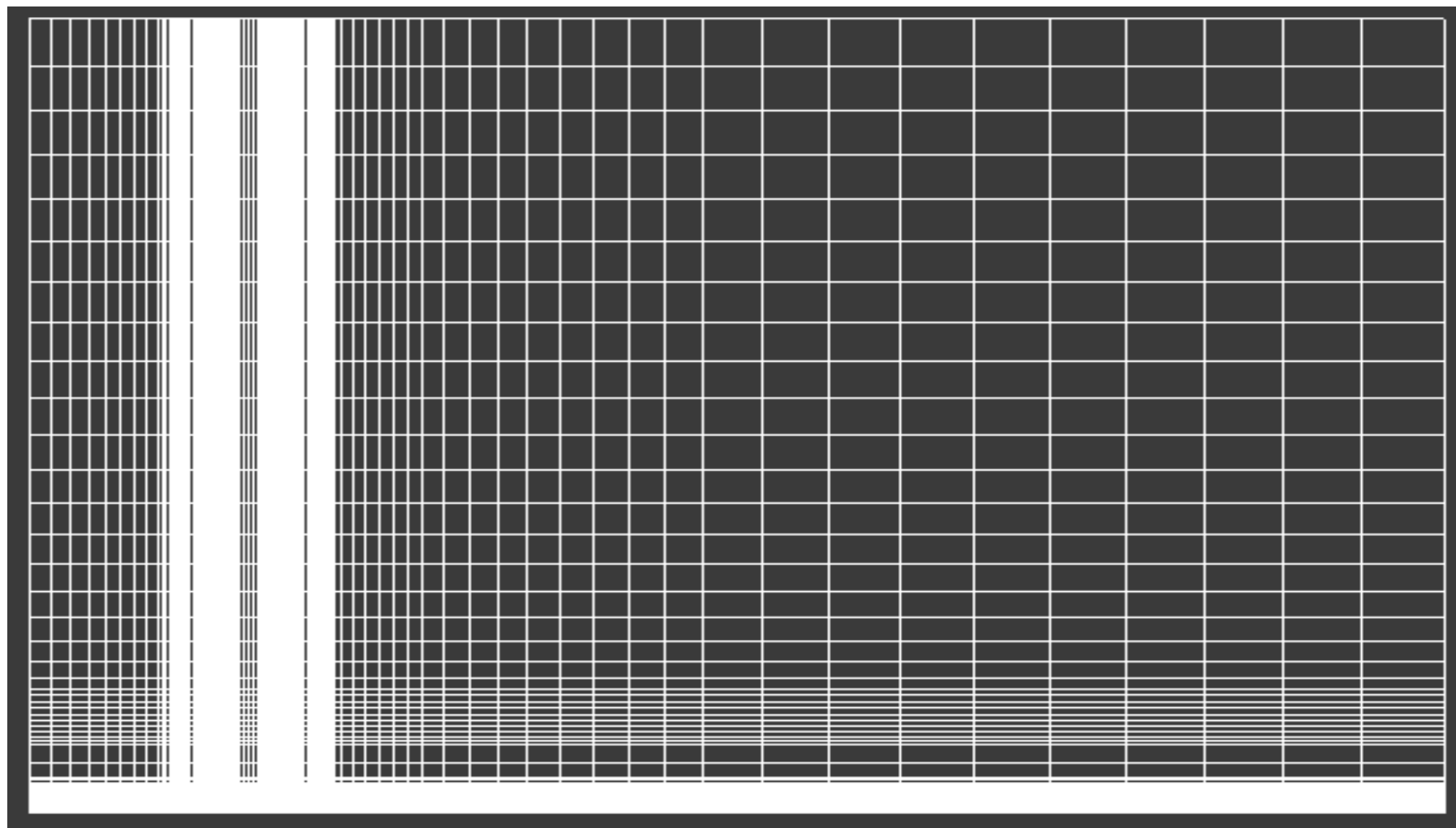
Στην τελευταία εικόνα παρουσιάζεται το υπολογιστικό πλέγμα που περιγράφηκε πιο πάνω.



Εικόνα 5 Συνολικό πεδίο ροής



Εικόνα 6 Τμήμα του πεδίου ροής στο οποίο βρίσκονται οι αποθήκες



Εικόνα 7 Το υπολογιστικό πλέγμα με τις σχετικές πυκνώσεις ανά υποπεριοχή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

8. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

8.1. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Μετά την ανάπτυξη του αριθμητικού μοντέλου για την πλήρη μελέτη και κατανόηση του θέματος, πραγματοποιήθηκαν αρκετές παραμετρικές εφαρμογές με σκοπό να καλύψουν διάφορες περιπτώσεις και να προκύψουν οι αντίστοιχες καμπύλες, με χρήση των οποίων μπορεί να γίνει πρόβλεψη των συνεπειών για την εκάστοτε περίπτωση πυρκαγιάς. Συγκεκριμένα, οι παραμετρικές εφαρμογές αφορούν στη μεταβολή της απόστασης μεταξύ του κτιρίου-πηγής ρύπων και γειτονικού κτιρίου, διπλάσιου ύψους.

Οι παράγοντες που μεταβάλλονται είναι ο αδιάστατος αριθμός άνωσης (F/U^3L), ο οποίος εξαρτάται άμεσα από την ταχύτητα του ανέμου και έμμεσα από την διαφορά θερμοκρασίας καυσαερίων και περιβάλλοντος, και η απόσταση μεταξύ των δύο αποθηκευτικών χώρων. Συνεπώς, με την συγκεκριμένη παραμετροποίηση κρατώντας σταθερή τη μια μεταβλητή προκύπτουν συμπεράσματα για την επιρροή των καιρικών συνθηκών, αλλά και της απόστασης μεταξύ των κτιρίων κατά την εξέλιξη μια πυρκαγιάς σε αποθηκευτικούς χώρους.

Οι περιπτώσεις για τις προαναφερθείσες μεταβλητές είναι οι αυτές που συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 17 Τιμές Παραμέτρων για την Προσομοίωση Περιπτώσεων

Αδιάστατος αριθμός άνωσης	Απόσταση μεταξύ των κτιρίων
0	1H/8m
0.01	2H/16m
0.02	4H/32m
0.05	6H/48m
0.1	8H/64m
	10H/80m

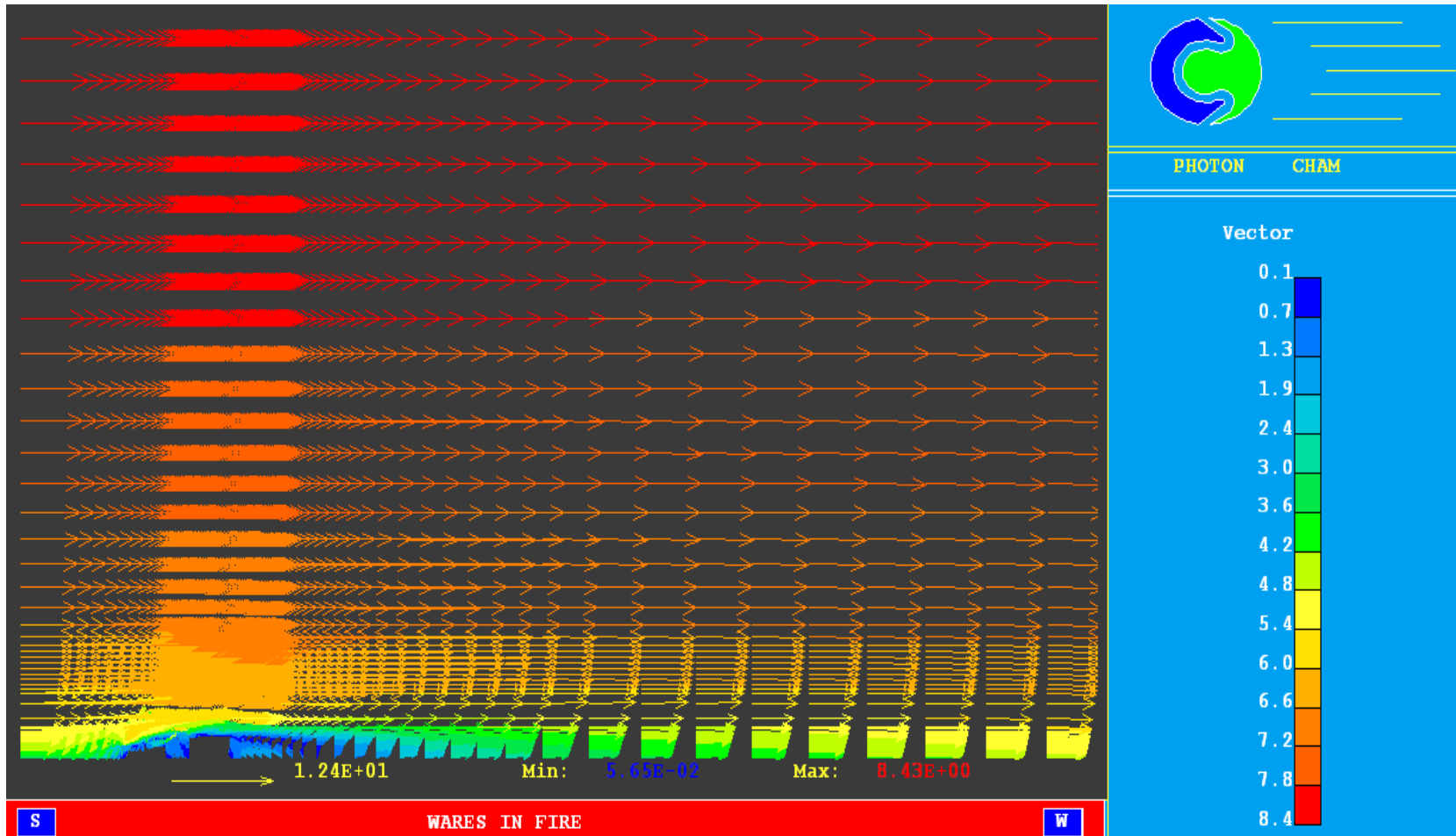
Για την απόσταση μεταξύ των δύο κτιρίων χρησιμοποιήθηκαν πολλαπλάσια του χαρακτηριστικού μεγέθους H, το οποίο είναι ίσο με 8 m και είναι το τυπικό ύψος μια αποθήκης.

8.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

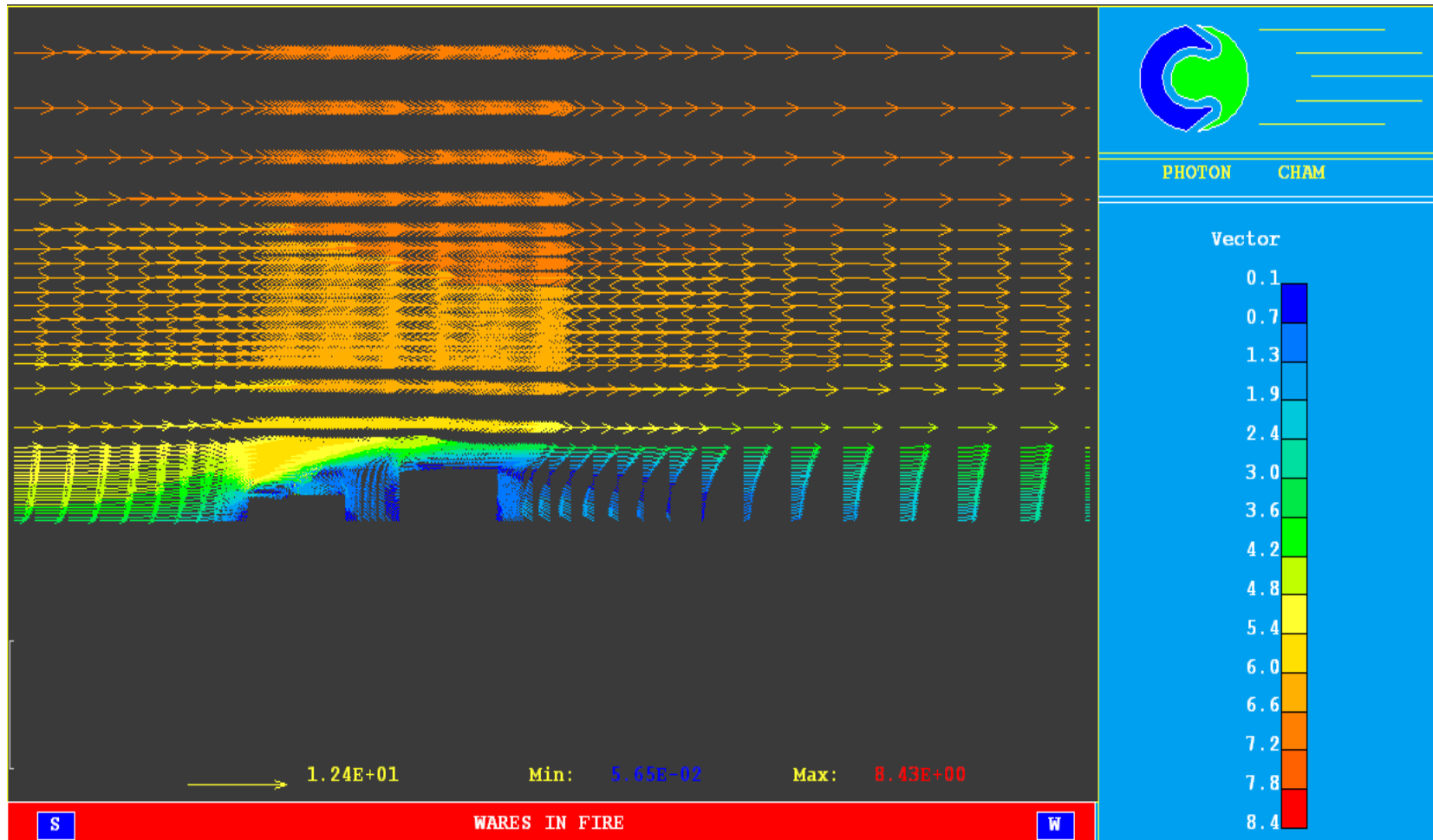
Με χρήση των υπολογιστικών εργαλείων που παρέχει το λογισμικό Phoenics για το post – processing των αποτελεσμάτων (Photon και Autoplot) και του MS Excel προέκυψαν οι παρακάτω καμπύλες, στις οποίες απεικονίζεται η αδιάστατη συγκέντρωση του ρύπου στο επίπεδο του εδάφους, σαν συνάρτηση της απόστασης από την πηγή. Η πηγή βρίσκεται στο πρώτο κτίριο κατά τη φορά του ανέμου (κατάντη) και είναι το άνοιγμα στην οροφή του κτιρίου, από το οποίο διαφεύγουν τα καυσαέρια σε θερμοκρασία 410 K τη στιγμή που η θερμοκρασία περιβάλλοντος θεωρείται 290 K.

Το πεδίο ροής και η κατανομή συγκεντρώσεων φαίνονται στις εικόνες που ακολουθούν για την περίπτωση μεσαίας άνωσης (0.02) και για απόσταση 2 H. Η επιλογή της περίπτωσης αυτής έγινε ώστε στην εικόνα να φανεί ένα ανεπτυγμένο ροϊκό πεδίο με τα αντίστοιχα διανύσματα ταχυτήτων.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν γίνεται απεικόνιση στην διάσταση του πεδίου η οποία είναι παράλληλη στην ταχύτητα του ανέμου, διότι λόγω των επιλεγμένων κλιματολογικών συνθηκών το πλούμιο θα κινηθεί προς αυτή την κατεύθυνση και όχι προς οποιαδήποτε άλλη. Συνεπώς, στα αποτελέσματα που ακολουθούν οι συγκεντρώσεις στο επίπεδο του εδάφους είναι κατά τη διεύθυνση του ανέμου, που αποτελεί και την χειρότερη περίπτωση (worst case).



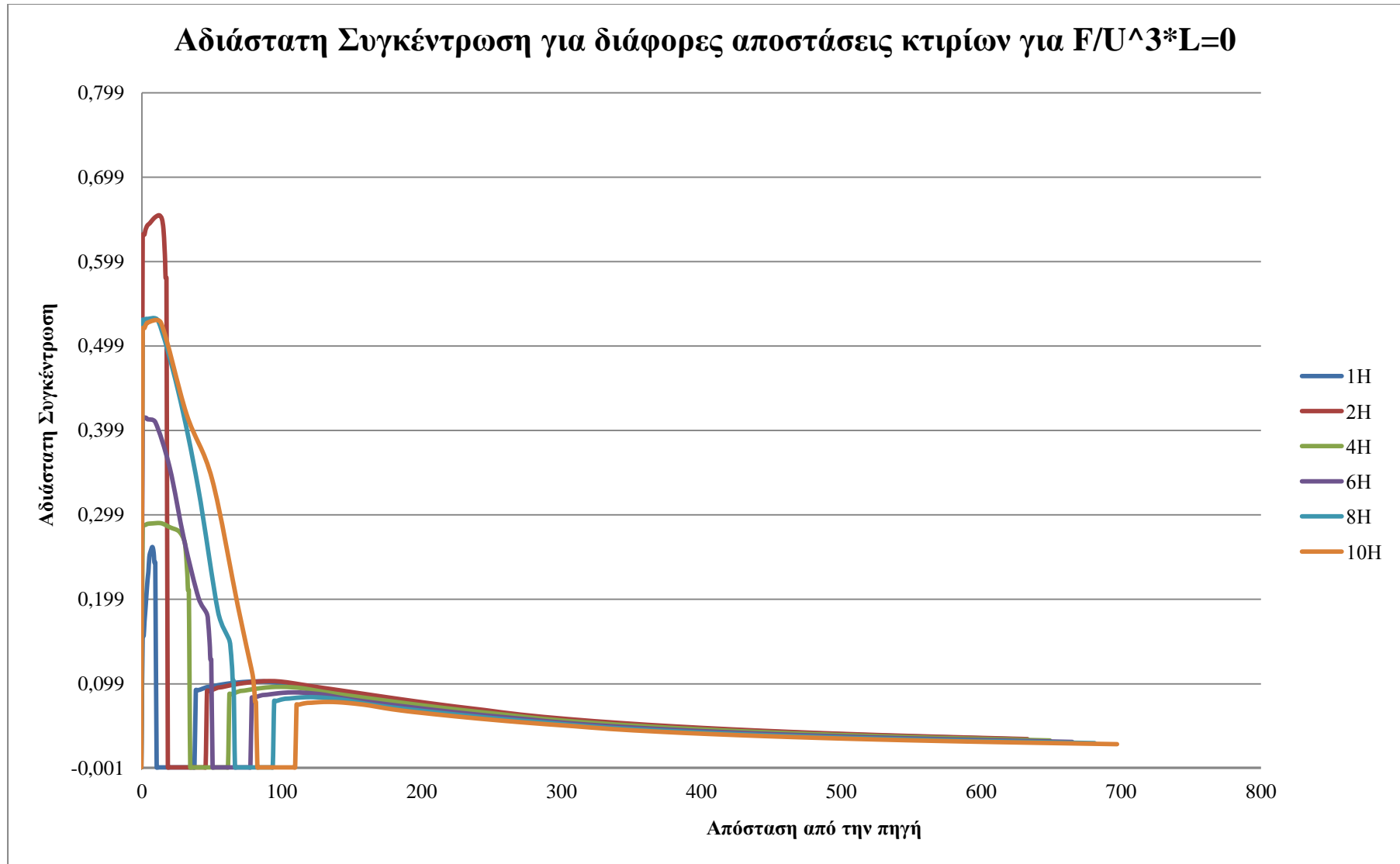
Εικόνα 8 Διανύσματα ταχύτητας υπολογιστικού πεδίου



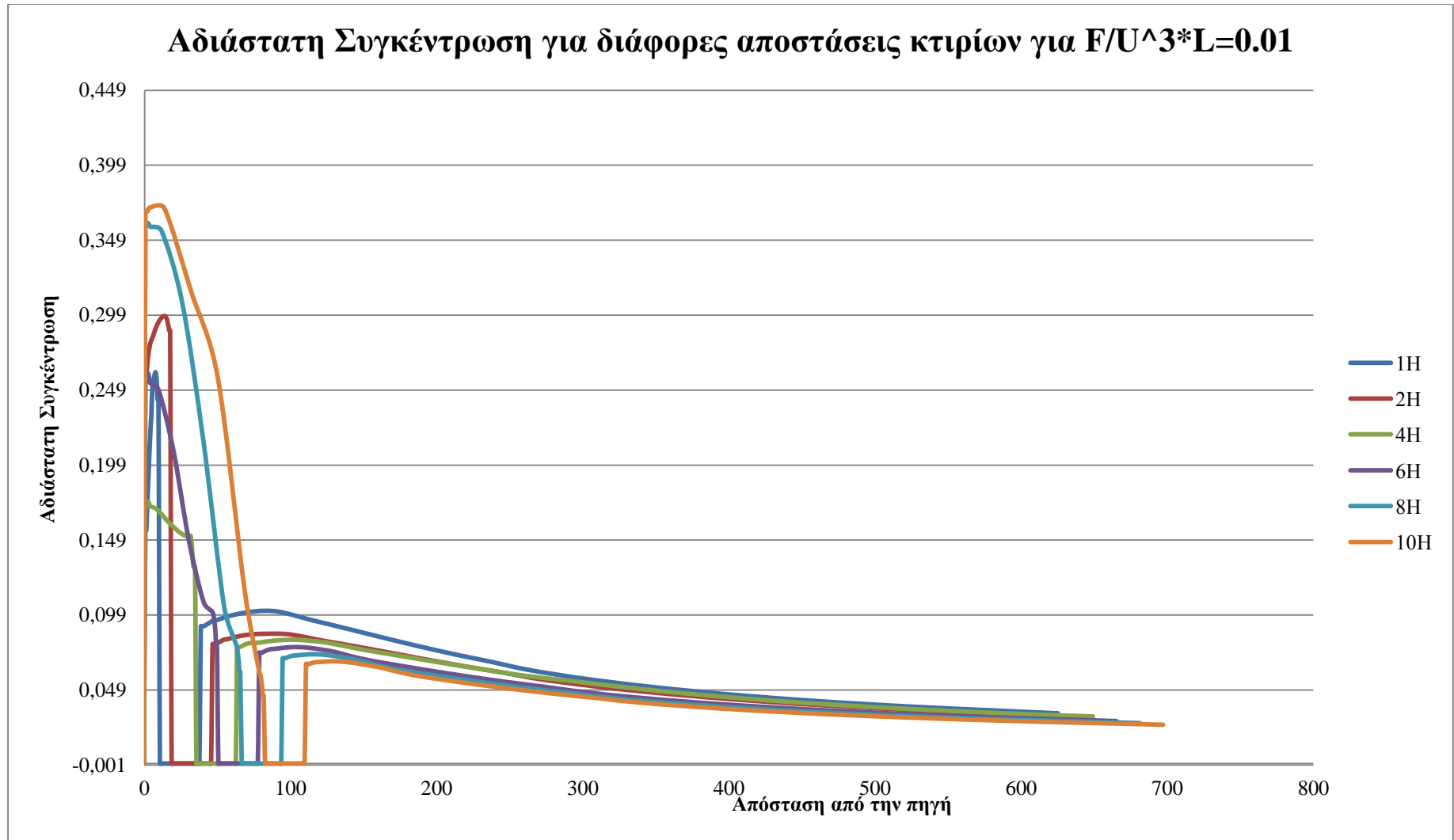
Εικόνα 9 Διανύσματα ταχυτήτων γύρω από τα κτίρια



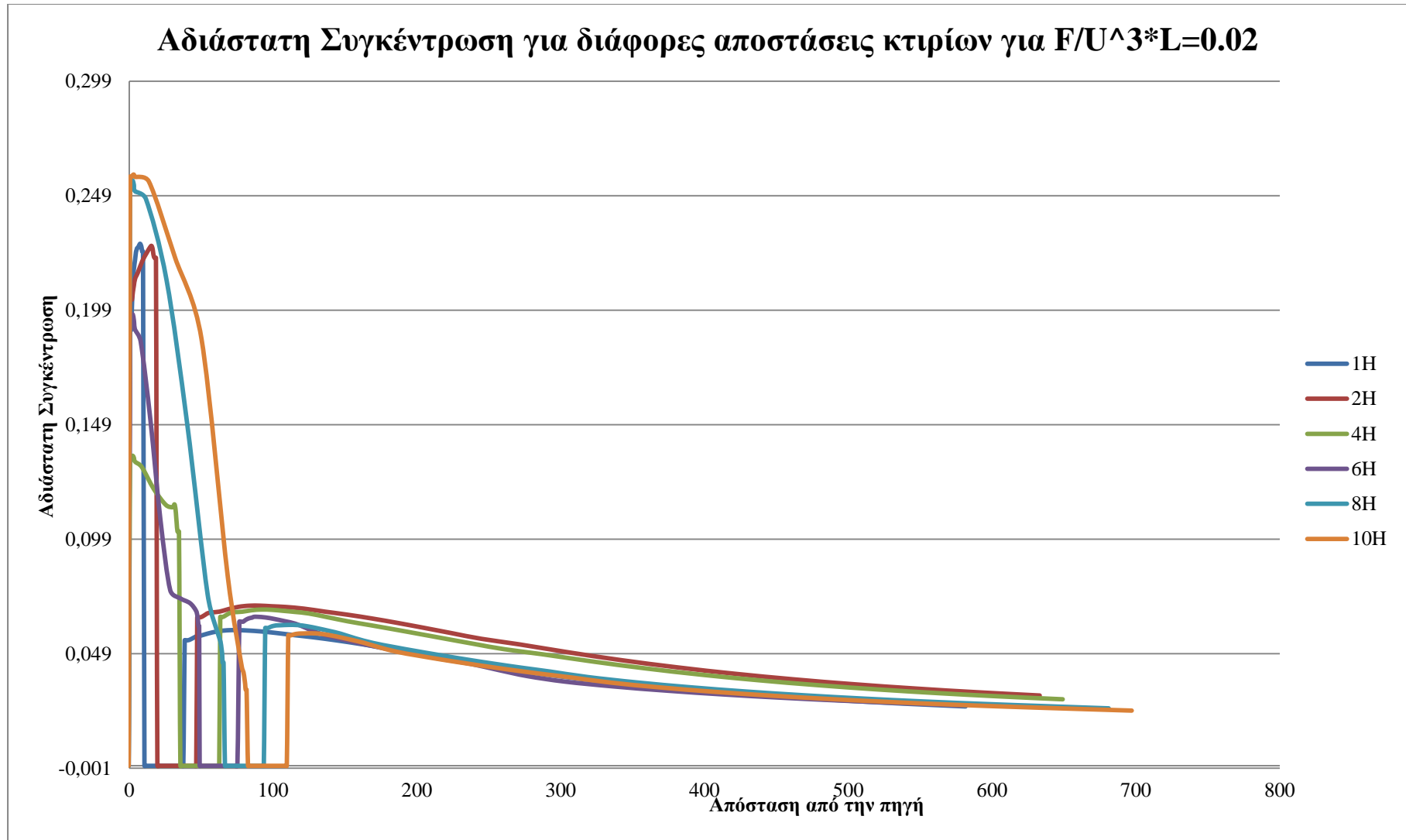
Εικόνα 10 Κατανομή συγκέντρωσης γύρω από τα κτίρια



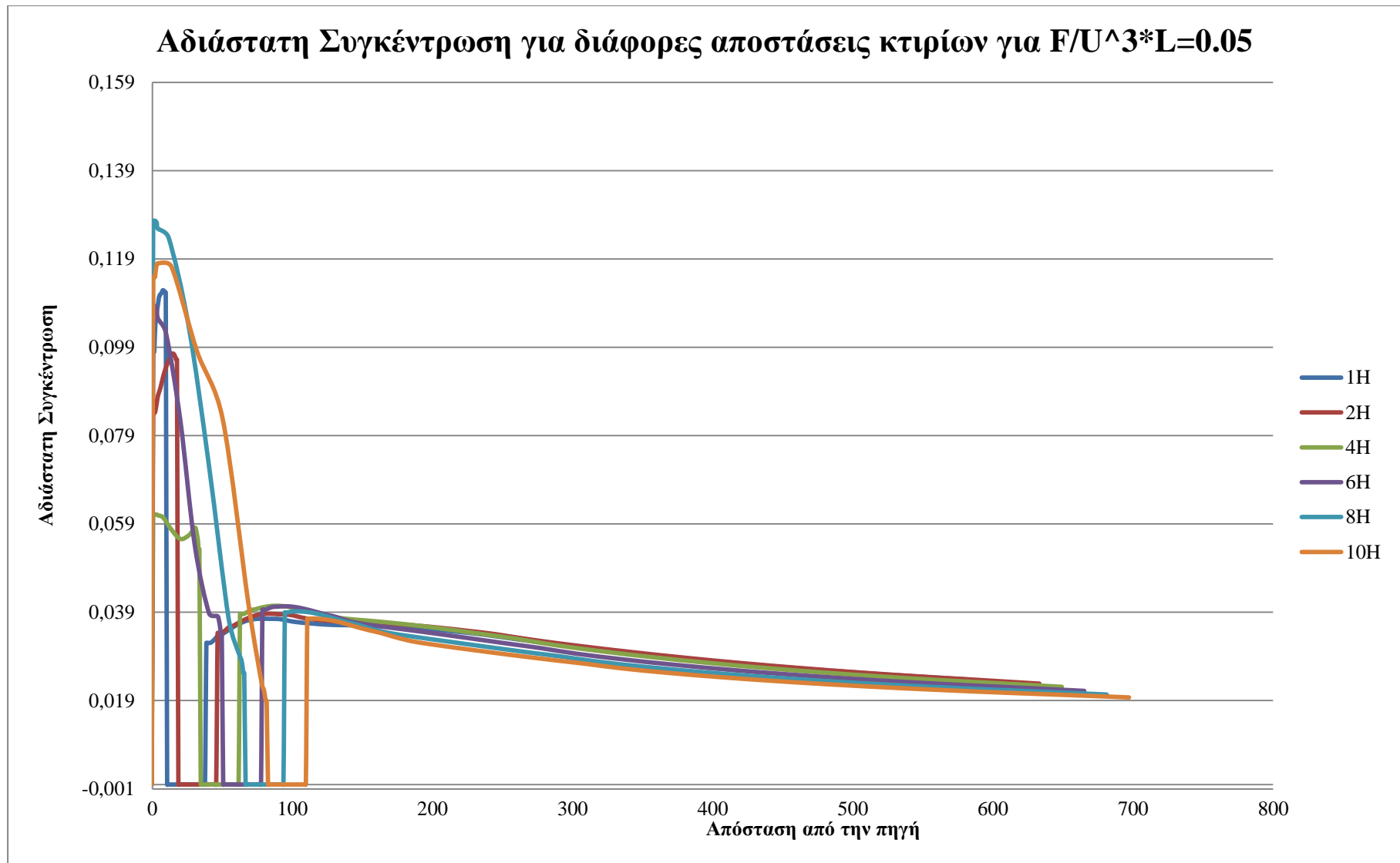
Διάγραμμα 1 Αδιάστατη Συγκέντρωση για διάφορες αποστάσεις κτιρίων για $F/U^3L=0$



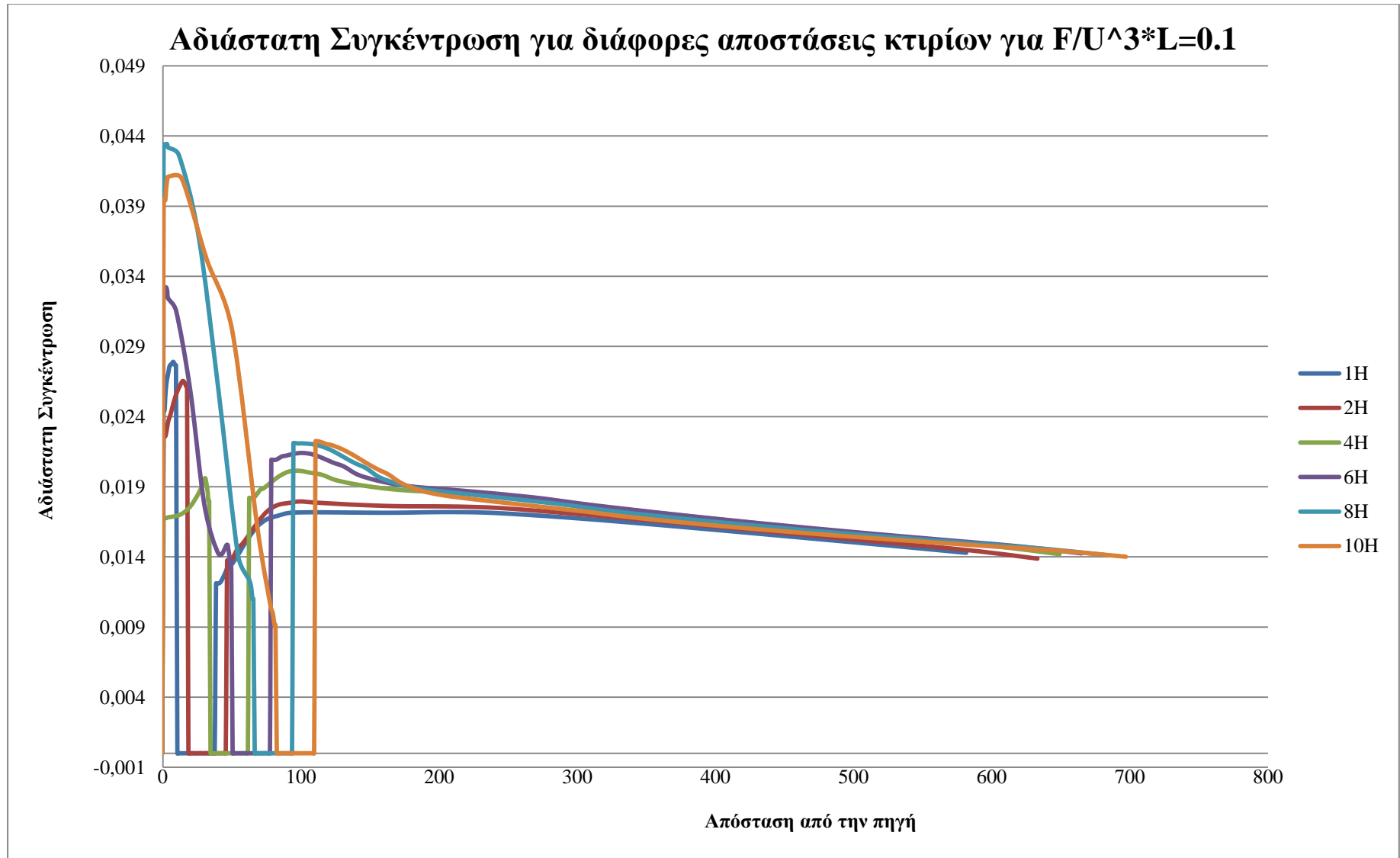
Διάγραμμα 2 Αδιάστατη Συγκέντρωση για διάφορες αποστάσεις κτιρίων για $F/U^3L=0.01$



Διάγραμμα 3 Αδιάστατη Συγκέντρωση για διάφορες αποστάσεις κτιρίων για $F/U^3L=0.02$



Διάγραμμα 4 Αδιάστατη Συγκέντρωση για διάφορες αποστάσεις κτιρίων για $F/U^3 \cdot L = 0.05$



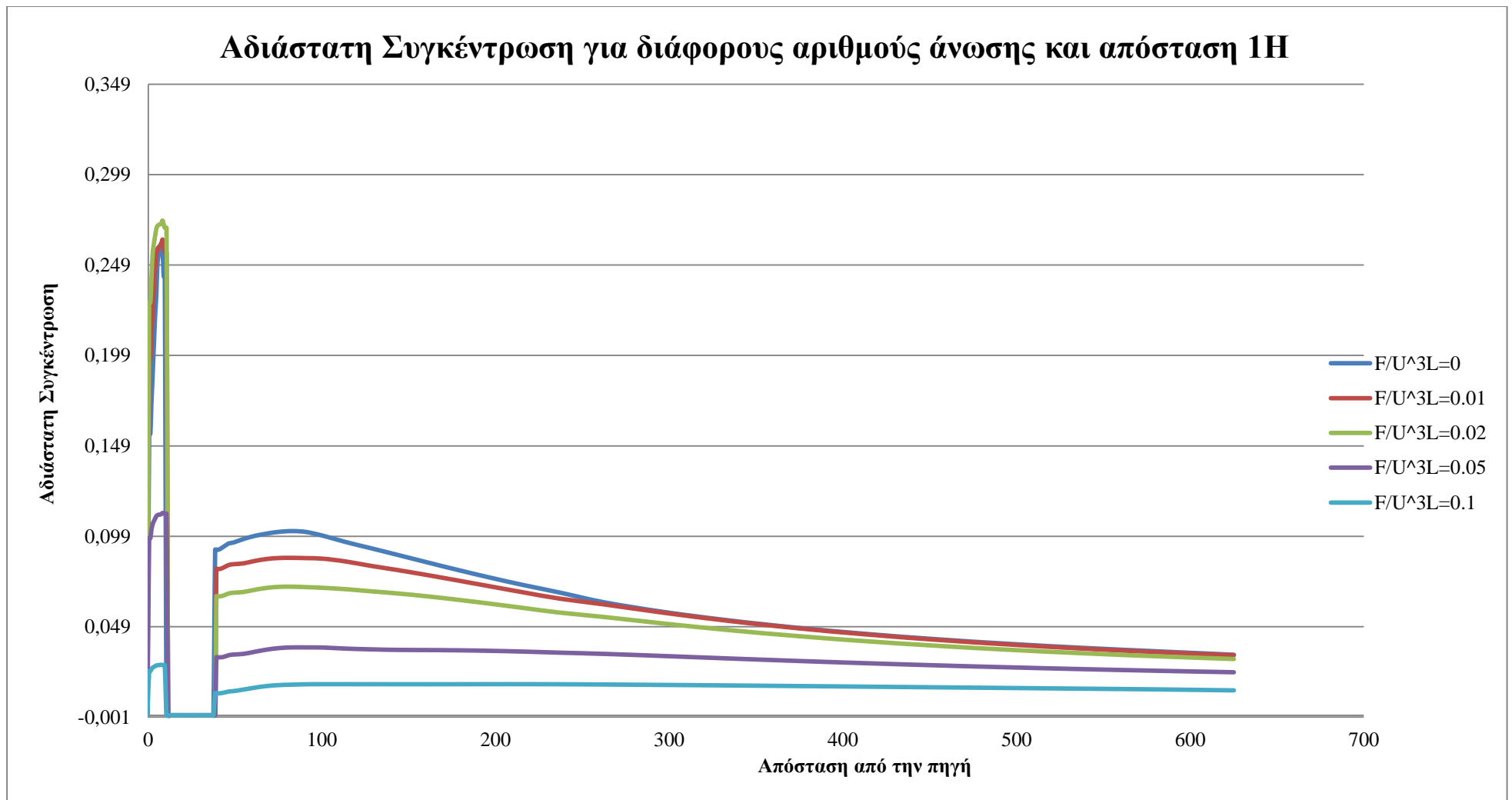
Διάγραμμα 5 Αδιάστατη Συγκέντρωση για διάφορες αποστάσεις κτιρίων για $F/U^3L=0.1$

Στα παραπάνω πέντε διαγράμματα εμφανίζεται η διαφοροποίηση της αδιάστατης συγκέντρωσης του ρύπου στο επίπεδο του εδάφους για διάφορες περιπτώσεις απόστασης μεταξύ των κτιρίων.

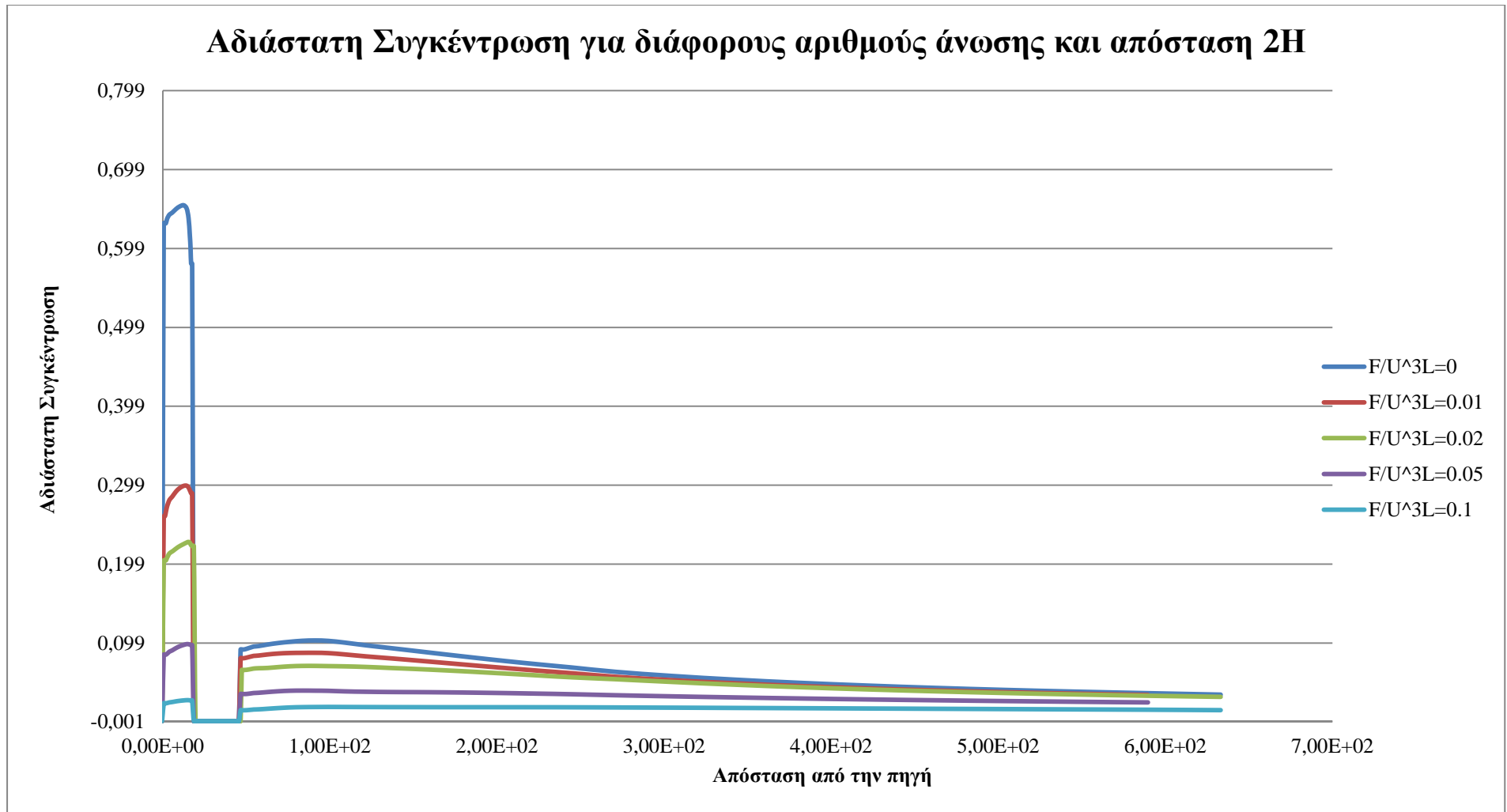
Με βάση τα διαγράμματα αυτά προκύπτουν τα παρακάτω σημαντικά συμπεράσματα:

- Παρατηρείται πως όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των κτιρίων αυξάνεται και η συγκέντρωση του πλουμίου στο επίπεδο του εδάφους. Βασική αιτία στην οποία αποδίδεται αυτό είναι πως για μεγάλες περιοχές ανάμεσα στα δύο κτίρια σχηματίζεται μια ζώνη ανακυκλοφορίας που εγκλωβίζει μεγάλες μάζες ρύπων, με αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης και κατ' επέκταση του κινδύνου στη συγκεκριμένη περιοχή. Ταυτόχρονα, η συγκέντρωση μετά το δεύτερο κτίριο είναι χαμηλή και η περιοχή είναι ασφαλέστερη.
- Η τελική συγκέντρωση του πλουμίου σε μεγάλη απόσταση από την πηγή είναι χαμηλή και φαίνεται να μην εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των δύο κτιρίων. Σε μεγάλη απόσταση μετά το δεύτερο κτίριο οι συγκεντρώσεις του ρύπου έχουν πολύ χαμηλό επίπεδο, γεγονός που αποδίδεται στην αραιώση του πλουμίου.
- Στο σύνολο των περιπτώσεων για διάφορους αδιάστατους αριθμούς άνωσης οι χειρότερες περιπτώσεις είναι για απόσταση 8 H και 10 H, οι οποίες είναι επαρόμοιες. Μόνο στην περίπτωση χαμηλής άνωσης η χειρότερη περίπτωση είναι για απόσταση 2H, γεγονός το οποίο αποδίδεται στην υπέρβαση του δεύτερου ψηλότερου κτιρίου το οποίο είναι πιθανό να λειτουργεί σαν φράγμα σε περίπτωση χαμηλής άνωσης.
- Για τις αποστάσεις 8H και 10H παρατηρείται πως η συγκέντρωση του πλουμίου είναι σχεδόν ίδια ανάμεσα στα δύο κτίρια και αυτό σημαίνει πως τα κτίρια έχουν απομακρυνθεί αρκετά και η παρουσία του δεύτερου ξεκινά να δεν επηρεάζει το πρώτο.
- Για απόσταση δύο κτιρίων ίση με 1H η καμπύλη είναι παρόμοια με αυτή χωρίς την παρουσία δεύτερου κτιρίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως για μικρή απόσταση το πλούμιο παρασύρεται από τον αέρα και δεν προλαβαίνει να «κατέβει» ανάμεσα στα δύο κτίρια. Στο γεγονός αυτό οφείλεται και η αύξηση της συγκέντρωσης όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των κτιρίων.

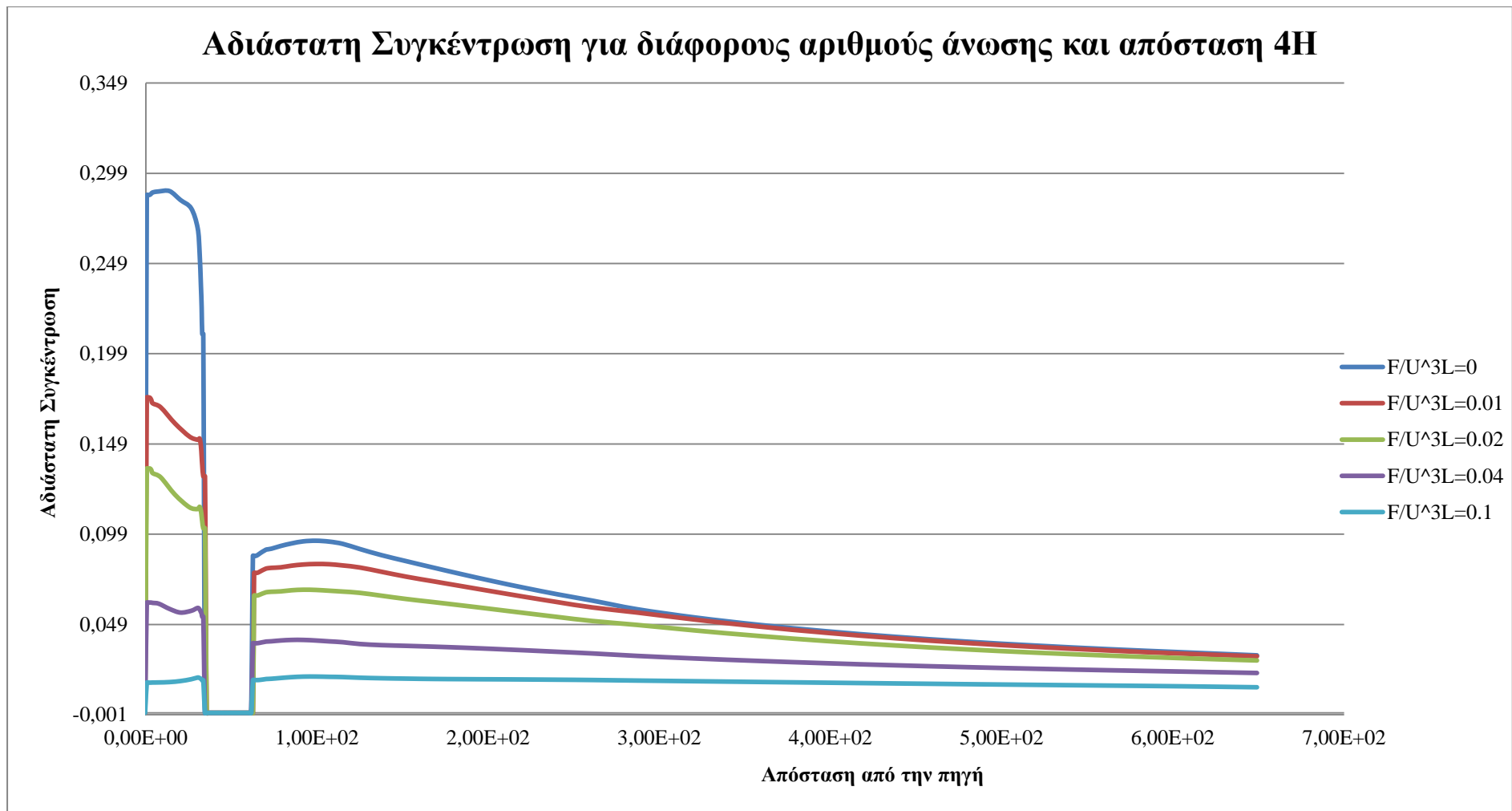
Τέλος, προκύπτει πως όσο αυξάνεται ο αδιάστατος αριθμός (μείωση ταχύτητας αέρα) τόσο μικρότερη επιρροή έχει η παρουσία του δεύτερου κτιρίου, δεδομένου ότι το πλούμιο δεν εγκλωβίζεται και οι συγκεντρώσεις ανάμεσα στα κτίρια και μετά το δεύτερο κτίριο τείνουν να εμφανίσουν μικρότερες διαφορές σε σχέση με τους μικρούς αριθμούς άνωσης.



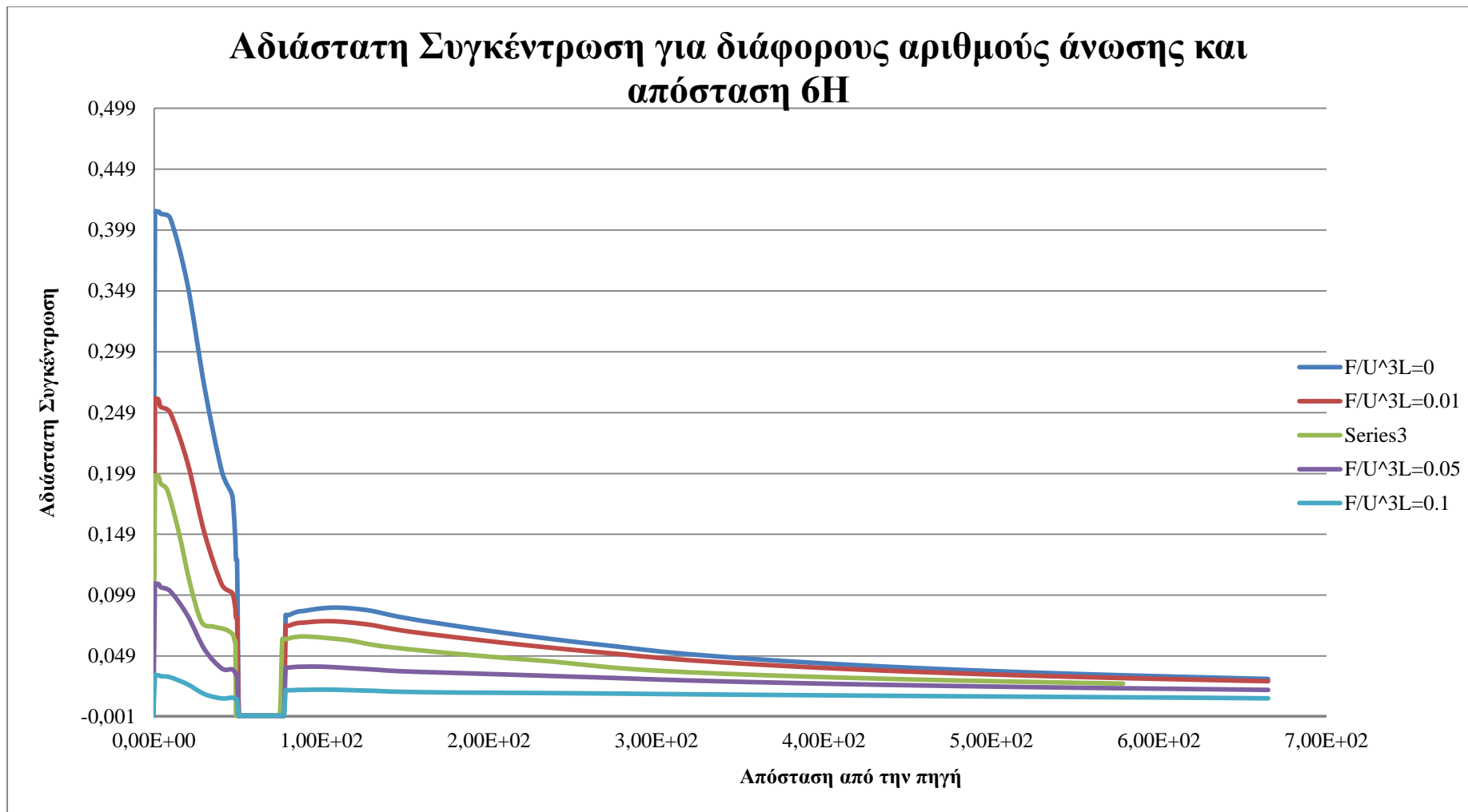
Διάγραμμα 6 Αδιάστατη Συγκέντρωση για διάφορους αριθμούς άνωσης και απόσταση 1H



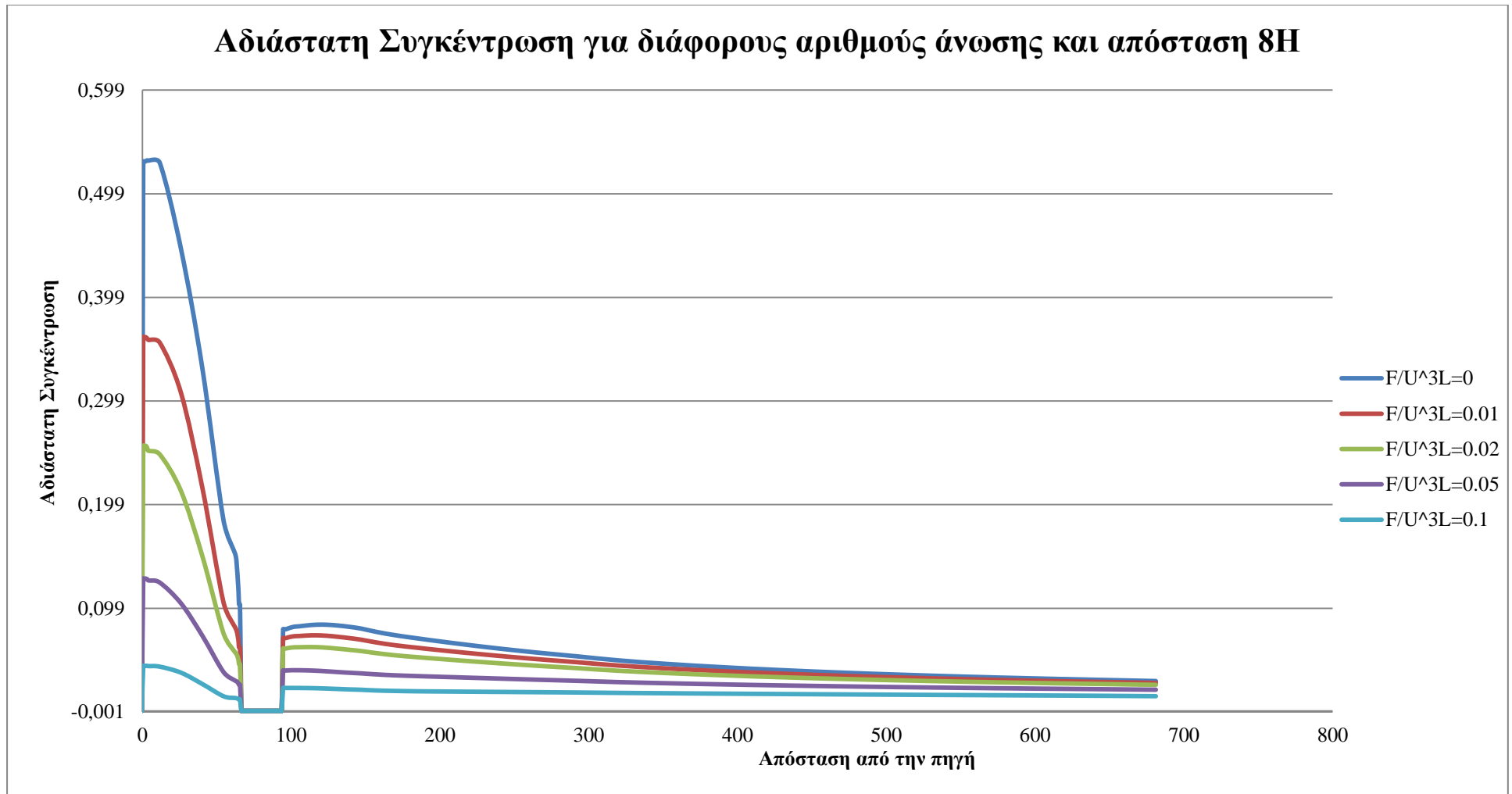
Διάγραμμα 7 Αδιάστατη Συγκέντρωση για διάφορους αριθμούς άνωσης και απόσταση 2H



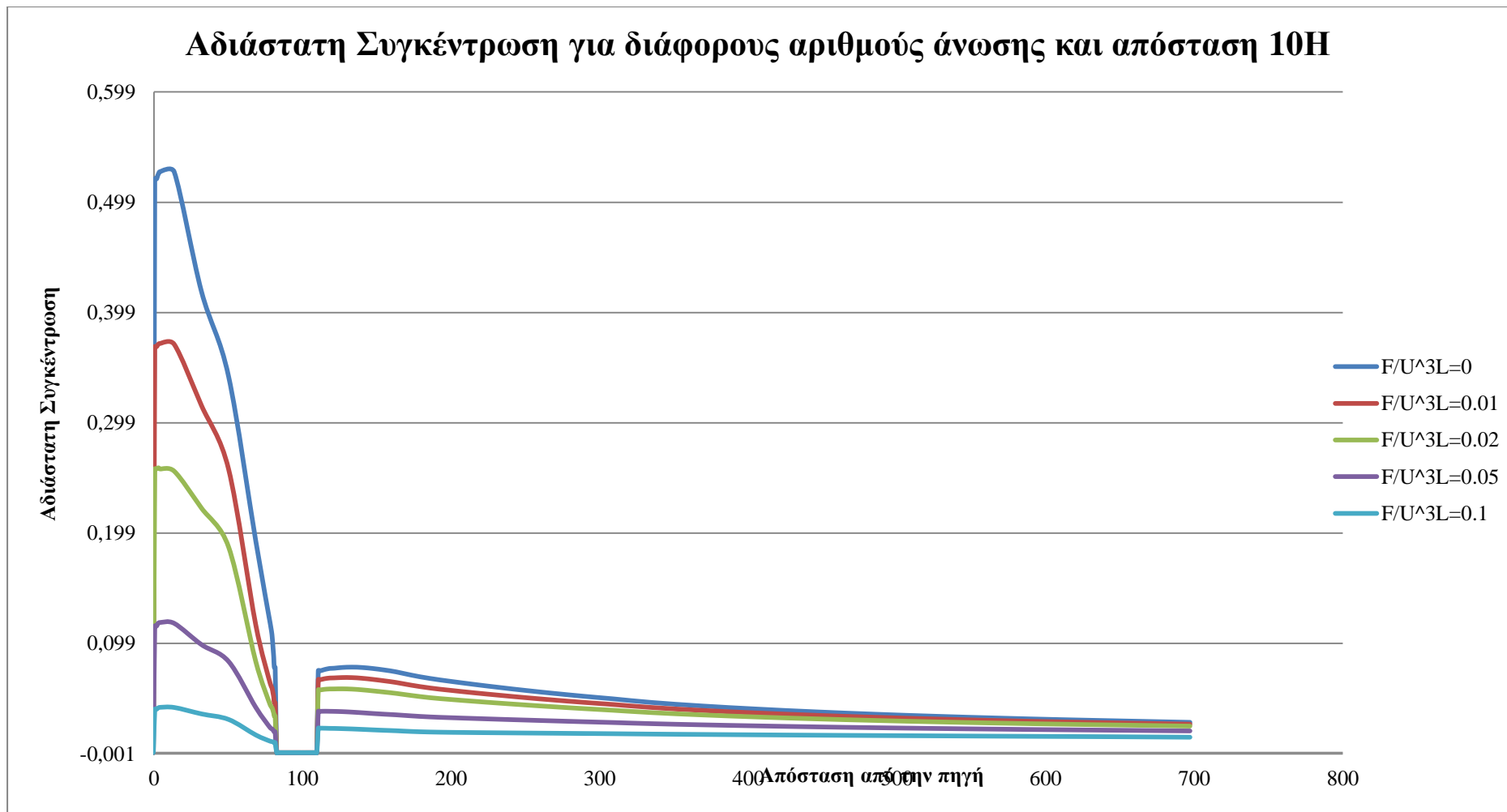
Διάγραμμα 8 Αδιάστατη Συγκέντρωση για διάφορους αριθμούς άνωσης και απόσταση 4H



Διάγραμμα 9 Αδιάστατη Συγκέντρωση για διάφορους αριθμούς άνωσης και απόσταση δH



Διάγραμμα 10 Αδιάστατη Συγκέντρωση για διάφορους αριθμούς άνωσης και απόσταση δH



Διάγραμμα 11 Αδιάστατη Συγκέντρωση για διάφορους αριθμούς άνωσης και απόσταση 10H

Στα παραπάνω πέντε διαγράμματα φαίνεται η εξάρτηση της συγκέντρωσης του ρύπου στο επίπεδο του εδάφους για διάφορες περιπτώσεις του αδιάστατου αριθμού άνωσης, για σταθερές αποστάσεις μεταξύ των κτιρίων.

Έτσι προκύπτουν τα ακόλουθα σημεία τα οποία είναι σημαντικά για την μελέτη του φαινομένου και την παρακολούθηση της εξέλιξης της ρύπανσης σε μια συγκεκριμένη περίπτωση συστοιχίας αποθηκών. Συνεπώς:

- Παρατηρείται πως όσο αυξάνεται ο αδιάστατος αριθμός άνωσης τόσο μεγαλύτερη ποσότητα πλουμίου τείνει να ανέλθει προς την ατμόσφαιρα και μειώνονται αισθητά οι συγκεντρώσεις στο επίπεδο του εδάφους. Επίσης, η αύξηση του αδιάστατου αριθμού άνωσης διευκολύνει την αποκόλληση του πλουμίου και καθιστά το έδαφος γύρω από τις εγκαταστάσεις ασφαλέστερο.
- Για απόσταση 1 H και 2 H το μέγιστο της συγκέντρωσης βρίσκεται πιο κοντά στο δεύτερο κτίριο στην ζώνη ανακυκλοφορίας, ενώ για τις υπόλοιπες αποστάσεις το μέγιστο εμφανίζεται πολύ κοντά στην πηγή. Η διαφορά δεν είναι σημαντική μιας και η συγκέντρωση είναι ίδιας τάξης, αλλά η διαφορά αυτή μπορεί να αποδοθεί στο ροϊκό πεδίο όπου στις μικρές αποστάσεις η ανακυκλοφορία δεν προλαβαίνει να αναπτυχθεί πλήρως.
- Ανεξάρτητα του αδιάστατου αριθμού άνωσης η τελικά συγκέντρωση του ρύπου σε μεγάλη απόσταση τείνει να φτάσει στην ίδια τιμή για όλες τις περιπτώσεις ανεξάρτητα με την ταχύτητα του ανέμου και την θερμοκρασιακή διαφορά.
- Για τις αποστάσεις 8H και 10H επιβεβαιώνεται, όπως καταλήξαμε και στην προηγούμενη ανάλυση, πως η συγκέντρωση του πλουμίου είναι σχεδόν ίδια ανάμεσα στα δύο κτίρια και αυτό σημαίνει πως τα κτίρια έχουν απομακρυνθεί αρκετά και η παρουσία του δεύτερου δεν επηρεάζει το πρώτο. Αυτό συμβαίνει για οποιοδήποτε αριθμό άνωσης, αλλά κυρίως σε περιπτώσεις μεγάλης άνωσης οι συγκεντρώσεις κυμαίνονται σε πάρα πολύ χαμηλά επίπεδα.
- Για απόσταση δύο κτιρίων ίση με 4H η καμπύλη φαίνεται να έχει κοντινή τιμή ανάμεσα στα δύο κτίρια και μετά το δεύτερο κτίριο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως σε μια τέτοια απόσταση κτιρίων ανεξάρτητα της άνωσης η ποσότητα πλουμίου που εγκλωβίζεται και η ποσότητα που φεύγει μετά το δεύτερο κτίριο δημιουργούν την ίδια συγκέντρωση στις δύο ζώνες. Αυτή φαίνεται να είναι η βέλτιστη περίπτωση, όταν υπάρχουν άνθρωποι και στις δύο περιοχές.

Κάτι το οποίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό και αξίζει να τονιστεί είναι το γεγονός πως στις περισσότερες μελέτες ασφαλείας θεωρείται ένα *απομονωμένο κτίριο* και μελετάται το πεδίο συγκεντρώσεων γύρω από αυτό. Με βάση αποτελεσμάτα από προηγούμενες εργασίες αλλά και ορισμένων αποτελεσμάτων από το μοντέλο κατέστη σαφές πως για ένα απομονωμένο κτίριο οι συγκεντρώσεις ταυτίζονται με την περίπτωση ύπαρξης δύο ισοϋψών κτιρίων με απόσταση 1H μεταξύ τους. Η τιμή αυτή

είναι μικρότερη από ορισμένες άλλες τιμές όπως φαίνεται και στα αποτελέσματα, πράγμα το οποίο σημαίνει πως η περίπτωση ενός απομονωμένου κτιρίου δεν αποτελεί την χειρότερη περίπτωση. Συνεπώς, η μελέτη στο συνολικό πολεοδομικό ανάγλυφο αποτελεί την χειρότερη περίπτωση, η οποία είναι αυτή που χρησιμοποιείται σε όλες τις μελέτες ασφαλείας και βοηθάει στον καθορισμό μεγαλύτερων ζωνών ασφαλείας.

Όσον αφορά το πολεοδομικό ανάγλυφο η συστοιχία δύο κτιρίων ίδιου ύψους (1H) αποτελεί μια συνήθη περίπτωση. Η συστοιχία αυτή αποτελεί μια περίπτωση όπου εμφανίζονται έντονα φαινόμενα ανακυκλοφορίας ανάμεσα στα δύο κτίρια και ανάλογα με την απόσταση των κτιρίων πολύ συχνά παρατηρείται εγκλοβισμός του πλουμίου και μεγάλες συγκεντρώσεις. Στην περίπτωση αυτή η συγκέντρωση του πλουμίου είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την περίπτωση απομονωμένου κτιρίου κάνοντας την αντιμετώπιση δυσκολότερη.

Σε σχέση με την μορφολογία κτιρίων που εξετάζεται στην παρούσα εργασία, όπου τα κτίρια είναι διαφορετικού ύψους, η περίπτωση ισουψών κτιρίων φαίνεται ευνοϊκότερη για την ζώνη ανάμεσα στις αποθήκες και δυσμενέστερη για την περιοχή μετά τη δεύτερη αποθήκη.

Αναλυτικότερα, για τη ζώνη ανακυκλοφορίας παρατηρείται πως στην περίπτωση που το δεύτερο κτίριο είναι διπλάσιου ύψους, η συγκέντρωση είναι οριακά μεγαλύτερη, καθιστώντας την περιοχή εξίσου επικίνδυνη. Το ίδιο παρατηρείται και για ισουπή κτίρια με τη διαφορά πως στην δεύτερη περίπτωση μεγαλύτερο μέρος της ποσότητας ρύπου ξεπερνά το δεύτερο κτίριο. Οι συγκεντρώσεις ανάμεσα στα κτίρια είναι ίδιας τάξης μεγέθους και για τις δύο περιπτώσεις με την περίπτωση ανισουψών κτιρίων να έχει ελαφρά μεγαλύτερες συγκεντρώσεις.

Για την ζώνη μετά το δεύτερο κτίριο η παρουσία του δεύτερου ψηλότερου κτιρίου ευνοεί γιατί βοηθάει στην ανύψωση του πλουμίου και τη μείωση της συγκέντρωσης στο επίπεδο κοντά στο έδαφος και στην πρόληψη ατυχημάτων. Για συστοιχίες ισουψών κτιρίων η συγκέντρωση μετά το δεύτερο κτίριο είναι έως και διπλάσια σε σχέση με την περίπτωση ανισουψών κτιρίων.

Συμπερασματικά, η μεγαλύτερη συγκέντρωση τοξικής ουσίας στο επίπεδο του εδάφους παρατηρείται για την περίπτωση σύνθετου αναγλύφου, με το δεύτερο κτίριο να έχει διπλάσιο ύψος. Η μέγιστη τιμή συγκέντρωσης καταγράφεται στην περιοχή ανάμεσα στα δύο κτίρια. Επομένως, στις μελέτες ασφαλείας θα πρέπει να εξετάζεται και η περίπτωση σύνθετου αναγλύφου και όχι ενός απομονωμένου κτιρίου, ώστε να λαμβάνεται υπ' όψιν η χειρότερη περίπτωση (worst case)./

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

9.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μετά από την μελέτη και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της συγκεκριμένης περίπτωσης προκύπτουν κάποια ιδιαίτερα σημαντικά συμπεράσματα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη και την αντιμετώπιση πιθανών συδμενών φαινομένων που προκύπτουν σε μια πυρκαγιά.

Τα συμπεράσματα αυτά είναι τα ακόλουθα:

- Η απόσταση της ζώνης ανάμεσα στα δύο κτίρια παίζει σημαντικό ρόλο στην κατανομή του πλουμίου και στην διασπορά του. Ανάλογα με την απόσταση ανάμεσα στα δύο κτίρια αλλάζει και η μέγιστη συγκέντρωση του πλουμίου. Για μεγάλες αποστάσεις (8 H και 10 H) η απόσταση φαίνεται να μην επηρεάζει τόσο έντονα την συγκέντρωση, μιας και τα αποτελέσματα για 8 και 10 H είναι παρόμοια. Για αποστάσεις μικρές το πλούμιο παρασύρεται από τον αέρα και η συγκέντρωση μετά το πρώτο κτίριο είναι μικρότερη σε σχέση με τις μεγαλύτερες αποστάσεις για τις συνηθισμένες περιπτώσεις άνωσης.
- Όσον αφορά τον αδιάστατο αριθμό άνωσης, η τιμή του παίζει καθοριστικό ρόλο στην συγκέντρωση του πλουμίου στο επίπεδο του εδάφους, καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η άνωση, άρα μικρότερη η ταχύτητα του αέρα τόσο περισσότερο το πλούμιο ανυψώνεται και αποκολλάται από το έδαφος με αποτέλεσμα να μην είναι τόσο επικίνδυνο για τους παρευρισκόμενους. Συνεπώς, η βέλτιστη περίπτωση είναι η μικρή ταχύτητα αέρα ώστε η διασπορά των ρύπων να γίνει προς την ατμόσφαιρα και όχι προς τους εργαζόμενους.
- Η δεύτερη αποθήκη, λόγω του μεγάλου ύψους της, λειτουργεί σαν ένα φράγμα το οποίο δεν επιτρέπει στο πλούμιο να το υπερβεί και να ανυψωθεί με αποτέλεσμα την παραμονή του ανάμεσα στα δύο κτίρια.
- Οι καμπύλες της αδιάστατης συγκέντρωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό οποιασδήποτε περίπτωσης από μηχανικούς και περιβαλλοντολόγους. Αυτό σημαίνει πως με την γνώση της απόστασης μεταξύ των αποθηκών και της μετεωρολογικής κατάστασης (για τον προσδιορισμό του αριθμού άνωσης) μπορεί να γίνει μια ικανοποιητική αρχική εκτίμηση της συγκέντρωσης, η οποία με κατάλληλη μεθοδολογία μπορεί να αναχθεί σε πραγματική συγκέντρωση, ανάλογα με τα ισοδύναμα ουσιών.

9.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

Η παρούσα εργασία μπορεί να αποτελέσει τη βάση για εξέλιξη της μελέτης του φαινομένου και να δώσει το έναυσμα για τη διεξοδικότερη μελέτη των πυρκαγιών σε αποθήκες χημικών. Ορισμένες πιθανές προτάσεις για μελλοντική μελέτη παρουσιάζονται παρακάτω.

Αρχικά, για την καλύτερη προσομοίωση της αποθήκης σε κατάσταση πυρκαγιάς πρέπει να μελετηθεί και το φαινόμενο σε μη μόνιμες συνθήκες. Στην πραγματικότητα δεν έχουμε μόνιμες συνθήκες σε μια πυρκαγιά και το φαινόμενο εξελίσσεται συνεχώς. Έτσι, θα μπορούσε να μελετηθεί το φαινόμενο από τη στιγμή που ξεκινάει πυρκαγιά, μέχρι την κατάσβεση της. Βέβαια, μια τέτοια χρονικά μεταβαλλόμενη προσομοίωση είναι αρκετά δύσκολη έως αδύνατη για τα δεδομένα των κλασσικών προσομοιώσεων με CFD.

Επίσης, με το μοντέλο αυτό μπορεί να διερευνηθούν και οι επιδράσεις διαφορετικών μετεωρολογικών καταστάσεων, όπως η στρωματοποίηση της ατμόσφαιρας. Πρέπει να δειχθεί η επίδραση στη ροή και στη συγκέντρωση για διάφορες σταθερές και ασταθείς καταστάσεις της ατμόσφαιρας.

Με βάση το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία μπορούν να μελετηθούν και τα πεδία ροής και συγκεντρώσεων και σε περισσότερες αποθήκες, ή και συστοιχίες κτιρίων από τα οποία ορισμένα βρίσκονται σε κατάσταση πυρκαγιάς. Επίσης, μπορεί αν δημιουργηθεί και ένα ακόμα πιο σύνθετο οικοδομικό ανάγλυφο με διάφορους τύπους εμποδίων και κτιρίων, τα οποία αποτελούν προσομοίωση ενός πραγματικού χώρου αποθήκευσης.

Τέλος, θα πρέπει να μελετηθεί και η γεωμετρία του κτιρίου και η θέση των ανοιγμάτων. Το μοντέλο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και για αποθήκες με διαφορετικό λόγο ύψους προς πλάτος ή μήκος, όπου τα ανοίγματα μπορούν να βρίσκονται είτε στην οροφή είτε στα πλάγια και δε διάφορες θέσεις, ανάλογα με την περίπτωση που επιλέγεται κάθε φορά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10^ο

ΑΝΑΦΟΡΕΣ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

10.ΑΝΑΦΟΡΕΣ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Adams, J., (1995). Risk, UCL Press, London.
2. Adiga, K. C., Ramaker, D. E., Tatem, P. A., Williams, F. W., (1989). Modelling pool-like gas flames of propane. Fire Safety J., 14, pp: 241-250.
3. AEAT/ENV/R/1784, (2006). Initial review of Air Quality aspects of the Buncefield Oil Depot Explosion, May.
4. Anderson, D. A., Tannehill, J. C. and Pletcher, R. H., (1984). Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer, Hemisphere Publishing Corporation, Taylor & Francis Group, New York.
5. Andronopoulos, S., (1992). A review of vapour cloud dispersion models, Report EUR 143 29 EN.
6. Assessment of Safety reports for Chemical Warehouses - Guidance & Discussion, (1996). Health & Safety Executive - HSE.
7. Bakan, S., Chlond, A., Cubasch, u., Feichter, J., Graf, H., Grassi, H., Hasselmann, κ., Kirchner, I, Latif, M., Roeckner, E., Sausen, R., Schlese, u., Schriever, D., Schult, I, Schumann, u., Sielmann, F., and Welke,W., (1991). Climate response to smoke from the burning oil wells in Kuwait. Nature, Vol. 351, pp: 367-371.
8. Baum, R., H. and McGrattan, K., B., (1998). Simulation of Large Industrial Outdoor Fires. Fire Detection, Fire Extinguishment and Fire Safety Engineering. NRIFD 50th Anniversary Symposium. Proceedings. Fire Fighting Future 50th Session (FFF50th), Tokyo, Japan, pp: 23-30.
9. Beck, u., (1992). The Risk Society. Sage, London.
10. Beyler, C. I., (1986). Fire plumes and ceilingjets. Fire Safety J., 11, p: 53-75.
11. Bisarya, R. K., Puri, S., (2005). The Bhopal gas tragedy - A perspective, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 18, pp: 209-212.
12. Browning, K. A., Allam, R., J., Ballard S. P., Bames, R. ,T., H., Bennetts, D., A., Maryon, R, H., Mason, P., I., McKenna, D., Mitchell, J. F. B., Senior, C. A., Slingo, A., and Smith, P., B., (1991). Environmental effects from burning oil wells in Kuwait. Nature, Vol. 351, pp: 363-367.
13. Caretto, I. S., Gosman, A. D., Patankar, S. v., and Spalding, D. B., (1972). Two Calculation Procedures for Steady, Three-Dimensional Flows with Recirculation, Proc. 3d Int. Conf. Num. Methods Fluid Dyn., Paris, Vol. π, pp: 60.
14. Carter, D. A., (1989). Methods for estimating the dispersion of toxic combustion products :from large flfes. Chem. Eng. Res. Des., Vol. 67, pp: 348-352.
15. Chang, J., Lin Cheng-Chung, (2006). A study of storage tank accidents, Journal

- of Loss Prevention in the process industries, 19, pp: 51-59.
16. Chapman T. G. and Tobak M., (1985). Observations, Theoretical Ideas, and Modeling of Turbulent Flows - Past, Present and Future, in Theoretical Approaches to Turbulence, Dwyer et al. (eds), Springer - Verlag, New York, pp: 19-49.
 17. Chatris, J., M., Quintela, J., Foch, J., Planas, E., Amaldoss, J. and Casal, J., (2001). Experimental Study of Burning Rate in Hydrocarbon Pool Fires, Combustion and Flame, 126, pp: 1373-1383.
 18. Chouhan, T. R., (2005). The unfolding of Bhopal disaster, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 18, p: 205-208.
 19. Cox, G., Chitty, R., (1985). Some source dependent effects of unbounded fires. Combustion Flame, 60, pp: 219-232.
 20. Crauford, N. I., Liew, S. K., Moss, J. B., (1985). Experimental and numerical simulation of a buoyant fire. Combustion Flame, 61, pp: 55.
 21. De leeuw, P., Berge, E., Gronskei, K. and Tombrou, M., (1995). Review of requirements for models and model applications, Report MA3-1, European Topic Centre on Air Quality.
 22. Delichatsios, M. A., (1995). Air entrainment into buoyant jet flames and pool fires. SFPE Handbook, 2nd ed., National Fire Protection Association.
 23. Delichatsios, M.A., (1987). Air entrainment into buoyant jet flames and pool fires. Combustion Flame, 70, pp: 33-46.
 24. Federal Emergency Management Agency (PEMA) , United States Fire Administration, National Fire Data Centre, Technical Report Series, (1998). "Phillips Petroleum Chemical Plant Explosion and Fire Pasadena, Texas, October 1989".
 25. Fisher, B. E. A., Metcalfe, I., Vince, I., Yates, A., (2001). Modelling plume rise and dispersion from pool fires. Atmospheric Environment 35, pp: 2101-2110.
 26. Freitas, J. C., (1995). Perspective: Selected Benchmarks From Commercial CFD Codes, Journal of Fluids Engineering, February 23.
 27. Geyer, T. A. W., & Bellamy, L. J., (1991). Pipe-work failure, failure causes and the management factor. Paper C425/012, Institute of Mechanical Engineers, London.
 28. Gifford, F. A., (1976). Turbulent Diffusion - Typing Schemes: A review, Nucl Saf. 7(1): 71.
 29. Haastrup Palle and Brockhoff Lars, (1990). Severity of accidents with hazardous materials. A comparison between transportation and fixed

- installations, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 3, pp: 395-405.
30. D.J. Hall, V. Kukadia, G.W.Marsland, 'Dispersion of Plume from Warehouse fires, Report 1993
 31. D.J. Hall, V. Kukadia, S. Walker, G.W.Marsland, ' Plume Dispersion From Chemical Warehouses on Fires, Building Research Establishment, CR 56/95, UK, 1995
 32. Hamins, A., Konishi, κ., Borthwick, P., Kashiwagi, T., (1996). Global properties of gaseous pool fires. 26th Symposium on Combustion, Napoli, Italy, pp: 1429- 1436.
 33. Hanjalic, K., (2004). Closure Models for Incompressible Turbulent Flows, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
 34. Hanna, S. R., Briggs G. A., Hosker, R. P., (1982). Handbook on atmospheric diffusion, Technical Information Center, U.S Department of Energy, (Απόδοση στα Ελληνικά Καθ. Ε.Μ.Π. Γ. Μπεργελές).
 35. Hara, T., Yokoi, M., Kato, S., (2000). Study on thermal plumes in free space by means of numerical simulation based on standard $k-\epsilon$ model, *J. Archit. Plann. Euvritou. Eng.*, 530, pp: 39-46.
 36. Hara, T., Yokoi, M., Morikawa, Y., (1998). Analysis of thermal plumes with numerical simulation and experimental results. Basic plume analyses for the CFD performance of the standard $k-\epsilon$ model Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, , pp: 683-684.
 37. Hasemi, Y., Tokunaga, T., (1984). Flame geometry effects on the buoyant plumes from turbulent diffusion flames. *Fire Science Technology*, 4, pp: 15-26.
 38. Hayase, T., Humphrey, J. A. C. and Greif, R. (1992). A consistently formulated Quick scheme for fast and stable convergence using finite-volume iterative calculation procedures, *J. Comput. Phys.*, Vol 98, pp: 108-118.
 39. HAZ -MAT Response team, Leak and Spill Guide, (1984). Fire Protection Publications, Oklahoma State University.
 40. Heskestad, G., (1983). Luminous heights of turbulent diffusion flames. *Fire Safety J.*, 5, pp: 103-108.
 41. Heskestad, G., (1995). Fire plumes. *SFPE Handbook*, 2nd ed., National Fire Protection Association.
 42. Hinze o. J., (1959). *Turbulence*, McGraw - Hill, New York.
 43. Hossain, M. S., Rodi, M., (1982). A turbulence model for buoyant flows and its

- application to vertical buoyant jets. In: Rodi, W., editor. Turbulent jets & flames. New York: Pergamon Press, pp: 121-178.
44. Houston, D. E. I., (1971). New approaches to the safety problem, Major Loss Prevention, 210, pp: 45-52.
 45. HSE, Buncefield MIIB, (2006a). The Buncefield Investigation, Progress Report 1, HSE & EA, (www.buncefieldinvestigation.gov.uk).
 46. HSE, Buncefield MIIB, (2006b). The Buncefield Investigation, Progress Report 2, HSE & EA, (www.buncefieldinvestigation.gov.uk).
 47. HSE, Buncefield MIIB, (2006c). The Buncefield Investigation, Progress Report 3, HSE & EA, (www.buncefieldinvestigation.gov.uk).
 48. Huser, A., Nilsen, P.J., Skatum, H., (1997). Application of $k-\epsilon$ model to the stable ABL: Pollution in complex terrain. J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 67&68, pp:425-436
 49. IEC 61508, (2003). Functional Safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems, Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale, Geneva.
 50. Ishikawa, K. & Iw, D. J., (1985). What is total quality control? Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall Inc (trans).
 51. Issa, R. I., (1986). Solution of the Implicitly Discretised Fluid Flow Equations by Operator-Splitting, J. Comput. Phys., Vol. 62, pp: 40-65.
 52. Jackson, J. D., (1995). Osborne Reynolds: scientist, engineer and pioneer, Proc. R. Soc. Lond. A, 451, pp: 49-86.
 53. Jang, D. S., Jetli, R. and Acharya, S. (1986). Comparison of the PISO, SIMPLER, and SIMPLEC Algorithms for the Treatment of the Pressure-Velocity Coupling in Steady Flow Problems, Numer. Heat Transfer, Vol. 19, pp: 209-228.
 54. Kaplan, S., (1981). On the quantitative definition of risk, Risk Analysis, Vol. 1(1), pp: 11-27.
 55. Karman T and Taylor G. I, (1938). Some remarks on the statistical theory of turbulence, Proc. 5th Int. Congr. Appl Mech., Cambridge, MA, 347.
 56. Kato, S., Murakami, S., Ohira, N., (1996). CFD analysis of thermal plume by means of $k-\epsilon$ model Summaries of Technical Papers of Annual Meeting. Architectural Institute of Japan, September, pp: 517-518.
 57. Kevorkian, J., (1993). Partial Differential Equations, Analytical Solution Techniques, 2nd Edition, Chapman & Hall, NYC.

58. Khan, I F., Abbasi, S. A., (1999). Major accidents in process industries and an analysis of causes and consequences, *Journal of Loss Prevention in the process industries*, 12, pp: 361-378.
59. Kletz, T. A., (1988). Piper Alpha: latest chapter in a long history. *The Chemical Engineer*, 4(July), 277.
60. Kobayashi, T., (1997). *Atlas of Visualization III*, CRC Press, Boca Raton, FL.
61. Kolmogorov, A. N., (1941a). The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds number, *Dokl Acad. Nauk. SSSR* 30, pp: 9-13.
62. Kolmogorov, A. N., (1941b). On degeneration (decay) of isotropic turbulence in an incompressible viscous liquid, *Dokl. Acad. Nauk. SSSR* 31, pp: 538-540.
63. Kolmogorov, A. N., (1941c). Dissipation of energy in locally isotropic turbulence, *Dokl Acad. Nauk. SSSR* 32, pp: 16-18.
64. Κοτρωτς, Patrick M.W., (2004). Accident precursors: proactive identification of safety risks in the chemical process industry, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven.
65. Koseki, H., Iwata, Yusaku, Natsume, Y., Takahashi, T., Nirano, T., (2000).
66. Tomakomai Large Scale Crude Oil Fire Experiments. *Fire Technology*, Vol 36, No. 1, pp: 24-38.
67. Kung, H., Stavrianidis, P., (1982). Buoyant plumes of large pool fires. 19th Symposium on Combustion.
68. Launder, B. E. and Spalding, D. B., (1972). *Lectures in Mathematical models of turbulence*, Academic Press, New York.
69. Launder, B. E. and Spalding, D. B., (1974). The Numerical Computation of Turbulent Flow, *Comput. Methods Appl Mech. Eng.*, Vol 3, pp: 269-289.
70. Lees, P. Frank, (1996). *Loss Prevention in the Process Industries, Hazard Identification, Assessment and Control*, Vol 1, 2, 3, 2nd Edition, Butterworth - Heinemann, Oxford.
71. Leonard, B. P. (1979). A stable and accurate convective modelling procedure based on Quadratic Upstream Interpolation, *Comput. Methods Appl Mech. Eng.*, vol 19, pp: 59-98.
72. Malin, M. R. and Spalding, D. B., (1984). Turbulence modelling for the prediction of external turbulent shear flows, CFDU Rep. CFD/84/5, CFDU, Imperial College, London.
73. Malin, M. R., (1983). Calculations of intermittency in self-preserving, free

- turbulent jets and wakes, CFDU Rep. CFD/83/10, CFDU, Imperial College, London.
74. March and McLennan, (1990). Large property losses in the hydrocarbon-chemical Industries: A thirty-year review (17 ed.). New York, USA: M & M Protection Consultants.
 75. March and McLennan, (2002). The 100 largest losses 1972-2001: large properties in the hydrocarbon-chemical industries. New York, USA: M & M Protection Consultants.
 76. Markatos, N. C. and Pericleous, K. A., (1984). *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol 27, No. 5, pp: 755-772.
 77. Markatos, N. C., (1985). The mathematical modelling of turbulent flows, *Appl Math. Modelling*, vol 10, June.
 78. Markatos, N. C., Malin, M. R., Cox, G., (1982). Mathematical modelling of buoyancy-induced smoke flow in enclosures. *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol 25, No. 1, pp: 63-75.
 79. McCaffrey, B., (1979). Purely buoyant diffusion flames - some experimental results. NBSIR 79-1910, National Bureau of Standards, Washington, 1979.
 80. McCaffrey, B., (1995). Flame height. *SFPE Handbook*, 2nd ed., National Fire Protection Association.
 81. McGrattan, K., B., (2003). Smoke Plume Trajectory Modeling, *Spill Science & Technology Bulletin*. vol 8, No. 4, pp: 367-372.
 82. McGrattan, K., B., Baum, R., H., (1999). Simulation of Oil Tank Fires. *Interflam '99. International Interflam Conference, 8th Proceedings*. vol 2., Edinburgh, Scotland, Interscience Communications Ltd., London, England, pp: 1117-1128.
 83. McGrattan, K., B., Trelles, J., Baum, R., H., (1999). Smoke Dispersion from Multiple Fire Plumes. *AIAA Journal*, vol 37, No. 12, pp: 1588-1601.
 84. Methods for the determination of Netherlands Organization of Applied Scientific Research TNO, CPR 16E, December.
 85. Miles, S., Kumar, S., Cox, G., (1997). The balcony spill plume - Some CFD simulations. *Fire Safety Science - Proceedings of Fifth International Symposium*, Tsukuba, Japan, pp: 237-247.
 86. Morton, BR, Taylor GI, Tumer JS, (1997). Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources. *Proc. Roy. Soc.*, 234A: 1-23.
 87. Mudan, S., K., (1984). Thermal radiation hazards from hydrocarbon pool fires.

- Prog. Energ. Combust. Sci., 10, pp: 59-80.
88. Nam, S., Bin, R. G., (1993). Numerical simulation of thermal plumes. J. Fire Safety, 21, pp: 231-256.
 89. North American Emergency Response Guidebook, (1996). Department of Transportation of USA, Canada and Mexico.
 90. Ohira, N., Kato, S., Murakami, S., (1998). CFD analysis of indoor air flow by WET model including wall damping effect. Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, September, pp: 685-686.
 91. Ohira, N., Kato, S., Murakami, S., (1998). Study on modified $\text{I}_0\text{-}\epsilon$ model applicable to stable and unstable flows due to buoyancy. J. Archit Plann Environ. Eng., 503, pp: 33-38.
 92. Pasman, H. J., Vrijling, J. κ., (2003). Social Risk Assessment of Large Technical Systems, Human Factors and Ergonomics in Manufacturing, Yo], 13 (4), pp: 305- 316.
 93. Pasquill, F., (1961). The Estimation of the Dispersion of Windborne Material, Meteorol Mag., 90: 33-49.
 94. Patankar, S. v. and Spalding, D. B., (1972). A calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-dimensional Parabolic Flows, Int. J. Heat Mass Transfer, vol 15, pp: 1787.
 95. Patankar, S. v., (1975). Numerical Prediction of Three-Dimensional Flows, in B. E. Launder (ed.), Studies in Convection: Theory, Measurement and Applications, vol 1, Academic, New York.
 96. Patankar, S. v., (1979). A Calculation Procedure for Two-Dimensional Elliptic Situations, Num. Heat Transfer, vol 2.
 97. Patankar, S. v., (1980). Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation, Taylor & Francis Group, New York.
 98. Persson, H., Lonnermark, A., (2004). Tank fires. SP Swedish National Testing and Research Institute, SP Report 2004: 14, Boras, Sweden.
 99. Peyret, R., and Taylor, T., (1983). Computational Methods for Fluid Flow, Springer- Verlag, New York, 1983.
 100. Quintiere, J. G., Grove, B., S., (1998). A unified analysis for fire plumes. 27th Symposium on Combustion, Boulder, CO, USA, pp: 2757-2766.
 101. Reynolds, O., (1894). On the dynamical theory of turbulent incompressible viscous fluid and the determination of the criterion, Phil Trans. R. Soc. London A 186, pp: 123-161.

102. Richardson, F. L., (1922). *Weather Prediction by Numerical Process*, Cambridge University Press.
103. Risk criteria for land-use planning in the vicinity of major industrial hazards, (1989) Health & Safety Executive - HSE.
104. Schaaf van der, T. W., (1992). Near miss reporting in the chemical process industry, Ph. D thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven.
105. Shrivastava, P., (1995a). Democratic control of technological risks in developing countries, *Ecological Economics*, 14, pp: 195-205.
106. Shrivastava, P., (1995b). Ecocentric management in industrial ecosystems: Management paradigm for a risk society, 20 (1), pp: 118-137.
107. Sinai, Y. I., Owens, M. P., (1995). Validation of CFD modelling of unconfined pool fires with crosswind: flame geometry. *Fire Safety J.*, 24, pp: 1- 34.
108. Small, D., R., (1991). Environmental impact of fires in Kuwait. *Nature*, Vol. 350, pp: 11-12.
109. Smit M.J.H., (1993). Systems to forecast the dispersion of chemical clouds, Workshop about chemical risks, Florival, 25 & 26 February.
110. Spalding D. B., (1980). Mathematical modeling of fluid-mechanics, heat-transfer and chemical-reaction processes, A Lecture Course, CFDU Report, HTS/80/1, Imperial College, London.
111. Spalding D. B., (1983). Chemical reaction in turbulent fluids, *Physico Chemical Hydrodyn*, 4 (4), 323-336.
112. Spalding, D. B. (1972). A novel finite-difference formulation for differential expressions involving both first and second derivatives, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol 4, pp: 551.
113. Suchman, E. A., (1961). A conceptual analysis of the accident problem, *Social Problems*, 8(3), pp: 241-246.
114. Szepesi, D. J., (1989). *Compendium of Regulatory Air Quality Simulation Models*, Akademiai Kiado, Budapest.
115. Tamanini, F., (1977). Reaction rates, air entrainment and radiation in turbulent fire plumes. *Combustion Flame*, 30, pp: 85-101.
116. *Technical Guidance for Hazards Analysis - Emergency Planning for Extremely Hazardous Substances*, (1987). U.S Environmental Protection Agency, Federal Emergency Management Agency, U.S Department of Transportation, December.
117. Tennekes, H., Lumley, J.L., -*A First Course in Turbulence*, MIT Press, 1972, pp

118. Thomas P.H., Baldwin R., Heselden, A.J.M., (1965). Buoyant diffusion flames: some measurements of air entrainment, heat transfer, and flame merging. 10th Symposium on Combustion, Cambridge, U.K., pp: 983-996.
119. Tumer, D. B., (1967). Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates, Public Health Service, Publication 999-AP-26. Robert A. Taft Sanitary Engineering Center, Cincinnati, Ohio.
120. Van Doornal, J. P. and Raithby, G. D., (1984). Enhancements of the SIMPLE Method for predicting Incompressible Fluid Flows, Numer. Heat Transfer, Vol. 7, pp: 147-163.
121. Van Leer, B. (1973). Towards the ultimate conservative difference scheme I. The quest of monotonicity, Lecture Notes in Physics, Vol. 8, pp: 163-168
122. Van Leer, B. (1974). Towards the ultimate conservative difference scheme II. Monotonicity and conservation combined in a second-order scheme, J. Comput. Phys., vol 14, pp: 361-370.
123. Van Leer, B. (1979). Towards the ultimate conservative difference scheme V. A second order sequel to Godunov's Method, J. Comput. Phys., Vol. 32, pp: 101-136.
124. Versteeg, H. K., Malalasekera, W., (1995). An introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, Longman Group Ltd, London.
125. Vilchez, J. A., Sevilla, S., Montiel, H., Casal, J., (1995). Historical analysis of accidents in chemical plants and in the transportation of hazardous materials, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 8(2), pp: 87-96.
126. Wells, G. L., Phang, C., Wardman, M., & Whetton, C., (1992). Incident scenarios: their identification and evaluation. Process Safety Environment, 70B, pp: 179.
127. www.cham.co.uk: Η ηλεκτρονική διεύθυνση της εταιρείας CHAM Ltd του υπολογιστικού κώδικα ρευστοδυναμικής PHOENICS.
128. Yakhot, v. and Orszag A. S., (1986). Renormalization Group Analysis of Turbulence. 1. Basic Theory, Journal of Scientific Computing, Vol 1, No. 1, pp: 3-51.
129. Yakhot, v. and Smith M. L., (1992). The Renormalization Group, the ϵ -Expansion and Derivation of Turbulence Models, Journal of Scientific Computing, vol 7, No. 1, pp: 35-61.

130. Yakhot, v., Orszag S. A., Thangam, S., Gatski, T. B. and Speziale C. O., (1992). Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique, *Phys. Fluids A* 4 (7), July, pp: 1510-1520.
131. Yokoi, S., (1960). Study of the prevention of fire-spread caused by hot upward stream, *BRI Report*, June.
132. You, H. J., Faeth, G. M., (1982). Fire combustion: buoyant symmetric turbulent diffusion flames in still air. *Combust. Flame*, 44, pp: 261.
133. Zukoski, E. E., Kubota, T., Cetegen B. M., (1980). Entrainment in fire plumes. *Fire Safety J.*, 81, 3, pp: 107-121.
134. Zukoski, E., E., (1995). Properties of fire plumes., *Combustion fundamentals of fire*. San Diego: Academic Press, pp: 34.
135. Αργυρόπουλος, Χ, Αναλυτής, Β., Θεοφανοπούλου, Γ, και Χατζηφώτης Ν., (2005). Μελέτη ροής σε διδιάστατο κανάλι με στένωση στην είσοδο, Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π, Αθήνα.
136. Αργυρόπουλος, Χ.Δ., «Αριθμητική προσομοίωση διασποράς τοξικών ρύπων από δεξαμενές διωλιστηρίων σε κατάσταση πυρκαγιάς και απραμετρική ανάλυση για διαφορετικά μεγέθη δεξαμενών», *Μεταπτυχιακή Εργασία*, Αθήνα (2008)
137. Γεωργιάδου, Εύη, (2001). Βιομηχανικά Ατυχήματα Μεγάλης Έκτασης, Μεθοδολογικός & Πληροφοριακός Οδηγός, 1 η Έκδοση, Ελληνικό Ινστιτούτο Υγιεινής και Ασφάλειας της Εργασίας, Αθήνα.
138. Δαϊκού, Α., Δοντάς, Σ., (2003). Αγγλοελληνικό - Ελληνοαγγλικό Λεξιλόγιο Όρων Βιομηχανικής Υγιεινής & Ασφάλειας, ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε., Αθήνα.
139. Δοντάς, Σ., (2001). Επικίνδυνες Χημικές Ουσίες και Βιομηχανικά Ατυχήματα Μεγάλης Έκτασης (BAME), ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε., Αθήνα.
140. Δώρα Ξενίδου, (2005). Σημειώσεις από παρουσίαση Δ.Π.Μ.Σ. «Υπολογιστική Ρευστομηχανική» , Το λογισμικό PHOENICS, " Μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών και Όγκων Ελέγχου", Υπολογιστικές Μέθοδοι σε Τυρβώδεις Ροές, Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π, Αθήνα.
141. Ε.Λ.Δ.Α. (1993). Μελέτη επικινδυνότητας για τις εγκαταστάσεις των Ε.Λ.Δ.Α στον Ασπρόπυργο και Μέγαρα Αττικής, 30 Ιουλίου.
142. Θεϊόπουλος, Ι Αναστάσιος, Πλοίαρχος Β' Ε.Ν, (1996). Προχωρημένη εκπαίδευση στην καταπολέμηση της πυρκαγιάς, Εκδόσεις Ναυτικών και

Τεχνικών Βιβλίων Εμμανουήλ Ν. Σταυριδάκη, Πειραιάς.

143. Κεφαλάς, Δ., (2004). Μελέτη επιπτώσεων ατυχήματος - Φωτιάς σε υπαίθρια αποθήκη φυτοφαρμάκων, Διπλωματική Εργασία, Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π, Αθήνα.
144. Κουρنيώτης Π Ευστάθιος, (2001). Ανάλυση Επικινδυνότητας Βιομηχανικών Ατυχημάτων - Ανάπτυξη Υπολογιστικών Συστημάτων Διαχείρισης Κρίσεων, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα.
145. Κωνσταντίνου, Μ., Νιβολιανίτου, Ζ., (2003). Στατιστική Ανάλυση «Μεγάλων Ατυχημάτων» Πετροχημικής Βιομηχανίας της Ευρωπαϊκής Βάσης Δεδομένων MARS για την χρονική περίοδο 1985 - 2000, Πρακτικά 40^{ου} Συνεδρίου Χημικής Μηχανικής, Πάτρα.
146. Κώνστας, Π. Α., (1998). Εφαρμοσμένη Πυρασφάλεια, Αθήνα.
147. Λεμονίδης Ι, (1994). Ειδικές Ομάδες Διάσωσης, Πυρκαϊές, Σεισμοί, Καταστροφές. Εκδόσεις University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
148. Λεμονίδης, Π., (2003). Αριθμητική προσομοίωση διασποράς βιομηχανικών οσμηρών ουσιών από πολλαπλές βιομηχανικές καμινάδες - Πιλοτική εφαρμογή σε μονάδα τεχνητής ξυλείας, Διπλωματική Εργασία, Μονάδα Υπολογιστικής & Ρευστοδυναμικής, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π
149. Λόης Ε., (1992). Σημειώσεις θεωρίας και τεχνικής της καύσης. Αθήνα, Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα.
150. Μαρκάτος, Χ. Ν. (Ε.Μ.Π), Ζωγράφος, Κ. (Ο.ΠΑ), Ζιώμας, Ι (Α.Π.Θ), (1999). Σχεδιασμός Αντιμετώπισης Τεχνολογικών Ατυχημάτων Μεγάλης Έκτασης στο Θριάσιο Πεδίο, Αθήνα.
151. Μαρκάτος, Χ. Ν. και Ασημακόπουλος Δ., (1995). Υπολογιστική Ρευστοδυναμική, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
152. Μαρκάτος, Χ. Ν., (1988). Υπολογιστική Ρευστομηχανική, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
153. Μαρκάτος, Χ. Ν., (1998). Τυρβώδη Φαινόμενα Μεταφοράς και Μαθηματικά Πρότυπα Προσομοίωσής τους, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π, Αθήνα.
154. Μουσιόπουλος, Ν., (1997). Μοντέλα ποιότητας ατμόσφαιρας σε αστικές περιοχές, Κεφ. 10 στα «Μαθηματικά Μοντέλα Ατμοσφαιρικής Ρύπανση», Επιμέλεια Μουσιόπουλος Ν., Εκδόσεις Π. Ζήτη & Σία Ο.Ε, Θεσσαλονίκη.
155. Μπαρκούτσος Π.Κ., (2012). «Μαθηματική Προσομοίωση Διασποράς Τοξικών Ουσιών σε Περίπτωση Πυρκαγιάς σε Εγκαταστάσεις Αποθήκευσης Φυτοπροστατευτικών Προϊόντων». Διπλωματική Εργασία, Μονάδα

Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2012

156. Μπαρτζής, Γ. Ι, (1997). Μοντέλα ατμοσφαιρικής διασποράς για ρυθμιστικούς σκοπούς, Κεφ. 20 στα «Μαθηματικά Μοντέλα Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης», Επιμέλεια Μουσιόπουλος Ν., Εκδόσεις Π. Ζήτη & Σία Ο.Ε, Θεσσαλονίκη .
157. Μπεργελές, Γ. Χ, (1999). Υπολογιστική Ρευστοδυναμική, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
158. Παπαϊωάννου, Θ. Α., (2002). Μηχανική των Ρευστών, Τόμος ΙΙ, Β' έκδοση, Εκδόσεις Κοράλι, Αθήνα.
159. Πετρόλα, (1997). Μελέτη Ασφάλειας, Τόμος ΙΙ, Αθήνα.
160. Ρήγας, Φ., (2004). Αναγνώριση Κινδύνων. Στις Βιομηχανίες Διεργασιών με χρήση πολυμέσων (multimedia). Λογισμικό Hazard Spotting του ICHEME, ΕΜΠ, Αθήνα.
161. Σαπουντζάκη Κ., «Το αύριο εν κινδύνω. Φυσικές και τεχνολογικές καταστροφές στην Ευρώπη και την Ελλάδα.», Εκδ. Gutenberg, Αθήνα 2007
162. Σελλούντος, Β., Παπαϊωάννου, Γ., Πέρδιος, Στ., Χουσιανάκος, Κ., (1988). Πυρασφάλεια, Εφαρμογές πυροπροστασίας και στοιχεία πυρόσβεσης, Εκδόσεις Φοίβος, Αθήνα.
163. Σιδερός, Γ., «Μαθηματική προσομοίωση διασποράς ρύπων από πυρκαγιά σε παοθήκες τοξικών ουσιών . Διερεύνηση της επίδρασης γεωμετρίας κτιρίου και θέσης ανοιγμάτων εξόδου αερίων», Διπλωματική εργασία, Αθήνα (2002)
164. Στουρνάς Σ., Λόης Ε., Ζανίκος Φ., (2002). Τεχνολογία Καυσίμων και Λιπαντικών. Εκδόσεις Ε.Μ.π., Αθήνα.
165. Τσιώκου Ελένη, (2003). Προσομοίωση διασποράς οσμηρών ουσιών από σημειακές και εμβαδικές πηγές σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις τεχνητής ξυλείας, Μεταπτυχιακή Εργασία, Δ.π.Μ.Σ Υπολογιστική Μηχανική, Μονάδα Υπολογιστικής ς Ρευστοδυναμικής, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
166. Χαλουλάκου, Α., (2005). Σχεδιασμός Εγκαταστάσεων Αντιρρύπανσης, Επεξεργασία Αιωρούμενων Σωματιδίων και Αερίων Αποβλήτων. Σημειώσεις παραδόσεων, Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα.
167. Χριστόλης, Μ., (1996). Αξιολόγηση Μελετών Ασφαλείας Εγκαταστάσεως Φυτοφαρμάκων - Μεθοδολογική Προσέγγιση, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Μονάδα Υπολογιστικής ς Ρευστοδυναμικής, Ε.Μ.Π., Αθήνα.