



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΜΟΝΑΔΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΤΟΞΙΚΩΝ ΡΥΠΩΝ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ
ΕΠΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΑΠΟ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΣΕ
ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΟΔΗΓΙΑΣ
SEVESO II.



ΧΡΗΣΤΟΣ Δ. ΑΡΓΥΡΟΠΟΥΛΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Ν. Χ. ΜΑΡΚΑΤΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2006

Αφιερώνεται στους γονείς μου, Δημήτρη και Αντωνία, που με τις προσωπικές τους θυσίες και στερήσεις, την αστείρευτη αγάπη και πίστη τους, κατάφεραν να μεγαλώσουν έναν «*άνθρωπο*» με ιδανικά, αξίες και φιλοδοξίες.

Σας ευχαριστώ ...

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ο σύγχρονος πολιτισμός δίνει απεριόριστες δυνατότητες για ένα σωρό διαπιστώσεις και κρίσεις. Για πολλούς πρωτοφανείς εμπειρίες που προκαλούν το θαυμασμό, αλλά και το δέος τους, γίνονται αιτία για αυτάρεσκες διαπιστώσεις, αλλά και για προβληματισμό, για αισιόδοξες προβλέψεις, μα και για νοσταλγικές αναπολήσεις των περασμένων.

Παλιότερα η διαδικασία μετάβασης από τη μια εποχή στη άλλη γινόταν σχετικά αργά και με σταθερούς ρυθμούς. Από τις αρχές όμως του 20ου αιώνα και ύστερα οι ρυθμοί αυτοί επιταχύνθηκαν, μεταβλήθηκαν σε ραγδαία εξέλιξη, σε απότομη μεταβολή. Μέσα σε λίγες δεκαετίες άλλαξε ριζικά η μορφή του κόσμου. Η αλλαγή αυτή οφείλεται στην εκπληκτική πρόοδο της επιστήμης.

Με την υπερβολική επίδοση του ανθρώπου, κατά τους νεότερους χρόνους στις λεγόμενες θετικές επιστήμες παρατηρήθηκε ανάλογη δεσπόζουσα ανάπτυξη της τεχνολογίας. Ειδικότερα σήμερα, η παρουσία της τεχνολογίας είναι τόσο διευρυμένη και έντονη που πολύ σωστά από πολλούς γίνεται λόγος για «μηχανοποιημένη ζωή».

Έπειτα το κύρος της επιστήμης στηρίζεται στην προσφορά της προς τον άνθρωπο. Αν η επιστήμη σήμερα έχει γίνει ένας κοινός όρος απόλυτα κατανοητός, όχι μόνο από τους μύστες της, αλλά και από τους απλούς και χωρίς καμιά ειδική γνώση ανθρώπους, αυτό οφείλεται στα συγκεκριμένα δημιουργήματα στα οποία μετατρέπονται τα πορίσματά της. Η επιστήμη, τείνει να ταυτιστεί με την τεχνολογία. Και αυτό, γιατί η ολοκληρωμένη, η τέλεια γνώση δεν μπορεί να νοηθεί χωρίς την πράξη, χωρίς την δημιουργία. Γνώση και πράξη προϋποθέτουν, αλλά και ελέγχουν η μια την άλλη. Η επιστήμη θα εξεταστεί από τη δημιουργία, αλλά και αυτή, με τη σειρά της, θα υποβληθεί στον έλεγχο της επιστήμης, της πλουτισμένης από τα δεδομένα της εμπειρίας. «Επιστήμη για την επιστήμη» δεν εννοείται. Επιστήμη χωρίς τη δημιουργία είναι αφηρημένη κατασκευή, χωρίς συγκεκριμένο περιεχόμενο.

Όσο μεγάλη και αν είναι η προσφορά τόσο της επιστήμης όσο και της τεχνολογίας, άλλο τόσο μεγάλη είναι και τα προβλήματα που προκάλεσαν εξαιτίας της ξέφρενης ανάπτυξής τους. Και αυτό, γιατί η επιστήμη και η τεχνολογία με την αποτελεσματικότητά τους στράφηκαν ενάντια στον άνθρωπο. Έτσι έχουμε τεράστια προβλήματα στην εποχή μας, όπως είναι η μόλυνση του περιβάλλοντος, ο κίνδυνος πυρηνικού ολέθρου, αποδυνάμωση της κριτικής ικανότητας του ανθρώπου, κ.α.

Φαίνεται να έχουν τόσο άμεση σχέση με την επιστήμη και την τεχνολογία, ώστε μερικοί ανεπιφύλακτα υποστηρίζουν πως εκπορεύονται κιόλας απ' αυτήν.

Ένα από τα αρνητικά της ξέφρενης ανάπτυξης και βιομηχανοποίησης της εποχής μας είναι τα βιομηχανικά ατυχήματα. Κάθε χρόνο σ' όλο τον κόσμο γίνονται χιλιάδες εργατικά ατυχήματα που στοιχίζουν σε απώλειες ανθρώπινου δυναμικού, στην οικονομία και στο περιβάλλον.

Το βιομηχανικό ατύχημα που έγινε στις 24 Φεβρουαρίου 1986, στο Καλοχώρι της Θεσσαλονίκης, καθώς και το πρόσφατο ατύχημα στο Buncefield Oil Storage Depots στο Hertfordshire της Αγγλίας στις 11 Δεκεμβρίου 2005 επιβεβαιώνει ακόμη μια φορά ότι παρόλο τις μεγάλες αλλαγές που έχουν γίνει στην ασφάλεια των βιομηχανικών εγκαταστάσεων κανείς δεν μπορεί να πει με σιγουριά ότι όλα τα μέτρα που έχουν παρθεί είναι αρκετά ή ότι σε ένα νέο ατύχημα θα μπορέσουν να ανταπεξέλθουν.

Επομένως η ανάγκη χρησιμοποίησης νέων τεχνικών πρόβλεψης αλλά και μείωσης της επικινδυνότητας για βιομηχανικά ατυχήματα είναι επιτακτική και αναγκαία. Στον Ελλαδικό χώρο, απαντήσεις σε πολλά τέτοιου είδους προβλήματα δίνουν το Εργαστήριο Αξιοπιστίας Συστημάτων και Βιομηχανικής Ασφάλειας του ΕΚΕΦΕ ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ, καθώς και η Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής του Τμήματος Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην πραγματοποίηση της εργασίας αυτής και συγκεκριμένα :

- Τον επιβλέποντα της Διπλωματικής μου εργασίας τον Καθηγητή, τ. Πρύτανη και Πρόεδρο της Σχολής Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π, κ. Νίκο Μαρκάτο. Για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου για την ανάθεση του θέματος της Διπλωματικής εργασίας, καθώς και για τη συνεχή του καθοδήγηση σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της Διπλωματικής μου εργασίας.
- Τον κ Μιχάλη Χριστόλη, Πολιτικό Μηχανικό, DEA, και Υποψήφιο Διδάκτορα. Για την ακούραστη και συνεχή καθοδήγηση του σε όλη την διάρκεια της Διπλωματικής μου εργασίας. Επίσης για την ευχάριστη και εποικοδομητική συνεργασία, καθώς και για το χρόνο που αφιέρωσε για απαντήσεις, εξηγήσεις και

διδασκαλία σε εμένα προσωπικά. Η συμβολή του ήταν μεγάλης σημασίας και καθοριστική για την ολοκλήρωση της Διπλωματικής εργασίας.

- Την κα. Ζωή Νιβολιανίτου, Ερευνήτρια του Εργαστηρίου Αξιοπιστίας Συστημάτων και Βιομηχανικής Ασφάλειας του ΕΚΕΦΕ ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ για τις συμβουλές και διορθώσεις κατά τη διάρκεια της Διπλωματικής εργασίας.
- Τους κ. Αργύρη Πολίτη, Χημικό Μηχανικό, DIC, MSc., Υποψήφιο Διδάκτορα και τον κ. Γιώργο Σιδερή, Χημικό Μηχανικό, MSc., Υποψήφιο Διδάκτορα, για τις συμβουλές και διορθώσεις τους. Καθώς και για τη συνεχή καθοδήγησή τους σε θέματα υπολογιστικού κώδικα.
- Τον κ. Γιώργο Μουζάκη, Χημικό Μηχανικό, ΥΠΕΧΩΔΕ, για την άριστη συνεργασία και για τη παροχή πληροφοριών που ήταν καθοριστικές για την πραγματοποίηση της εργασίας.
- Τον κ. Νίκο Μπάλση, Χημικό Μηχανικό/Υποπυραγό, και το Αρχηγείο της Πυροσβεστικής Υπηρεσίας, για την άριστη συνεργασία και ανταλλαγή πληροφοριών σχετικά με το βιομηχανικό ατύχημα στο Καλοχώρι της Θεσσαλονίκης.
- Όλα τα μέλη της Μονάδας Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής για τη βοήθεια και συμπαράσταση τους κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της Διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τον αδερφό μου καθώς και τους φίλους μου για την βοήθεια και συμπαράστασή τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Αθήνα 30/10/2006

Χρήστος Δ. Αργυρόπουλος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία έχει σαν σκοπό την προσομοίωση διασποράς τοξικών ρύπων και εκτίμηση επιπτώσεων στο περιβάλλον από πυρκαγιές σε δεξαμενές καυσίμων. Σχεδόν σε όλες τις χημικές βιομηχανίες και κυρίως στα διυλιστήρια υπάρχει αρκετός αριθμός τέτοιων δεξαμενών, οι οποίες κάτω από ορισμένες συνθήκες μπορούν να προκαλέσουν ατύχημα. Οι αρνητικές επιπτώσεις ενός τέτοιου ατυχήματος συνήθως προέρχονται από την διασπορά των ρύπων και στη συγκεκριμένη περίπτωση εξετάζεται η διασπορά καπνού και SO₂ από τα προϊόντα καύσης του καυσίμου της δεξαμενής.

Αρχικά γίνεται μια προσπάθεια σύνδεσης των B.A.M.E με την υπολογιστική ρευστοδυναμική (CFD) και στη συνέχεια ακολουθεί περιγραφή των βασικών εννοιών για τα μεγάλα βιομηχανικά ατυχήματα. Έπειτα γίνεται αναφορά σε δύο από τα μεγαλύτερα βιομηχανικά ατυχήματα που έχουν διαδραματίσει ιδιαίτερο λόγο για τη θέσπιση μέτρων για μεγάλα βιομηχανικά ατυχήματα, αυτά είναι του Bhopal και της Pasadena. Ύστερα παρουσιάζεται μια στατιστική μελέτη των B.A.M.E καθώς και οι επιπτώσεις τους μαζί με το νομοθετικό πλαίσιο που ισχύει στην Ελλάδα αυτή τη στιγμή.

Παράλληλα αναφέρονται βασικές έννοιες για τη φωτιά, τον καπνό, τα σωματίδια και τα καυσαέρια μαζί με μια στατιστική μελέτη ατυχημάτων φωτιάς σε δεξαμενές αποθήκευσης καυσίμων. Έπειτα παρουσιάζεται το ατύχημα της Jet Oil στο Καλοχώρι Θεσσαλονίκης το 1986 που αποτελεί και το σενάριο ατυχήματος για την προσομοίωσή μας. Επιπρόσθετα δίνεται και μια περιγραφή του ατυχήματος στο Buncefield στη Μεγάλη Βρετανία, όπου έλαβε χώρα κατά τη διάρκεια εκπόνησης της Διπλωματικής εργασίας.

Εν συνεχεία παρουσιάζεται η δομή του Ατμοσφαιρικού Οριακού Στρώματος (Α.Ο.Σ) καθώς και τα μοντέλα διασποράς που έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς. Ενώ παράλληλα περιγράφονται οι ατμοσφαιρικές συνθήκες καθώς και οι παραδοχές που θα γίνουν προκειμένου να γίνει η αριθμητική προσομοίωση του προβλήματος.

Έπειτα παρουσιάζεται η δομή του φυσικού προβλήματος και πιο συγκεκριμένα η γεωμετρία του μαζί με το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει τις εξισώσεις του προβλήματος καθώς και τις οριακές συνθήκες τους. Ενώ ταυτόχρονα γίνεται μια ιστορική αναδρομή στην τύρβη και στη μοντελοποίησή της.

Στη συνέχεια ακολουθεί η αριθμητική μέθοδος επίλυσης με αναφορά στη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων ελέγχου (F.V.M), στα σχήματα διακριτοποίησης, στον αλγόριθμο επίλυσης και φυσικά στη μέθοδο σύγκλισης του προβλήματος.

Ταυτόχρονα αναπτύσσεται το αριθμητικό μοντέλο με την μεθοδολογία υπολογισμού του ρυθμού καύσης, την επιλογή του κατάλληλου πλέγματος και την ανεξαρτησία του πλέγματος από τη λύση. Έπειτα ακολουθεί η παραμετρική ανάλυση και η συζήτηση των αποτελεσμάτων του προβλήματος προκειμένου να βγουν κρίσιμα συμπεράσματα για τη μελέτη του φαινομένου. Εν συνεχεία με τα διαγράμματα συγκεντρώσεων της παραμετρικής ανάλυσης γίνεται προσπάθεια εκτίμησης των επιπτώσεων του καπνού και του SO₂ κοντά και μακριά από την πηγή.

Τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παραμετρική ανάλυση και την βιβλιογραφία καθώς και οι προτάσεις για μελλοντικές εργασίες.

Ολοκληρώνοντας, το χειρότερο σενάριο που προκύπτει από τα ευρήματα της αριθμητική προσομοίωσης είναι η περίπτωση μικρής σε θερμότητα έκλυσης πηγής με πολύ δυνατό άνεμο διότι η συγκεκριμένη περίπτωση εμφάνισε τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ρύπων τόσο κοντά όσο και μακριά από την πηγή. Έπειτα είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η μελέτη του φαινομένου είναι σε πολύ αρχικό στάδιο και θα έπρεπε να αφιερωθεί επιπλέον έρευνα για τη μελέτη του. Έτσι προτείνεται μια πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση του θέματος με περισσότερα και πιο αξιόπιστα στοιχεία τόσο μετεωρολογικά όσο και σε θέματα καύσης. Ενώ παράλληλα η δοκιμή πιο αξιόπιστων μοντέλων τύρβης όπως το LES ή το VLES θα έδιναν μια καλύτερη προσέγγιση του θέματος.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<u>Κεφάλαιο 1^ο</u>	1
1. Εισαγωγή	2
1.1. Σύνδεση BAME και Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (CFD)	2
1.2. Αντικείμενο μελέτης της εργασίας	4
<u>Κεφάλαιο 2^ο</u>	5
2. Βιομηχανικά Ατυχήματα Μεγάλης Έκτασης (B.A.M.E)	6
2.1. Βασικές έννοιες	6
2.2. Μοντέλα περιγραφής διαδικασίας ενός ατυχήματος	11
2.3. Bhopal και Pasadena	14
2.3.1. Bhopal	14
2.3.2. Pasadena	15
2.4. Στατιστική και ιστορική μελέτη βιομηχανικών ατυχημάτων μεγάλης έκτασης	16
2.5. Επιπτώσεις B.A.M.E	20
2.6. Ζώνες προστατευτικών δράσεων	23
2.7. Νομοθεσία	25
<u>Κεφάλαιο 3^ο</u>	26
3. Βιομηχανικά Ατυχήματα Φωτιάς σε Δεξαμενές Αποθήκευσης Καυσίμων	27
3.1. Βασικές έννοιες για καύση, φωτιά και καύσιμα	27
3.2. Βασικές έννοιες για καπνό και σωματίδια	32
3.3. Στατιστική ανάλυση ατυχημάτων φωτιάς σε δεξαμενές αποθήκευσης καυσίμων	35
3.4. Εγκαταστάσεις MAMIDOIL JET OIL A.E, Καλοχώρι Θεσσαλονίκης	39
3.4.1. Περιγραφή ατυχήματος	39

3.4.2.	Ανάλυση των παραμέτρων του ατυχήματος	41
3.4.2.1.	Το περιβάλλον της εγκατάστασης	42
3.4.2.2.	Η εγκατάσταση	42
3.4.2.3.	Τα υλικά καύσης	43
3.4.2.4.	Περιβαλλοντικές συνθήκες και επιπτώσεις από το ατύχημα	48
3.5.	Buncefield Oil Storage Depots, Hertfordshire, U.K.	48
3.5.1.	Περιγραφή ατυχήματος	50
3.5.2.	Ανάλυση των παραμέτρων του ατυχήματος	52
3.5.2.1.	Διαρροή (υπερχείλιση) και δημιουργία νέφους ατμών καυσίμου	53
3.5.2.2.	Συμπεριφορά καυσίμου κατά τη διάρκεια της υπερχείλισης	55
3.5.2.3.	Περιβαλλοντικές συνθήκες	56
<u>Κεφάλαιο 4^ο</u>		57
4.	Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα (Α.Ο.Σ)	58
4.1.	Εισαγωγή	58
4.2.	Δομή Ατμοσφαιρικού Οριακού Στρώματος (Α.Ο.Σ)	59
4.2.1.	Εισαγωγή	59
4.2.2.	Αναμειγμένο στρώμα (convective mixed layer)	60
4.3.	Κλάσεις ευστάθειας Α.Ο.Σ	61
4.4.	Μοντέλα ποιότητας ατμόσφαιρας	63
4.4.1.	Εισαγωγή	63
4.4.2.	Κατηγορίες μοντέλων διασποράς	64
4.4.2.1.	Εμπειρικά μοντέλα	65
4.4.2.2.	Τα Οϋλεριανά μοντέλα	66
4.4.2.3.	Τα Λαγκρανζιανά μοντέλα	66
4.4.3.	Συμπεράσματα	67
4.5.	Σημασία του Α.Ο.Σ	67

<u>Κεφάλαιο 5^ο</u>	69
5. Φυσικό Πρόβλημα	70
5.1. Εισαγωγή	70
5.2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση	70
5.3. Γεωμετρία	73
5.3.1. Εισαγωγή	73
5.3.2. Γεωμετρία πεδίου ροής χώρου προσομοίωσης	73
5.3.3. Γεωμετρία δεξαμενής	75
5.3.4. Γεωμετρία όρου πηγής ρύπων	76
<u>Κεφάλαιο 6^ο</u>	77
6. Μαθηματικό Μοντέλο	78
6.1. Θεμελιώδεις Διαφορικές Εξισώσεις	78
6.2. Εξισώσεις προβλήματος	79
6.3. Οριακές συνθήκες προβλήματος	84
6.4. Τύρβη	87
6.4.1. Εισαγωγή	87
6.4.2. Ιστορική αναδρομή των ερευνών για τη τύρβη	87
6.4.3. Ορισμοί – κύρια χαρακτηριστικά τύρβης	88
6.5. Μοντελοποίηση τύρβης	91
6.5.1. Εισαγωγή	91
6.5.2. Το μοντέλο $k\sim\epsilon$	94
6.5.3. Το μοντέλο RNG derived $k\sim\epsilon$	95
<u>Κεφάλαιο 7^ο</u>	96
7. Αριθμητική Μέθοδος Επίλυσης	97
7.1. Μέθοδος πεπερασμένων όγκων ελέγχου (FVM)	97
7.2. Μαθηματική ανάλυση μεθόδου	99
7.2.1. Ολοκληρωτική μορφή της εξίσωσης μεταφοράς	99

7.2.2. Περιγραφή διαδικασίας επίλυσης	100
7.3. Αλγόριθμος επίλυσης	105
7.3.1 Εισαγωγή	105
7.3.2 Αλγόριθμος SIMPLEST	106
7.3.3 Συμπεράσματα	107
7.4. Οι 4 βασικοί κανόνες	108
7.5. Τεχνικές υποχαλάρωσης	110
7.5.1. Γραμμική υποχαλάρωση	110
7.5.2. Υποχαλάρωση ψευδούς χρονικού βήματος	111
7.6. Σύγκλιση	111
<u>Κεφάλαιο 8^ο</u>	113
8. Ανάπτυξη αριθμητικού μοντέλου	114
8.1. Υπολογισμός ρυθμού καύσης και ο εκθετικός νόμος για την εξάρτηση της ταχύτητας με το ύψος	114
8.2. Πεδίο ροής και υπολογιστικό πλέγμα	116
8.3. Μελέτη ανεξαρτησίας της λύση από το πλέγμα	118
<u>Κεφάλαιο 9^ο</u>	123
9. Παραμετρικές εφαρμογές – Συζήτηση αποτελεσμάτων	124
9.1. Εισαγωγή	124
9.2. Παραμετρικές εφαρμογές	124
9.2.1. Περίπτωση (1) – $Q=0.20 \text{ MW/m}^2$ και $U= 8 \text{ m/s}$	125
9.2.2. Περίπτωση (2) – $Q=0.20 \text{ MW/m}^2$ και $U= 5 \text{ m/s}$	127
9.2.3. Περίπτωση (3) – $Q=0.50 \text{ MW/m}^2$ και $U= 8 \text{ m/s}$	129
9.2.4. Περίπτωση (4) – $Q=0.50 \text{ MW/m}^2$ και $U= 5 \text{ m/s}$	132
9.2.5. Περίπτωση (5) – $Q=0.70 \text{ MW/m}^2$ και $U= 8 \text{ m/s}$	134
9.2.6. Περίπτωση (6) – $Q=0.70 \text{ MW/m}^2$ και $U= 5 \text{ m/s}$	136
9.3. Επιπτώσεις από τον καπνό	138
9.3.1. Εισαγωγή	138
9.3.2. Παραμετρικές εφαρμογές	141

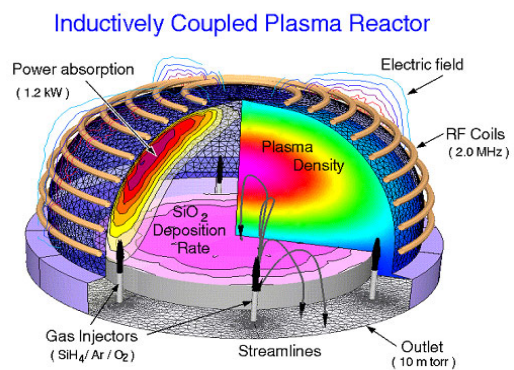
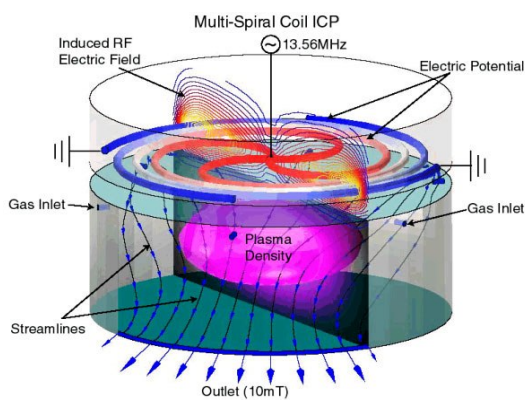
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

9.3.2.1.	Περίπτωση (1) – $Q=0.20 \text{ MW/m}^2$ και $U= 8 \text{ m/s}$	141
9.3.2.2.	Περίπτωση (3) – $Q=0.50 \text{ MW/m}^2$ και $U= 8 \text{ m/s}$	143
9.3.2.3.	Περίπτωση (5) – $Q=0.70 \text{ MW/m}^2$ και $U= 8 \text{ m/s}$	144
9.4.	Επιπτώσεις από το SO_2	146
9.4.1.	Εισαγωγή	146
9.4.2.	Παραμετρικές εφαρμογές	146
9.4.2.1.	Περίπτωση (1) – $Q=0.20 \text{ MW/m}^2$ και $U= 8 \text{ m/s}$	146
9.4.2.2.	Περίπτωση (3) – $Q=0.50 \text{ MW/m}^2$ και $U= 8 \text{ m/s}$	148
9.4.2.3.	Περίπτωση (5) – $Q=0.70 \text{ MW/m}^2$ και $U= 8 \text{ m/s}$	149
9.5.	Σύγκριση παραμετρικών	151
9.6.	Αξιολόγηση μεθόδου και αποτελεσμάτων	153
<u>Κεφάλαιο 10^ο</u>		154
10.	Συμπεράσματα	155
<u>Κεφάλαιο 11^ο</u>		159
11.	Προτάσεις για μελλοντικές εργασίες	160
<u>Κεφάλαιο 12^ο</u>		162
12.	Βιβλιογραφία	163
<u>Παραρτήματα</u>		176
Παράρτημα Ι		
Παράρτημα ΙΙ		

1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο **Κεφάλαιο 1** γίνεται μια γενική εισαγωγή για τη χρήση της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (*Computer Fluid Dynamics*) στο βιομηχανικό πεδίο, καθώς και στη συνεισφορά της στην αποτροπή και πρόβλεψη Βιομηχανικών Ατυχημάτων Μεγάλης Έκτασης (BAME). Τέλος παρουσιάζεται το αντικείμενο μελέτης της παρούσας Διπλωματικής εργασίας.



Εικόνες 1-1, 1-2 : Προσομοίωση αντιδραστήρων για τη σωστή και ασφαλή λειτουργία τους.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σύνδεση BAME και Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (CFD)

Αρκετοί αναλυτές όπως ο Beck (*Beck, 1992*) υποστηρίζουν ότι ζούμε σε μια κοινωνία πολλών κινδύνων και έντονης επικινδυνότητας, που επεκτείνεται σ' όλες τις φάσεις της ζωής μας. Το τεχνολογικό και κοινωνικοοικονομικό σύστημα στο οποίο ζούμε και μέσω αυτού παράγουμε, καταναλώνουμε, μεταφέρουμε αγαθά κ.α., συνδέονται άμεσα με αυξημένη επικινδυνότητα (*Shrivastava, 1995a*).

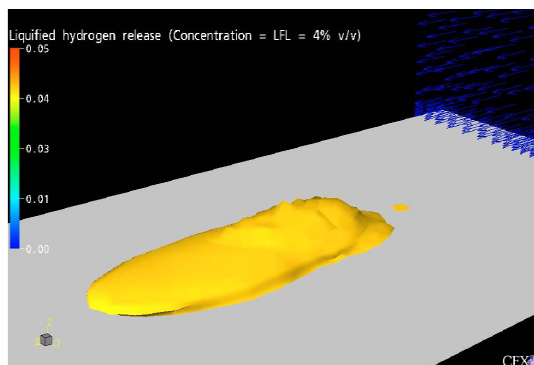
Εντούτοις, η σημερινή κοινωνία με τη συνεχή πληροφόρηση και ενημέρωση για ατυχήματα και κινδύνους, που ελλοχεύουν μπορεί να δημιουργήσει ένα τοίχος προστασίας. Έτσι αξιοποιώντας νέες προκλήσεις μαθαίνει ταυτόχρονα να ζει με τους κινδύνους και να τους αντιμετωπίζει.

Τα τελευταία 40 χρόνια έχει δημιουργηθεί μια έντονη βιομηχανοποίηση στις αναπτυγμένες χώρες. Αυτή η ανάπτυξη έφερε νέες τεχνολογίες, νέα προϊόντα, νέες θέσεις εργασίας, καλύτερες συνθήκες ζωής, καλύτερο βιοτικό επίπεδο, γρήγορες μεταφορές και σύγχρονες τηλεπικοινωνίες. Σήμερα αυτές οι χώρες αποτελούν τα μεγάλα βιομηχανικά κέντρα, για παράδειγμα η Ινδία είναι η έκτη μεγαλύτερη βιομηχανική οικονομία στο κόσμο, και παράγουν σύνθετα και επικίνδυνα προϊόντα όπως πυρομαχικά, διάφορα φαρμακευτικά είδη, αλλά και ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης. Τα εργοστάσια πυρηνικής ενέργειας και πετροχημικά ανήκουν επίσης σε αυτή την κατηγορία (*Shrivastava, 1995b*).

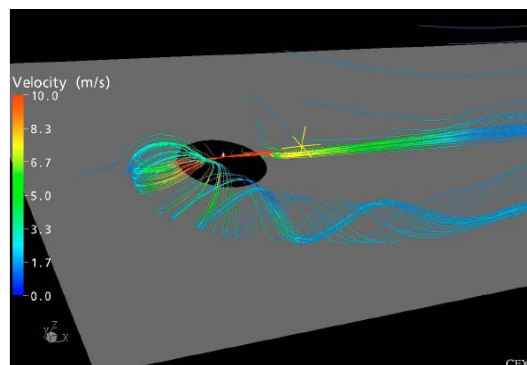
Αυτή η συνεχόμενη πρόοδος, ωστόσο συνοδεύεται με αύξηση του τεχνολογικού κινδύνου και της επικινδυνότητας. Με αποτέλεσμα να έχουμε πολλά ατυχήματα με υλικές, οικονομικές και ανθρώπινες απώλειες, μόλυνση του περιβάλλοντος, αρρώστιες και τοξικά απόβλητα.

Γίνεται ως εκτούτω απ' όλους κατανοητό ότι η εκτίμηση των επιπτώσεων ενός ατυχήματος παίζει καθοριστικό ρόλο στην ασφάλεια του κοινωνικού συνόλου. Για το σκοπό αυτό έρχεται μεταξύ των άλλων και η επιστήμη της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, όπου με τα διάφορα υπολογιστικά μοντέλα και τις τεχνικές προσομοίωσης μπορεί να δώσει σοβαρές και με καλή ακρίβεια απαντήσεις για την εξέλιξη των φαινομένων που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια ενός ατυχήματος, όπως για παράδειγμα έκρηξη, απελευθέρωση τοξικών ουσιών, φωτιά κ.ο.κ.

Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics) είναι η ανάλυση συστημάτων στα οποία συμβαίνει ροή ρευστών, φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και φαινόμενα που έχουν σχέση με προσομοίωση χημικών αντιδράσεων.



Εικόνα 1-3: Διασπορά τοξικών υγρών



Εικόνα 1-4: Διασπορά τοξικών αερίων

Οι παραπάνω (*Εικόνες 1-3, 1-4*) δείχνουν εφαρμογές της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής στη μοντελοποίηση διασποράς τοξικών υγρών και αερίων. Επιπλέον, οι σύγχρονες ερευνητικές απαιτήσεις έχουν επεκτείνει την εφαρμογή των υπολογιστικών μεθόδων, προσομοίωσης στο πεδίο μελέτης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που αναπτύσσονται γύρω από το χώρο όπου γίνεται ένα βιομηχανικό ατύχημα.

Τέλος η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική έχει κάποια μοναδικά πλεονεκτήματα, όπου μερικά από αυτά αναφέρονται παρακάτω (*Versteeg and Malalasekera, 1995*) :

- Μείωση του χρόνου και του κόστους σχεδίασης.
- Η ικανότητα να μελετηθούν συστήματα όπου με ελεγχόμενα πειράματα είναι δύσκολο ή και αδύνατον να μελετηθούν (π.χ. πιλοτικές εφαρμογές).
- Η ικανότητα να μελετηθούν συστήματα κάτω από επικίνδυνες συνθήκες και να δοκιμαστούν οι αντοχές των ορίων τους (π.χ. μελέτες ασφαλείας και σενάρια ατυχημάτων).
- Πρακτικά απεριόριστο επίπεδο λεπτομερειακών αποτελεσμάτων.

Η χρησιμοποίηση των κωδικών Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής στην προσομοίωση διασποράς πυκνού αερίου, π.χ. μαύρος καπνός, είναι πλέον η καλύτερη λύση τέτοιων προβλημάτων διότι υπερέχουν σε σύγκριση με τα απλούστερα

ημειπειρικά μοντέλα, αφού έχουν την ικανότητα να προσομοιώνουν πολύπλοκα φαινόμενα όπως η τύρβη, ενώ παρέχουν τη δυνατότητα ακριβούς κατασκευής και απεικόνισης της γεωμετρίας του επιθυμητού πεδίου, προσεγγίζοντας σε μεγάλο βαθμό τις πραγματικές συνθήκες.

1.2 Αντικείμενο μελέτης της εργασίας

Η παρούσα Διπλωματική εργασία έχει σαν κύριο σκοπό την μελέτη του φαινομένου προσομοίωσης διασποράς τοξικών ρύπων καθώς και την εκτίμηση επιπτώσεων στο περιβάλλον σύμφωνα με την οδηγία Seveso II πάνω από πυρκαγιές δεξαμενών καυσίμων. Γίνεται εμπεριστατωμένη αναφορά πάνω σε μεγάλα βιομηχανικά ατυχήματα ενώ παράλληλα γίνεται προσπάθεια για διαλεύκανση των αιτιών που τα προκάλεσαν σύμφωνα πάντα με βιβλιογραφικές πηγές. Επίσης έγινε μεγάλη προσπάθεια προκειμένου να αναλυθεί και να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα ως προς την προσομοίωση του πλουμίου τόσο βιβλιογραφικός όσο και σε επίπεδο προσομοίωσης, παρόλο που σε πολλές περιπτώσεις δεν υπήρχαν αρκετά στοιχεία.

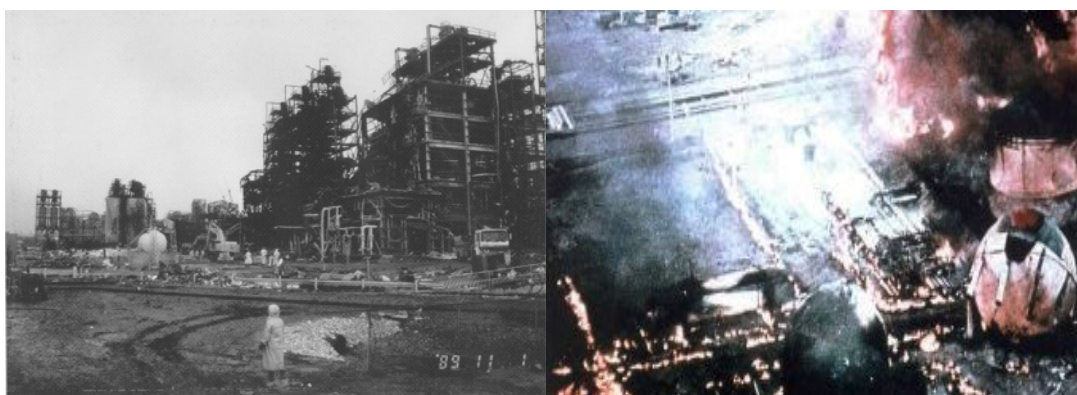
Έπειτα έγινε εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη διασπορά ρύπων καπνού και SO₂ σύμφωνα με τα γενικευμένα διαγράμματα που παρήχθησαν από την αριθμητική επίλυση του πεδίου ροής.

Τέλος για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν υπολογιστικές μέθοδοι προσομοίωσης και ανάλυσης καθώς και υπολογιστικά μοντέλα ευρέως χρησιμοποιούμενα από τη Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π και συγκεκριμένα το λογισμικό **PHOENICS** της εταιρείας **CHAM Ltd**.

2

ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ (Β.ΑΜ.Ε)

Στο Κεφάλαιο 2 αρχικά γίνεται μια εισαγωγή στις βασικές έννοιες που υπάρχουν πάνω σε Βιομηχανικά Ατυχήματα. Εν συνεχεία γίνεται περιγραφή των πιο σημαντικών μοντέλων περιγραφής ενός ατυχήματος και ακολουθεί αναφορά στα Μεγάλα Βιομηχανικά ατυχήματα στο Bhopal και στην Pasadena. Έπειτα γίνεται στατιστική ανάλυση Βιομηχανικών Ατυχημάτων Μεγάλης Έκτασης με τη συλλογή στοιχείων από Βάσεις Δεδομένων και βιβλιογραφικά στοιχεία. Τέλος περιγράφονται οι επιπτώσεις των ΒΑΜΕ και το νομοθετικό πλαίσιο που υπάρχει στην Ελλάδα πάνω στη Βιομηχανική Ασφάλεια.



Εικόνες 2-1, 2-2: Βιομηχανικά ατυχήματα στη Pasadena και στο Feyzin.

2. ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ ΜΕΓΑΛΗΣ ΕΚΤΑΣΗΣ (BAME)

2.1 Βασικές έννοιες

Πριν την αναφορά και ανάλυση Μεγάλων 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 απώτερους, 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 (BAME)**

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 BAME 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 et al., 1999*).

➔ **Ασφάλεια και Επικινδυνότητα (Safety and Risk)**

Η δήλωση ενός ορισμού της λέξης ασφάλειας (Safety) δεν είναι και ότι πιο εύκολο γιατί η έννοια δεν είναι προφανής, 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 (*IEC 61508, 2000*), και καθορίζουν τον κίνδυνο ως τον συνδυασμό της πιθανότητας εμφάνισης του περιστατικού και της δριμύτητας 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 (*Suchman, 1961*) 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 προσδοκούμενου
- ➔ Ο βαθμός του αναπόφευκτου
- ➔ Ο βαθμός του απρομελέτητου

Επιπλέον έχει θέσει και κάποια 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 κατάστασεως.

Υπάρχουν πολλοί και ποικίλοι ορισμοί για την **επικινδυνότητα** και η έννοια που 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 συνανθρώπους του. Ενώ κατά τη διάρκεια που οδηγεί κάποιος, ασφάλεια σημαίνει να οδηγεί χωρίς να έχει ανάμειξη σε ένα ατύχημα αυτοκινήτων.

Στην παρούσα εργασία ο όρος ασφάλεια θα αναφέρεται στο πλαίσιο που χαρακτηρίζει τις πετροχημικές βιομηχανίες, οι οποίες διαχειρίζονται επικίνδυνες ουσίες.

Τέλος είναι σημαντικό να ορίσουμε και τον όρο «**ασφάλεια διαδικασίας**» (**Process Safety**) σύμφωνα με τον οποίο ονομάζουμε την απουσία περιστατικών

κινδύνου κατά τις διάφορες δραστηριότητες επεξεργασίας των επικίνδυνων ουσιών (Körvers, 2004).

➤ **Ατυχήματα, συμβάντα και παρ' ολίγον ατυχήματα (Accidents, incidents & near miss accidents).**

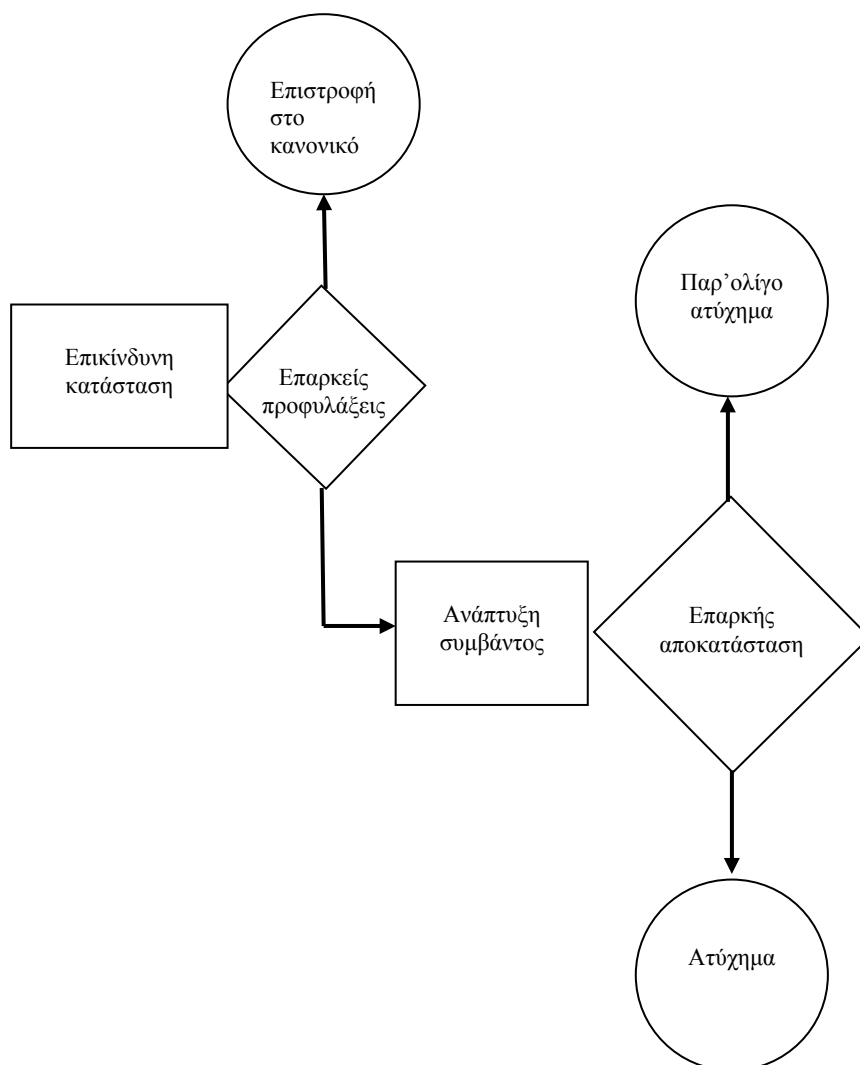
Η έννοια του ατυχήματος και του συμβάντος χρησιμοποιούνται στον τομέα της βιομηχανικής ασφάλειας σχεδόν με κοινή σημασία, γι' αυτό είναι σημαντικό να γίνει ένας διαχωρισμός αυτών των δύο εννοιών προκειμένου να γίνουν κατανοητοί.

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 μια σειρά 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 2-1**, (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 2-1** απεικονίζει ότι ένας οργανισμός μπορεί να αποφύγει επικίνδυνες καταστάσεις που μπορούν να αναπτυχθούν σε ατύχημα αν πάρει 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.



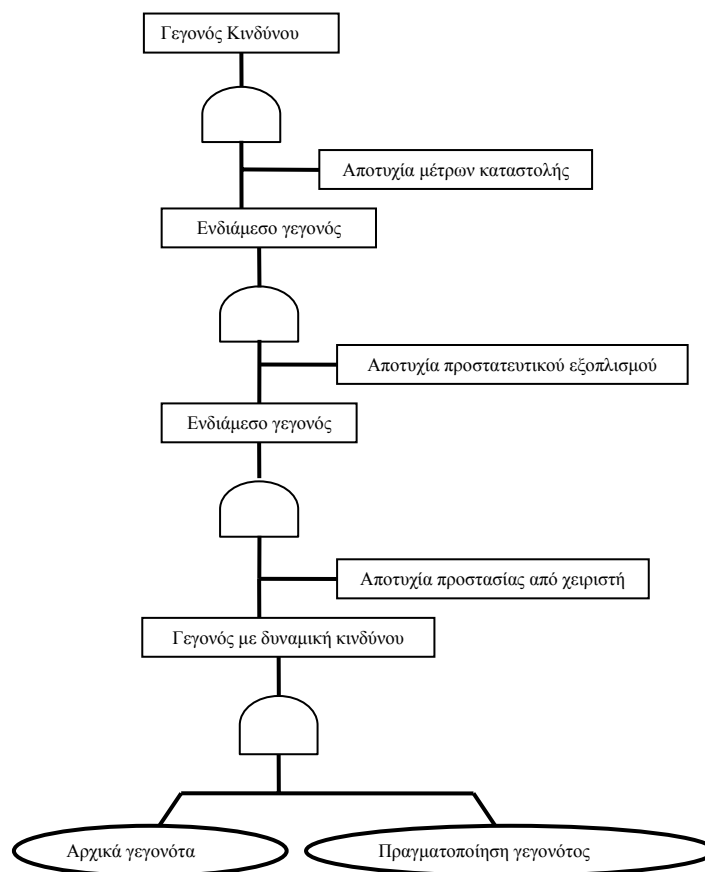
Σχήμα 2-1: Ένα μοντέλο περιγραφής συμβάντων, ατυχημάτων και παρ' ολίγον ατυχημάτων, van der Schaaf (Schaaf van der, 1992).

2.2 Μοντέλα περιγραφής διαδικασίας ενός ατυχήματος

Συνήθως στη έρευνα για την ασφάλεια δίνεται μεγάλη σημασία στην μοντελοποίηση της διαδικασίας του ατυχήματος, έτσι ώστε να γίνονται καλύτερα κατανοητοί οι παράγοντες που προκάλεσαν το ατύχημα και οι προφυλάξεις στις οποίες μπορούμε να πάρουμε προκειμένου να αποφύγουμε το ατύχημα. Ένας τύπος μοντέλου σύμφωνα με τον Houston (Houston, 1971) είναι το κλασσικό μοντέλο που αναπτύχθηκε από δικηγόρους και ασφαλιστές το οποίο επικεντρώνεται στην «πρωταρχική αιτία» του ατυχήματος. Επίσης είναι γνωστό ότι πολλοί παράγοντες συνεισφέρουν σε ένα ατύχημα, αλλά για πρακτικούς και ειδικότερα για νομικούς

λόγους αναγνωρίζεται ως μία βασική αιτία που προκάλεσε το ατύχημα. Αυτή η άποψη έχει κάποιο αριθμό λαθών, δηλαδή δεν υπάρχει αντικειμενικό κριτήριο για να χαρακτηριστεί η βασική αιτία, και οι σχέσεις μεταξύ των αιτιών δεν εξηγούνται, ενώ ταυτόχρονα δεν υπάρχει τρόπος που να δείχνει ότι η λίστα των αιτιών του ατυχήματος είναι πλήρης.

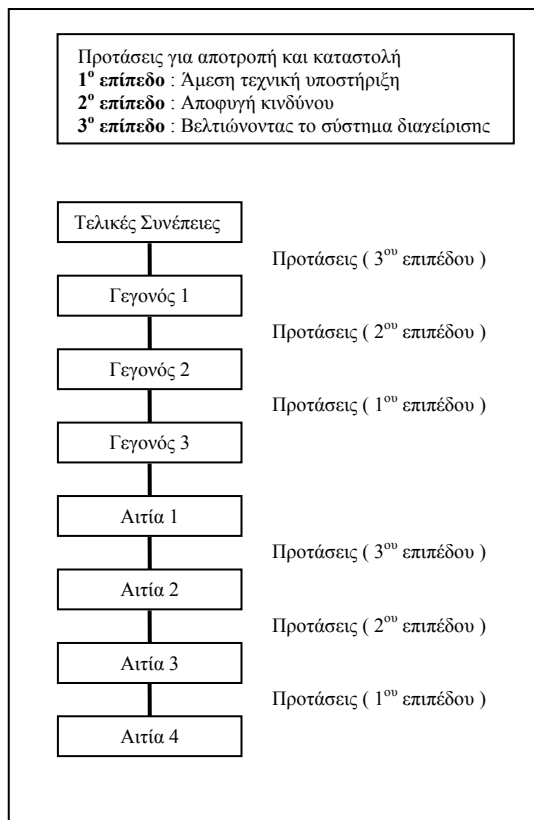
Ένας άλλος τύπος μοντέλου περιγραφής διαδικασίας ατυχήματος



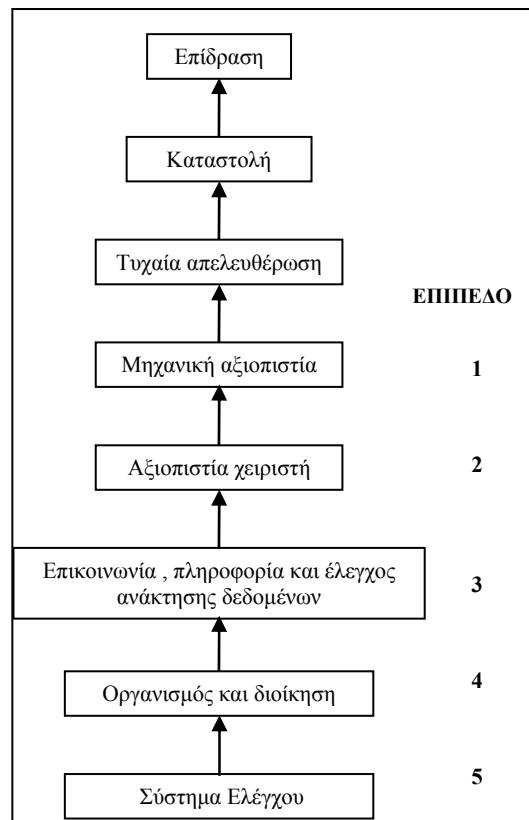
Σχήμα 2-2: Το μοντέλο ατυχήματος διάγραμμα δέντρου

είναι τα «δέντρα γεγονότων». Ένα απλό μοντέλο «δέντρο γεγονότων» ενός ατυχήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-2. Το αρχικό γεγονός το οποίο αποτελεί μια δυναμική για να συμβεί ένα ατύχημα, με την προϋπόθεση βέβαια ότι κάποια γεγονότα θα συμβούν ή ότι έχουν ήδη συμβεί.

Τα δέντρα γεγονότων χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των πιθανών διαδρομών πρόκλησης ατυχημάτων και την ποσοτικοποίηση αυτών με την εκτίμηση της πιθανότητας να ακολουθηθεί μια συγκεκριμένη διαδρομή. Σύμφωνα με τον Κουρνιώτη (Κουρνιώτης, 2001) η χρήση τους έχει ως αντικειμενικό σκοπό τον προσδιορισμό των πιθανών αστοχιών και, τελικά, την μείωση της επικινδυνότητας της λειτουργίας των τεχνολογικών συστημάτων μέσω της πρόληψης. Ένα όμοιο μοντέλο βασισμένο σε δέντρο γεγονότων προτάθηκε από τους (Wells et al., 1992). Μια άλλη άποψη για τη μοντελοποίηση της διαδικασίας ενός ατυχήματος είναι αυτή του Kletz (Kletz, 1988), ο οποίος ανέπτυξε ένα μοντέλο το οποίο οροθετήθηκε παράλληλα με την έρευνα ατυχημάτων. Το μοντέλο στηρίζεται σε μια σειρά αποφάσεων και πράξεων η οποία οδηγεί σε ατύχημα, ενώ παράλληλα δείχνει σε κάθε στάδιο τις προτάσεις οι οποίες προκύπτουν από την έρευνα Σχήμα 2-3.



Σχήμα 2-3: Μοντέλο ατυχήματος του Kletz.



Σχήμα 2-4: Μοντέλο ατυχήματος Geyer και Bellamy (Geyer and Bellamy, 1991).

Ένα μοντέλο το οποίο έδωσε έμφαση στο διευρυμένο, κοινωνικοτεχνικό επίπεδο γνώσης για τα ατυχήματα, αναπτύχθηκε από τους Geyer και Bellamy (*Geyer and Bellamy, 1991*) και παρουσιάζεται στο *Σχήμα 2-4*. Περιγράφεται ένα γενικό μοντέλο και η εφαρμογή του μοντέλου στην περίπτωση ενός συμβάντος. Τα επίπεδα ιεραρχίας του μοντέλου αναφέρονται παρακάτω:

- **Επίπεδο 1 – Μηχανική αξιοπιστία.**
- **Επίπεδο 2 – Αξιοπιστία χειριστή.**
- **Επίπεδο 3 – Επικοινωνία, πληροφορία και έλεγχος ανάκτησης δεδομένων.**
- **Επίπεδο 4 – Οργανισμός και διοίκηση.**
- **Επίπεδο 5 – Σύστημα ελέγχου.**

2.3 Bhopal και Pasadena

Μετά από την αναφορά και την περιγραφή των βασικότερων εννοιών και μοντέλων περιγραφής ατυχημάτων. Στην συγκεκριμένη ενότητα θα γίνει εκτεταμένη αναφορά σε δύο μεγάλα βιομηχανικά ατυχήματα. Αυτά είναι το ατύχημα στη χημική βιομηχανία στο Bhopal της Ινδίας, της εταιρίας Union Carbide, το δεύτερο ατύχημα είναι στη χημική βιομηχανία Phillips στη Pasadena κοντά στο Houston του Τέξας στις Η.Π.Α.

2.3.1 Bhopal

Το μεγαλύτερο βιομηχανικό ατύχημα στην ιστορία της ανθρωπότητας έγινε το Δεκέμβρη του 1984 στο Bhopal της Ινδίας (*Εικόνες 2-3,2-4*). Θεωρείται η μεγαλύτερη ακούσια ανθρωπογενής καταστροφή, που το μέγεθος της ξεπέρασε ακόμα και το πυρηνικό ατύχημα στο Τσέρνομπιλ το 1986.



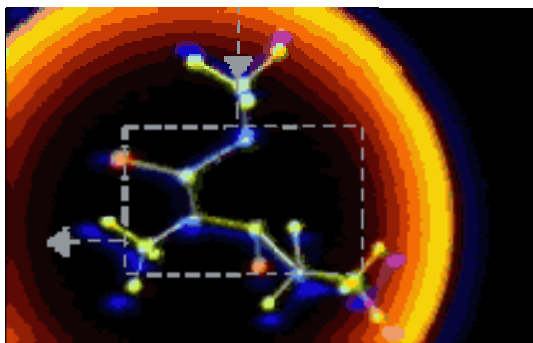
Εικόνα 2-3: Οι εγκαταστάσεις του εργοστασίου στο οποίο έγινε το ατύχημα.



Εικόνα 2-4: Οι εγκαταστάσεις του εργοστασίου στο οποίο έγινε το ατύχημα.

Τις πρωινές ώρες της 3 Δεκεμβρίου του 1984, υπήρξε αέρια διαρροή από τη δεξαμενή αποθήκευσης 610 η οποία περιείχε νερό, καταλύτη και 42 τόνους μεθυλικού ισοκυανίου (MIC) στη χημική βιομηχανία της εταιρείας Union Carbide India Ltd. Η διαρροή αερίου ήταν αποτέλεσμα μιας εξώθερμης αντίδρασης (*πολυμερισμός MIC, Εικόνα 2-5*) που έγινε μεταξύ του νερού και των υπολοίπων υλικών που υπήρχαν μέσα στη δεξαμενή.

Έτσι η πίεση που δημιουργήθηκε από τα αέρια παράγωγα της αντίδρασης είχε σαν αποτέλεσμα να ανοίξει η βαλβίδα ασφαλείας και να διασκορπιστεί στην ατμόσφαιρα (Εικόνα 2-6), (Bisarya and Puri, 2005).



Εικόνα 2-5: Φαίνεται η εξώθερμη αντίδραση πολυμερισμού του MIC.



Εικόνα 2-6: Η απελευθέρωση του τοξικού αερίου από την βαλβίδα ασφαλείας.

Ένα νέφος με μεγάλη ποσότητα αερίου MIC άρχισε να εξαπλώνεται στη γύρω περιοχή του εργοστασίου όπου υπήρχαν σπίτια και οικισμοί με αποτέλεσμα να πεθάνουν σύμφωνα με την Ινδική Κυβέρνηση, προσμετρώντας και τις απώλειες δύο χρόνων μετά από το ατύχημα σε 1754 ανθρώπους. Το 1989 το νούμερο αυτό αυξήθηκε σε 3150 και μέχρι το 1994 σε 4000. Ωστόσο το νούμερο των ανθρωπίνων απωλειών έχει μεγάλες διακυμάνσεις και αυτό οφείλεται στο χάος που επικρατούσε εκείνες τις ημέρες αλλά και στις διαφορετικές απόψεις που υπάρχουν από γιατρούς και διάφορες οργανώσεις. Επιπλέον σύμφωνα με τον Dr Nagu, υπεύθυνο του κέντρου υγείας στο Bhopal, οι άνθρωποι που νοσηλεύτηκαν ήταν περίπου 170,000. Μερικοί από αυτούς περίπου οι 130,000 νοσηλεύτηκαν με προβλήματα στους πνεύμονες και στα μάτια και οι υπόλοιποι 40,000 με προβλήματα σε 22 διαφορετικές περιοχές του ανθρώπινου σώματος. Γύρω στους 12,000 από τους 170,000 ήταν σε πολύ κρίσιμη κατάσταση και κάποιοι από αυτούς πέθαναν (Lees, 1996).

2.3.2 Pasadena

Αμέσως μετά τη 1:00 μμ στις 23 Οκτωβρίου του 1989 μια μαζική έκρηξη ήταν η αιτία καταστροφής του εργοστασίου πολυαιθυλενίου της εταιρείας Phillips 66, στο Τέξας του Χιούστον όπου πάνω από 85,200 λίμπρες εύφλεκτου υλικού απελευθερώθηκαν στιγμιαία στην ατμόσφαιρα (Lees, 1996). Έτσι ως συνέπεια, είχε

την ανάπτυξη ενός νέφους ατμών το οποίο αναφλέχτηκε σε λιγότερο από δύο λεπτά. Μετά από την αρχική έκρηξη ακολούθησαν και άλλες.

Η αρχική έκρηξη σύμφωνα με τους σειсмоγράφους του Πανεπιστημίου του Rise στο Χιούστον, καταγράφηκε ως σεισμός μεγέθους 3 με 4 βαθμούς της κλίμακας ρίχτερ. Ενώ σύμφωνα με την τεχνική αναφορά της OSHA υπολογίστηκε ως έκρηξη 2,4 τόνων ισοδύναμου TNT. Ο απολογισμός τους ατυχήματος ήταν 23 νεκροί και 314 τραυματίες. Τα οικονομικά κόστη αρχικά είχαν υπολογιστεί σε 715 εκατομμύρια δολάρια , ενώ οι απώλειες λόγω διακοπής της λειτουργίας της επιχείρησης ήταν εξίσου σημαντικές και ανέρχονταν σε 700 εκατομμύρια δολάρια (*FEMA technical report, 1998*).

Η αιτία του ατυχήματος δεν είναι αποσαφηνισμένη, το μόνο που είναι γνωστό είναι ότι οφείλεται σε ανθρώπινο ή ελαττωματικό μηχανολογικό εξοπλισμό. Σύμφωνα όμως με την τεχνική έκθεση της FEMA (*FEMA technical report, 1998*) το ατύχημα οφείλεται σε βλάβη στη γραμμή παραγωγής ή σε βαλβίδα που μετέφερε αιθυλένιο ή βουτάνιο υψηλής πίεσης. Τέλος στο *Παράρτημα I* στο τέλος της εργασίας παρατίθενται εικόνες του ατυχήματος.

2.4 Στατιστική και ιστορική μελέτη βιομηχανικών ατυχημάτων μεγάλης έκτασης

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 πηγές 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 αντιμετώπισής 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 19^{ου} αιώνα έως τον Ιούλιο 1992. Το δείγμα της έρευνας περιλαμβάνει 5325 ατυχήματα.

Τα αποτελέσματα της έρευνας των Vilchez et al (*Vilchez et al., 1995*) επιβεβαιώνονται από όμοια αποτελέσματα που έχουν εξαχθεί από άλλες έρευνες όπως των Hastrup και Brockhoff (*Haastrup 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. Επομένως είναι παράξενο ότι δεν υπάρχει μια γενικότερη νομική προσέγγιση, παρόμοια με την οδηγία Σεβέζο, για τη μεταφορά επικίνδυνων υλικών, παρόλο που έχουν θεσπιστεί εθνικοί και διεθνείς κανονισμοί.

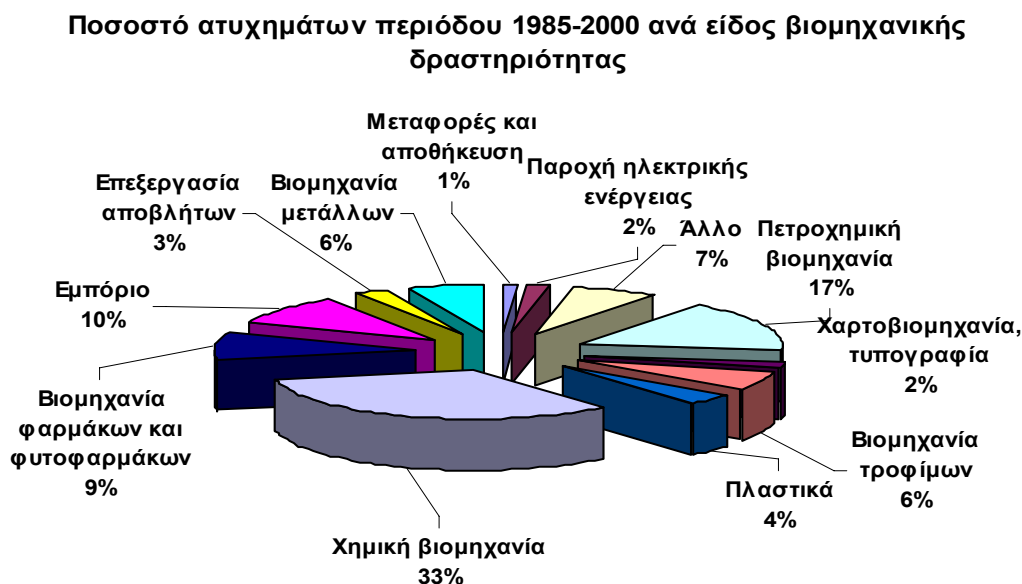
Επίσης η έρευνα έδειξε ότι ένα μεγάλο ποσοστό ατυχημάτων (66%) συμβαίνει σε περιοχές με υψηλό πληθυσμό. Και αυτό θα συνεχίσει να ισχύει αφού τα περισσότερα εργοστάσια είναι φτιαγμένα κοντά σε περιοχές με μεγάλο πληθυσμό. Έτσι γίνεται κατανοητή η σημασία των σχεδίων αντιμετώπισης μεγάλων βιομηχανικών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

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

Η έρευνα των Κωνσταντινίδου και Νιβολιανίτου (*Κωνσταντινίδου και Νιβολιανίτου, 2003*) αναφέρεται στη στατιστική ανάλυση μεγάλων ατυχημάτων πετροχημικής βιομηχανίας της ευρωπαϊκής βάσης δεδομένων MARS για τη χρονική περίοδο 1985-2000.

Από την ανάλυση των δεδομένων γίνεται μια παρουσίαση της κατανομής των μεγάλων ατυχημάτων της περιόδου 1985-2000 ανά κατηγορία βιομηχανικής απασχόλησης. Η χημική βιομηχανία καταλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό ατυχημάτων με 33% ενώ ακολουθεί με 17% η πετροχημική βιομηχανία. Μικρότερα

ποσοστά παρουσιάζουν η χαρτοβιομηχανία και η βιομηχανία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας με 2% **Σχήμα 2-5**. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι δεν σημαίνει ότι σε αυτού του είδους τις βιομηχανίες δεν σημειώνονται ατυχήματα. Ατυχήματα συμβαίνουν απλά δεν ανήκουν στην κατηγορία των μεγάλων ατυχημάτων.



Σχήμα 2-5 : Ποσοστό ατυχημάτων περιόδου 1985-2000 ανά είδος βιομηχανικής δραστηριότητας (Κωνσταντινίδου και Νιβολιανίτου, 2003).

Μερικά σημαντικά συμπεράσματα από τη στατιστική ανάλυση των δεδομένων αναφέρονται παρακάτω. Στον Ευρωπαϊκό χώρο το μεγαλύτερο αριθμό μεγάλων ατυχημάτων τον έχει η Μεγάλη Βρετανία, ενώ τα ατυχήματα που λαμβάνουν χώρα στη Πετροχημική βιομηχανία αποτελούν το 17% του συνόλου. Επίσης σημαντικό είναι ότι το 47% των μεγάλων ατυχημάτων οφείλονται σε αστοχία εξοπλισμού ενώ 36% οφείλονται ολικά ή εν μέρει σε ανθρώπινο λάθος. Τέλος η σύγκριση των ατυχημάτων, όπως αυτά προκύπτουν από μελέτες ασφαλείας στα Ελληνικά Δωλίστήρια, και τα οποία αποτελούν πρόβλημα, με τα Ευρωπαϊκά μεγάλα ατυχήματα, που είναι ήδη καταγεγραμμένα, έδειξε ότι οι φωτιές πιθανολογούνται με μεγαλύτερο ποσοστό (89%) για τον Ελληνικό χώρο έναντι (52%) καταγεγραμμένων για τον Ευρωπαϊκό, ενώ οι εκρήξεις προβλέπονται πολύ μικρότερες στην Ελλάδα (4%) έναντι του μεγάλου καταγεγραμμένου ποσοστού (26%) στην Ευρώπη.

Τέλος στην έρευνα των Khan και Abbasi (*Khan and Abbasi, 1999*) γίνεται μελέτη των βιομηχανικών ατυχημάτων προκειμένου να προσδιοριστούν οι παράγοντες που

οδηγούν στα ατυχήματα αλλά και για την πρόληψη απωλειών. Το δείγμα της έρευνας καλύπτεται από 3222 ατυχήματα που έχουν βρεθεί από την βιβλιογραφία και περιλαμβάνουν την περίοδο 1926 έως 1997. Τα ατυχήματα σχετίζονται με χειρισμό, μεταφορά, επεξεργασία και αποθήκευση χημικών ουσιών και ζημιές που ξεπερνούν το ένα εκατομμύριο δολάρια.

Από την έρευνα προκύπτει ότι από τα 3222 ατυχήματα το 54% αποτελούν τα ατυχήματα εγκαταστάσεων, ακολουθούν με 41% τα ατυχήματα πάνω σε μεταφορές και με 5% άλλου είδους ατυχήματα. Επίσης από τα 1744 ατυχήματα εγκαταστάσεων, οι βιομηχανίες χημικών διεργασιών είναι περισσότερο επιρρεπείς σε μεγάλα ατυχήματα και με κύριο χημικό συστατικό πρόκλησης ατυχήματος την αμμωνία. Έπειτα από τα 1744 ατυχήματα εγκαταστάσεων τα 441 (25%) περιλαμβάνουν φωτιές και εκρήξεις και τα 1247 (71%) περιλαμβάνουν απελευθέρωση τοξικών. Το υπόλοιπο 4% περιλαμβάνει συνδυασμό φωτιάς, έκρηξης και απελευθέρωσης τοξικών. Τέλος από την έρευνα των Khan και Abbasi (*Khan and Abbasi, 1999*) εξάγεται ότι το μεγαλύτερο ατύχημα σε χημική βιομηχανία που περιλαμβάνει απελευθέρωση τοξικών έγινε στο Bhopal το 1984. Ενώ το χειρότερο ατύχημα που περιλαμβάνει φωτιά και έκρηξη συνέβη στο Μεξικό την ίδια χρονιά με το ατύχημα στο Bhopal και το αντίστοιχο παράκτιο ατύχημα που έγινε ήταν στον Piper Alpha το 1988.

Αν συγκρίνουμε τις έρευνες μεταξύ τους θα δούμε ότι εκτός από κάποια διαφορετικά κριτήρια στα οποία ταξινομούνται τα ατυχήματα για την στατιστική τους ανάλυση, δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές στα αποτελέσματα. Για παράδειγμα στην έρευνα των Vilchez et al (*Vilchez et al., 1995*) το ποσοστό των ατυχημάτων που λαμβάνουν χώρα αποτελούν το 39% ενώ στην έρευνα των Khan και Abbasi (*Khan and Abbasi, 1999*) το ποσοστό αποτελεί το 41% , έτσι αποδεικνύεται ότι τα ποσοστά αλληλοεπιβεβαιώνονται. Το ίδιο ισχύει και για το ποσοστό των ατυχημάτων που συμβαίνουν σε εγκαταστάσεις με αντίστοιχα ποσοστά 54% και 42% που δεν έχουν ιδιαίτερη διαφορά μεταξύ τους. Επίσης τόσο στην έρευνα των Κωνσταντινίδου και Νιβολιανίτου (*Κωνσταντινίδου και Νιβολιανίτου, 2003*) η κύρια ουσία που προκάλεσε μεγάλο ατύχημα στις πετροχημικές βιομηχανίες ήταν εύφλεκτη και αποτελεί ποσοστό 60% ενώ στην έρευνα των Vilchez et al (*Vilchez et al., 1995*) το ποσοστό είναι περίπου στο 70%, παρόλο που περιέχει και άλλες βιομηχανίες εκτός των πετροχημικών. Έτσι γίνεται προφανές και στις δύο εργασίες παρότι διαφέρουν, ότι κατά μεγάλο ποσοστό η κύρια ουσία που δημιουργεί το ατύχημα είναι κυρίως εύφλεκτη.

Τα ποσοστά των παραπάνω εργασιών διαφέρουν κυρίως για το λόγο ότι τα δείγματα της στατιστικής ανάλυσης δεν είναι ίδια αριθμητικά οπότε είναι λογικό να υπάρχουν κάποιες μικροδιαφορές. Παρόλο αυτά γίνεται κατανοητό ότι η στατιστική ανάλυση που έγινε και στις τρεις έρευνες δείχνει αρκετές ομοιότητες σε κάποια κριτήρια μελέτης, που αλληλοεπιβεβαιώνουν τα αποτελέσματά τους ακόμα και αν το δείγμα ατυχημάτων είναι αριθμητικά διαφορετικό.

2.5 Επιπτώσεις B.A.M.E

Οι επιπτώσεις των BAME μπορούν να διακριθούν σύμφωνα με τις βλάβες που προκαλούν στον άνθρωπο. Έτσι οι επικίνδυνοι παράγοντες ταξινομούνται στις ακόλουθες κατηγορίες :

- Θερμική ακτινοβολία και υπολογίζεται ως θερμική ροή σε σχέση με την απόσταση από την πηγή (KW/m^2).
- Ωστικό κύμα και 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 διακίνδευσης. 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. Εδώ γίνεται αναφορά πιο συγκεκριμένα στο φαινόμενο της εισπνοής τοξικής ουσίας.

➔ 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 της έκθεσης σε min

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 υπολογίζεται από το όριο IDLH (1/10) (*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*). Στην παρούσα προσέγγιση ο προσδιορισμός γίνεται έμμεσα από το IDLH, και καθορίζεται ίσο με το δεκαπλάσιο της τιμής IDLH για την ίδια τοξική ουσία.

➔ **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). Το όριο LC1 ορίζεται έμμεσα από το LC50 με βάση τη συνάρτηση δόσης – απόκρισης ($P = a + b * \ln C^n * t$) και σύμφωνα με τη σχέση: $LC1 = \{ \exp [\ln(LC50^{**n}) - 2.33] \}^{**1/n}$, Όπου, $t=30$ min, $b=1$ και $n=2$ για τα οργανοφωσφορικά, $n = 3.7$ για το NO_2 , $n=2.4$ για το SO_2 και $n=1.9$ για το υδρόθειο.

Στην περίπτωση παρουσίας πολλών τοξικών ουσιών στην ατμόσφαιρα, εξετάζεται η περίπτωση της συνεργιστικής δράσης για τις ουσίες οι οποίες ανήκουν στην ίδια χαρακτηριστική ομάδα. Για τον υπολογισμό της συνολικής τοξικότητας δεν υπάρχει κάποια κοινά αποδεκτή μεθοδολογία και στη βιβλιογραφία προτείνονται διάφορες προσεγγίσεις, όπως η θεώρηση σταθερής μάζας για κάθε ουσία αλλά με την

τοξικότητα της πλέον τοξικής ουσίας ή η αναγωγή της συγκέντρωσης των διαφόρων ουσιών σε συγκέντρωση της πλέον τοξικής ουσίας με βάση το λόγο τοξικότητας (*Assessment of Safety reports for Chemical Warehouses – Guidance & Discussion, HSE 1996*).

2.6 Ζώνες προστατευτικών δράσεων

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*), (*HAZ –MAT Response team, Leak and Spill Guide, 1984*), (*North American Emergency Response Guidebook, 1996*). 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 οι οποίες συνοψίζονται παρακάτω στον **Πίνακα 2-1**:

Πίνακας 2-1: Ζώνες προστατευτικών δράσεων και οριακές τιμές.

Ζώνη	Τοξικές ουσίες* Συγκέντρωση (mg/m³)	Θερμική ακτινοβολία** Δόση (DTU)	Ωστικό κύμα 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

* Ως μέγιστος χρόνος έκθεσης ακίνητου παρατηρητή ορίζονται τα 30 min.

** Για φαινόμενο BLEVE η διάρκεια λαμβάνεται ίση με την διάρκεια του φαινομένου ενώ για φωτιά λίμνης ίση με 40 sec.

2.7 Νομοθεσία

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 BAME εξεδώθηκε το 1988. Ενώ αργότερα το 1993 στη Γενεύη γράφτηκε 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 νομοθεσίας σχετικά για την πρόληψη και αντιμετώπιση των BAME.

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 σημασία στην πρόληψη ατυχημάτων μεγάλης έκτασης και στον άμεσο και αποτελεσματικό τρόπο αντιμετώπισης του ατυχήματος. Στην Ελλάδα η νέα οδηγία ενσωματώθηκε το 2001 με την Κοινή Υπουργική Απόφαση 5697/590/2001 (*Κεφαλάς, 2004*).

3

ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Στο **Κεφάλαιο 3** παρατίθενται αρχικά οι βασικές έννοιες για την καύση, φωτιά και καύσιμα καθώς και για τα προϊόντα καύσης, δηλαδή τον καπνό και τα σωματίδια. Επιπλέον παρουσιάζεται στατιστική μελέτη ατυχημάτων φωτιάς σε δεξαμενές αποθήκευσης καυσίμων σε ατυχήματα που έχουν εμφανιστεί κατά καιρούς και απολογισμός των συνεπειών αυτών. Έπειτα ακολουθεί πλήρης περιγραφή του ατυχήματος στις εγκαταστάσεις αποθήκευσης πετρελαιοιδών της Jet Oil, στο Καλοχώρι της Θεσσαλονίκης. Τέλος παρουσιάζεται μια εκτενής και εμπειριστατωμένη περιγραφή του πρόσφατος ατυχήματος που συνέβη στο *Buncefield Oil Storage Depot* στο *Hertfordshire* στη *Μεγάλη Βρετανία*.



Εικόνες 3-1, 3-2 : Βιομηχανικά ατύχημα στο HOSL του Buncefield στην Μ. Βρετανία.

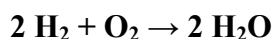
3. ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ ΦΩΤΙΑΣ ΣΕ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

3.1 Βασικές έννοιες για καύση, φωτιά και καύσιμα

Η καύση, πρωταρχικός παράγοντας ζωής για όλα τα έμβια όντα, είναι μια πολύ συνηθισμένη στη φύση εξώθερμη χημική αντίδραση. Αναφέρεται στην ένωση του οξυγόνου με μεγάλη ποικιλία στοιχείων και ενώσεων που χαρακτηρίζονται από μικρή ή μεγάλη, βραδεία ή ταχεία, αποβολή θερμότητας. Η καύση ξεκινά όταν το καύσιμο υλικό (αναγωγικό) και το οξειδωτικό (συνήθως οξυγόνο) συναντηθούν, ευρισκόμενα σε τέτοια ενεργειακή κατάσταση, που ξεπερνά κάποιο δεδομένο όριο. Εάν μάλιστα η αντίδραση είναι ακαριαία, πρόκειται για έκρηξη (*Σελλούντος et al., 1988*).

Κατά τη διάρκεια της καύσης, ένα μέρος της εκλυόμενης ενέργειας διαχέεται στο περιβάλλον, ανυψώνοντας σημαντικά την θερμοκρασία. Το υπόλοιπο μεταφέρεται στα γειτονικά καιγόμενα υλικά καθώς και σε ενδιάμεσα τυχόν καύσιμα προϊόντα της καύσης, ανεβάζοντας την εσωτερικής τους ενέργεια έτσι ώστε η αντίδραση (καύση) να συνεχίζεται και ενδεχομένως να επεκτείνεται. Εάν αυτή η ενέργεια δεν είναι αρκετή, η καύση σταματά σταδιακά, ενώ αν είναι πολύ μεγάλη η καύση επεκτείνεται και δημιουργείται η περίπτωση πυρκαγιάς (*Κώνστας, 1998*).

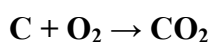
Σε μια πολύ απλή οξείδωση που συναντιέται στις περισσότερες φωτιές, δύο διατομικά μόρια υδρογόνου, που είναι εξαίρετο καύσιμο, ενώνονται με ένα διατομικό μόριο οξυγόνου και σχηματίζουν δύο μόρια νερού.



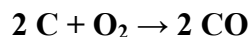
Επειδή το νερό είναι πιο σταθερό στοιχείο από τα αέρια, η αντίδραση είναι ζωνηρή και με έκλυση μεγάλης θερμότητας (εξώθερμη).

Καθώς το υδρογόνο βρίσκεται σαν συνθετικό σχεδόν στα περισσότερα καύσιμα, ακόμη και στα σύνθετα μόρια του ξύλου, των πλαστικών ή του πετρελαίου, η καύση κάθε κοινού καυσίμου παράγει υδρατμούς σε μεγάλες ποσότητες (*Κώνστας, 1998*).

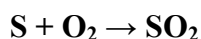
Άλλο κύριο συστατικό των περισσότερων καυσίμων είναι ο άνθρακας που βρίσκεται στα μόρια των εύφλεκτων υλών. Σε όλες τις καύσεις ανθρακούχων ενώσεων, και αυτών που γίνονται ακόμη μέσα στο ανθρώπινο σώμα, παράγεται διοξείδιο του άνθρακα σύμφωνα με την αντίδραση:



Ανάλογα με την παροχή του οξυγόνου συμβαίνει μια άλλη πρωτεύουσα ή δευτερεύουσα αντίδραση με αποτέλεσμα την παραγωγή μονοξειδίου του άνθρακα.



Αυτές οι τρεις παραπάνω αντιδράσεις συνιστούν τις βασικές χημικές αντιδράσεις στα φαινόμενα της φωτιάς. Σε λιγότερες περιπτώσεις έχουμε οξείδωση ενώσεων του θείου με παραγωγή διοξειδίου του θείου (*Κώνστας, 1998*).



Όταν η καύση είναι εμφανής, άμεσα αντιληπτή από τον άνθρωπο σαν ορατό και θερμικό φαινόμενο, όταν δηλαδή υπάρχει φλόγα έχουμε το φαινόμενο της *φωτιάς*. Η φωτιά δηλαδή αναφέρεται πάντοτε σε καύση με ταυτόχρονη ανάπτυξη φλόγας και θερμότητας. Η ανεπιθύμητη και εκτός ελέγχου καύση υλών, όπως και η ανεπιθύμητη καύση χρήσιμων έμβιων οργανισμών, αντικειμένων, κτιρίων, εγκαταστάσεων κλπ, χαρακτηρίζεται συνήθως με τον όρο *πυρκαγιά* (*Σελλούντος et al., 1988*).

Η εξέλιξη της πυρκαγιάς περιλαμβάνει τρία στάδια. Την φάση της ανάπτυξης της φωτιάς, όπου η θερμοκρασία και ο ρυθμός καύσης συνεχώς αυξάνονται, τη φάση της πλήρως αναπτυγμένης φωτιάς όπου ο ρυθμός καύσης παραμένει σταθερός, και τη φάση της κατάσβεσης. Από τα τρία στάδια της φωτιάς έχει μελετηθεί περισσότερο το δεύτερο το οποίο θεωρείται και το πιο σημαντικό.

Εκτός από την ειδική περίπτωση των φυσικών εκρήξεων συμπεριλαμβανομένων των ανεξέλεγκτων εξώθερμων χημικών αντιδράσεων, οι πυρκαγιές και οι εκρήξεις έχουν τις ίδιες εναρκτήριες συνθήκες, δηλαδή την ταυτόχρονη ύπαρξη καυσίμου, οξυγόνου και πηγή ανάφλεξης. Οι συνθήκες αποτελούν το

«*Τρίγωνο της Φωτιάς*» (*Εικόνα 3-3*).



Εικόνα 3-3: Το τρίγωνο της φωτιάς.

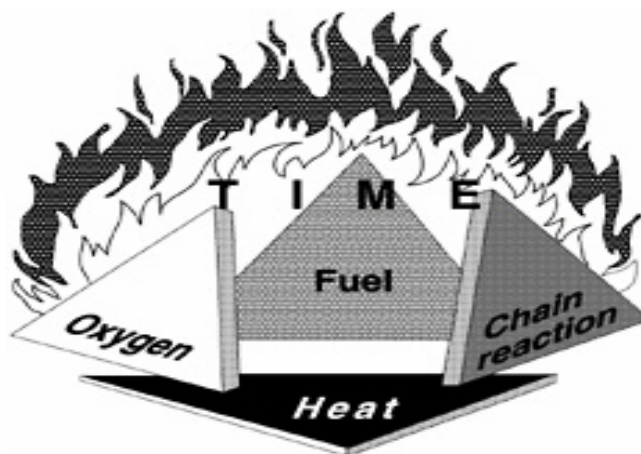
Για να οδηγήσουν αυτές οι συνθήκες σε πυρκαγιά ή ανάφλεξη, πρέπει (*Ρήγας, 2004*):

- Το καύσιμο να βρίσκεται στη σωστή ποσότητα ή συγκέντρωση
- Η πηγή ανάφλεξης να έχει αρκετή ενέργεια ώστε να μπορεί να αναφλέξει το καύσιμο.
- Το οξυγόνο να βρίσκεται στην κατάλληλη συγκέντρωση

Όταν όλες αυτές οι συνθήκες πληρούνται ταυτόχρονα, τότε μόνο υπάρχει κίνδυνος πυρκαγιάς ή έκρηξης.

Άμεσος κίνδυνος πυρκαγιάς ανακύπτει, όταν καύσιμο αέριο, καύσιμο υγρό, νέφος καύσιμης σκόνης, ή ασυσκευάστα στερεά έρχονται σε μια επαφή με μια πηγή ανάφλεξης, η οποία παρέχει αρκετή ενέργεια για την έναρξη της καύσης. Το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα, είναι συνήθως αρκετό για να υποστηρίξει την αντίδραση καύσης.

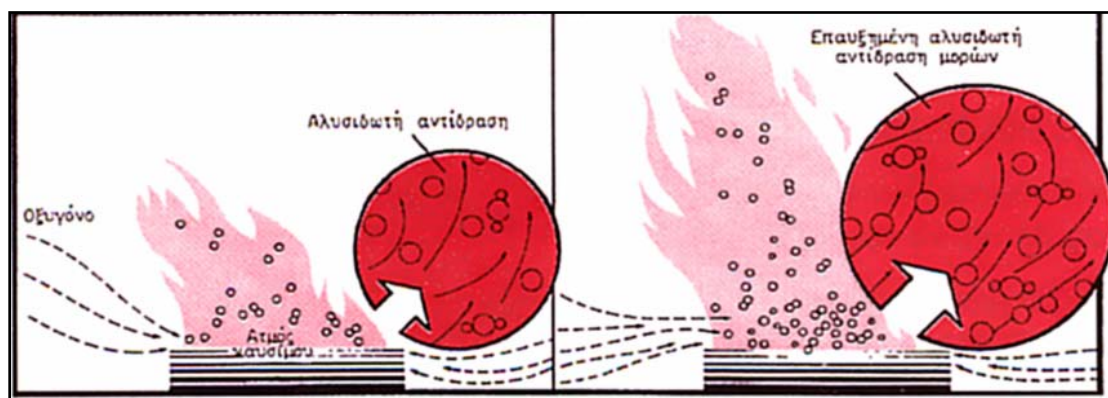
Νεότερες επιστημονικές όμως έρευνες έδειξαν ότι υπάρχει και ένα τέταρτο απαραίτητο στοιχείο για την ανάπτυξη πυρκαγιάς, οι «ελεύθερες ρίζες» (free radicals), που δημιουργούν τελικά την «*πυραμίδα της φωτιάς*» (Εικόνα 3-4) (Σελλούντος *et al.*, 1988).



Εικόνα 3-4: Η πυραμίδα της φωτιάς.

Οι ελεύθερες ρίζες αντιδρούν με το οξυγόνο και τα αέρια της καιγόμενης ύλης, κατά εξελισσόμενο τρόπο ως *αλυσιδωτή αντίδραση* (Εικόνα 3-5). Τα στάδια αυτά της αλυσιδωτής αντίδρασης είναι πάρα πολύ δύσκολα να δοθούν, παρόλα αυτά παρακάτω γίνεται μια προσπάθεια να δοθεί μια εικόνα της. Μάλιστα το φαινόμενο γίνεται ακόμα πιο δύσκολο να περιγραφεί γιατί είναι αρκετά περίπλοκο και γίνεται ακόμα περιπλοκότερο, όταν στη φωτιά συμμετέχουν κάποια ιδιόρρυθμα υλικά, όπως τα *οξειδωτικά μέσα* και τα *δραστικά μέταλλα*.

Αλυσιδωτή αντίδραση πυρκαγιάς, είναι μια σειρά γεγονότων, καθένα από τα οποία προκαλεί ή επηρεάζει το επόμενο και έχουν σαν αποτέλεσμα, εφόσον υπάρχουν οι προϋποθέσεις της πυρκαγιάς (τρίγωνο πυρκαγιάς) να οδηγήσουν σε ανάφλεξη της ύλης και να διατηρήσουν την αντίδραση σε εξέλιξη μέχρις ότου η καύσιμη ύλη καταναλωθεί όλη, οπότε η φωτιά θα σβήσει λόγω έλλειψης καυσίμου (Θειόπουλος, 1996).



Εικόνα 3-5: Η αλυσιδωτή αντίδραση της καύσης. Α) Ο ατμός από το θερμό καύσιμο ανέρχεται, αναμιγνύεται με αέρα και καίγεται. Παράγει θερμότητα αρκετή για να απελευθερώσει περισσότερο ατμό και να τραβήξει αέρα, ώστε να κάψει αυτόν τον ατμό. Β) Καθώς καίγεται περισσότερο ατμός, αυξάνει η παραγωγή φλογών. Παράγεται περισσότερη θερμότητα, απελευθερώνεται περισσότερος ατμός, περισσότερος αέρας έλκεται προς τις φλόγες και καίγεται περισσότερος ατμός. Η αλυσιδωτή αντίδραση εξακολουθεί να αυξάνει το μέγεθος της φωτιάς (Θειόπουλος, 1996).

Τα συμβατικά (ή ορυκτά) καύσιμα (fossil fuels) κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκονται (Στουρνάς *et al.*, 2002).

1. Στερεά καύσιμα. Περιλαμβάνουν όλα τα συμβατικά καύσιμα που βρίσκονται σε στερεή κατάσταση, δηλαδή το ξύλο και όλες τις κατηγορίες ανθράκων.
2. Υγρά καύσιμα. Περιλαμβάνουν όλα τα καύσιμα που βρίσκονται σε υγρή μορφή. Ουσιαστικά περιλαμβάνουν όλα τα υγρά προϊόντα που προέρχονται από την επεξεργασία του αργού πετρελαίου, καθώς και υγρά προϊόντα που λαμβάνονται από αναβάθμιση στερεών καυσίμων ή από πισσοσχιστόλιθους και πετρελαιοάμμους.
3. Αέρια καύσιμα. Περιλαμβάνουν τα καύσιμα που βρίσκονται σε αέρια κατάσταση. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν το φυσικό αέριο, τα αέρια που παράγονται από την αναβάθμιση στερεών καυσίμων, τα συνθετικά αέρια πόλης και τα υγραέρια.

Τώρα για τα υγρά καύσιμα στα οποία ανήκουν όλα τα εύφλεκτα υγρά. Αυτά χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: **τα πτητικά** και **τα μη πτητικά**. Τα πτητικά είναι υγρά που παράγουν από την επιφάνειά τους μεγάλη ποσότητα εύφλεκτων ατμών σε συνηθισμένες θερμοκρασίες περιβάλλοντος (-20 °C έως +50 °C). Οι παραγόμενοι ατμοί θεωρούνται εύφλεκτοι αν προέρχονται από υγρό το οποίο είναι εύφλεκτο.

Εύφλεκτα υγρά, θεωρούνται οι ενώσεις υδρογόνου και άνθρακα, οι γνωστοί υδρογονάνθρακες. Αυτοί χωρίζονται σε τρεις κλάσεις σύμφωνα με τον **Πίνακα 3-1**.

Πίνακας 3-1: Κλάσεις εύφλεκτων υδρογονανθράκων.

Κλάση Α	Σημείο αναφλέξεως μικρότερο των 23 °C. (Λίαν εύφλεκτο) (π.χ. πετρέλαιο, οινόπνευμα)
Κλάση Β	Σημείο αναφλέξεως από 23 °C έως 66 °C. (Εύφλεκτο) (π.χ. κηροζίνες)
Κλάση C	Σημείο αναφλέξεως μεγαλύτερο των 66 °C. (π.χ μαγειρικό λάδι, λιπαντικό λάδι, πετρέλαιο Diesel)

Η ποσότητα των παραγόμενων ατμών είναι αρκετή για να προκαλέσει ανάφλεξη στην επιφάνεια του υγρού, αν μια πηγή ανάφλεξης πλησιάσει εκεί. Όλα γενικά τα υγρά παρουσιάζουν ένα νέφος ατμών στην επιφάνειά τους, από την οποία όπως ξέρουμε γίνεται η εξάτμισή τους. Το πόσο πυκνό θα είναι αυτό το νέφος, εξαρτάται από διάφορους παράγοντες:

- Αν το υγρό είναι πτητικό ή όχι. Με άλλα λόγια δηλαδή, αν από μόνο του έχει την τάση να εξατμίζεται ή όχι.
- Από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος γύρω από το υγρό.
- Από την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού.
- Από την υγρασία της ατμόσφαιρας.
- Από τα υπάρχοντα ρεύματα αέρα (οριζόντια και κατακόρυφα), στο χώρο που έχει δημιουργηθεί το νέφος των ατμών.

Έτσι η καύση των εύφλεκτων υγρών γίνεται πολύ πιο εύκολα και μάλιστα σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Ο ατμός που παράγεται από ένα εύφλεκτο υγρό είναι συνήθως βαρύτερος από τον αέρα και αυτό τον καθιστά πολύ επικίνδυνο, γιατί θα καταλάβεις τις χαμηλές περιοχές, θα διαχυθεί αργά και θα ταξιδέψει σε μία απομακρυσμένη πηγή αναφλέξεως. Το αποτέλεσμα μπορεί να είναι μια τρομακτική έκρηξη ή πυρκαγιά.

Τέλος τα **αέρια καύσιμα** που συνήθως αποθηκεύονται σε φιάλες πίεσεως μεγάλης αντοχής ή πάλι υπό πίεση σε δεξαμενές ειδικής κατασκευής. Για να δημιουργηθεί εύφλεκτο νέφος, πρέπει να ελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα (λόγω διαρροής από το χώρο αποθήκευσής τους) και να αναμιχθούν με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας. Τα

αέρια καύσιμα όταν ελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα, βρίσκονται διαρκώς σε αναφλέξιμη κατάσταση. Η ακτινοβολία ανατροφοδοτήσεως δεν είναι αναγκαία για την εξάτμισή του αερίου, αλλά εξακολουθεί να είναι ζωτική στη διεργασία της καύσεως ώστε να παρέχει συνεχή επανάφλεξη του παρεχόμενου από την πηγή αερίου. Η καύση των αερίων προϋποθέτει την κατάλληλη ανάμιξη αερίου-αέρα για το σχηματισμό αναφλέξιμου μίγματος.

3.2 Βασικές έννοιες για καπνό και σωματίδια

Σαν καπνός ορίζονται τα σωματίδια, συμπεριλαμβανομένων σταγονιδίων κι εκνεφωμάτων, που βρίσκονται σε αιώρηση στα καυσαέρια και απορροφούν, διαθλούν ή ανακλούν το φως. Ο καπνός αποτελείται κατά κύριο λόγο από σωματίδια αιθάλης, ουσιαστικά σωματίδια ελεύθερου άνθρακα.

Ο σχηματισμός αιθάλης γίνεται στο πρώτο στάδιο της καύσης, όταν υπάρχει φλόγα διάχυσης. Στην περίοδο αυτή, η φλόγα είναι πολύ φωτεινή, ένδειξη ύπαρξης ελεύθερου άνθρακα. Ένα πολύ μικρό μέρος του άνθρακα αυτού δεν προλαβαίνει να καεί, σχηματίζοντας έτσι αιθάλη, μέσω πολύπλοκων διεργασιών πυρόλυσης, πολυμερισμού και μερικής οξειδωσης (*Στουρνάς et al., 2002*).

Οι κύριες φάσεις σχηματισμού της αιθάλης είναι τρεις: ο σχηματισμός των μικρών πυρήνων, η αρχική συσσωμάτωση και αύξηση μεγέθους, και τέλος η δημιουργία των ακόμη μεγαλύτερων αδρομερών. Οι σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες που παρατηρούνται σε φλόγες διάχυσης, προωθούν τις αντιδράσεις πολυμερισμού και συμπύκνωσης, πριν τη φάση της αφυδρογόνωσης. Κάτω από αυτές τις συνθήκες αρωματικοί και πολυκυκλικοί υδρογονάνθρακες λειτουργούν ως αρχικοί πυρήνες. Οι υψηλές θερμοκρασίες που επικρατούν σε προαναμιγμένες φλόγες και φλόγες τυρβώδους διάχυσης, προωθούν αντιδράσεις πυρόλυσης και διάσπασης μορίων. Ενδιάμεσο προϊόν αυτών των δράσεων είναι το ακετυλένιο ($\text{HC}\equiv\text{HC}$). Οι πυρήνες συσσωμάτωσης αυξάνουν ταχύτερα σε αυτές τις υψηλές θερμοκρασίες. Μετά την εκπομπή τους από τις θερμότερες περιοχές της φλόγας, τα μικρά αλλά πλήρως σχηματισμένα σωματίδια αιθάλης συνεχίζουν την αύξηση του μεγέθους τους. Μέρος του σχηματιζόμενου άνθρακα καίγεται, και ο τελικός ρυθμός εκπομπής αιθάλης είναι ανάλογος της διαφοράς του ρυθμού παραγωγής σωματιδίων και του ρυθμού καύσης τους (*Στουρνάς et al., 2002*).

Τα σωματίδια ή καπνός βρίσκονται στον αέρα υπό κολλοειδή διασπορά και διακρίνονται σε λευκό, γαλάζιο και μαύρο καπνό. Ο λευκός και γαλάζιος καπνός είναι κυρίως κολλοειδής διασπορές σταγονιδίων. Τα σταγονίδια του λευκού καπνού είναι γενικά μεγαλύτερα περίπου 1 μm σε διάμετρο ενώ του γαλάζιου είναι μικρότερα του 0.4 μm. Ο μαύρος καπνός είναι αιθάλη δηλαδή σωματίδια άνθρακα μεγέθους μικρότερου των 0.2 μm που προέρχονται από την ατελή καύση του καυσίμου (Κεφαλάς, ΔΕ 2004).

Επιπλέον ο σχηματισμός αιθάλης εξαρτάται κυρίως από τους παρακάτω φυσικοχημικούς παράγοντες:

- Σύσταση και χημική δομή του καυσίμου
- Θερμοκρασία
- Αναλογία αέρα - καυσίμου

Όσο αναφορά την χημική δομή έχει αναφερθεί σύμφωνα με την βιβλιογραφία η ακόλουθη διαδοχή φθίνουσας τάσης παραγωγής αιθάλης:

Τολουόλιο >> κυκλοεξάνιο >> ισοοκτάνιο > κυκλοεξάνιο > κ-επτάνιο

Γενικά η σειρά η οποία φαίνεται να ισχύει σύμφωνα με (Λόης, 1992):

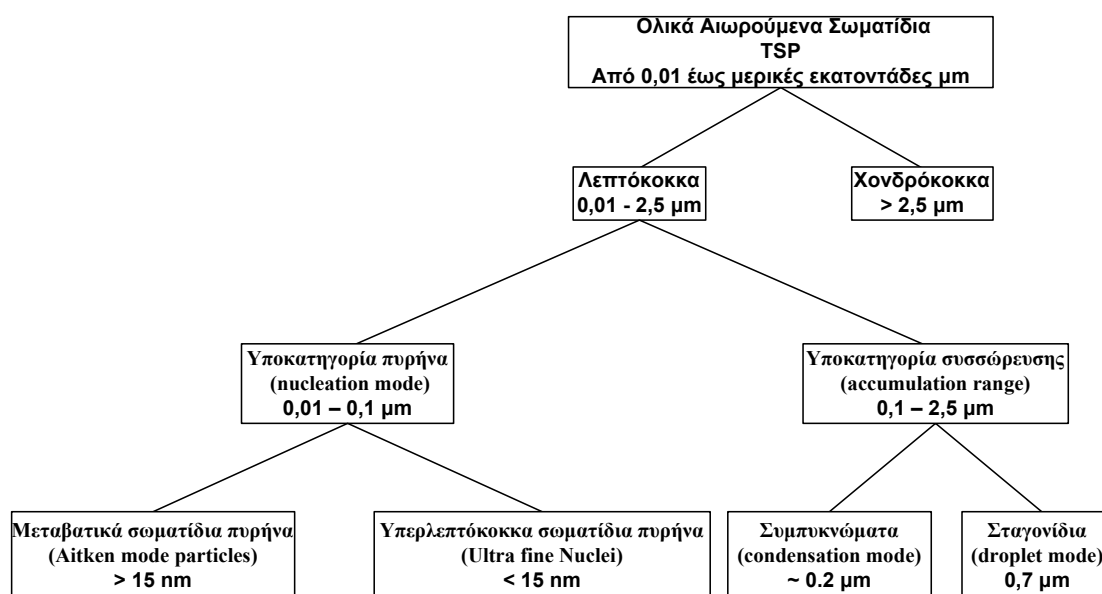
Αρωματικές ενώσεις > αλκίνια > ολεφίνες > παραφίνες > αλκοόλες

Η καύση μίγματος καυσίμων μπορεί να προκαλέσει είτε την αύξηση είτε την μείωση της παραγόμενης αιθάλης ανάλογα με τον βαθμό αλληλεπίδρασης των συστατικών του μίγματος και τον βαθμό πυρόλυσης που προκαλείται στο μίγμα.

Γενικά τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούνται από στερεά ή/ και υγρά σωματίδια που εισέρχονται στην ατμόσφαιρα από φυσικές ή ανθρωπογενείς πηγές. Προέρχονται από μια μεγάλη ποικιλία πηγών και έχουν ένα σημαντικό εύρος διαφορετικών μορφολογικών, χημικών, φυσικών και θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών. Η διάμετρός τους ποικίλει από μερικά νανόμετρα έως και 100 μm και σχετίζεται άμεσα με τον τρόπο σχηματισμού και εκπομπής τους. Υπάρχουν διάφορα κριτήρια για την ομαδοποίηση των αιωρούμενων σωματιδίων σε επιμέρους κλάσματα, όπως το μέγεθος, η σύσταση, ο τρόπος σχηματισμού και οι φυσικές και χημικές τους ιδιότητες. Το συνηθέστερο και ευρύτερα χρησιμοποιούμενο κριτήριο ομαδοποίησης, ωστόσο, είναι το μέγεθός τους (Χαλουλάκου, 2005).

Συνηθέστερο είναι να χρησιμοποιείται η φυσική συμπεριφορά του σωματιδίου ως κριτήριο καθορισμού της ισοδύναμης διαμέτρου. Συγκεκριμένα, συνήθως χρησιμοποιείται η διάμετρος Stokes (D_p) ή αεροδυναμική διάμετρος (D_a) (Χαλουλάκου, 2005).

Η αιωρούμενη σωματιδιακή ύλη συντίθεται από σωματίδια έντονα διαφοροποιημένα ως προς το μέγεθος. Τα μικρότερα σε μέγεθος σωματίδια έχουν μέγεθος κάτω από 5 nm σε διάμετρο και αποτελούνται μόνο από κάποιες δεκάδες μορίων. Αντιθέτως τα πιο μεγάλα σωματίδια έχουν μέγεθος έως και 100 μm (Χαλουλάκου, 2005). Στο παρακάτω *Σχήμα 3-1* περιγράφεται η δομή των σωματιδίων με βάση το μέγεθος τους.



Σχήμα 3-1: Δομή σωματιδίων με βάση το μέγεθος τους.

Τώρα κατάταξη σωματιδίων με βάση την διεισδυτικότητα στον ανθρώπινο οργανισμό ορίζεται ως εξής *Πίνακας 3-2* (Χαλουλάκου, 2005):

Πίνακας 3-2: Κατάταξη σωματιδίων με βάση τη διεισδυτικότητα στον ανθρώπινο οργανισμό.

Τύπος σωματιδίων	Μέγεθος σωματιδίων
Εισπνεύσιμα σωματίδια (Inhalable particles)	< 10 μm
Θωρακικά σωματίδια (Thoracic particles)	< 7 μm
Αναπνεύσιμα σωματίδια (Respirable particles)	< 2.5 μm

Τέλος είναι καλό να αναφερθεί ο αυστηρός ορισμός των PM10 και PM2.5 όπως τον αναφέρει η Ε.Ε στις σχετικές οδηγίες της.

“PM10 νοούνται τα σωματίδια που διέρχονται δια στομίου επιλεγέντος μεγέθους το οποίο συγκρατεί το 50% των σωματιδίων αεροδυναμικής διαμέτρου 10 μm.”

Και ο αντίστοιχος για ορισμός για τα PM2.5 είναι:

“PM2.5 νοούνται τα σωματίδια που διέρχονται δια στομίου επιλεγέντος μεγέθους το οποίο συγκρατεί το 50% των σωματιδίων αεροδυναμικής διαμέτρου 2.5 μm.”

Όλα τα παραπάνω είναι μια γενική εισαγωγή για τα σωματίδια, το θέμα των σωματιδίων είναι πάρα πολύ μεγάλο και με ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην επιστημονική κοινότητα. Ωστόσο η μελέτη τους σε μεγαλύτερο βάθος δεν είναι σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας. Παρόλο αυτά αν κάποιος ενδιαφέρεται να μάθει περισσότερα μπορεί να ανατρέξει στην τελευταία έκθεση για τα σωματίδια που περιγράφει πλήρως όλες τις τελευταίες επιστημονικές εξελίξεις (*CAFE, 2004*).

3.3 Στατιστική ανάλυση ατυχημάτων φωτιάς σε δεξαμενές αποθήκευσης καυσίμων.

Σε αυτή την ενότητα δίνεται ιδιαίτερη αναφορά στην έρευνα των James Chang και Cheng-Chung Lin (*Chang and Lin, 2006*) για την στατιστική μελέτη ατυχημάτων φωτιάς σε δεξαμενές αποθήκευσης καυσίμων καθώς και στην έρευνα των Henry Persson και Anders Lonnermark (*Persson and Lonnermark, 2004*).

Οι πληροφορίες για την στατιστική ανάλυση των James Chang και Cheng-Chung Lin (*Chang and Lin, 2006*) έχουν συγκεντρωθεί από δημοσιευμένες έρευνες [(*March and McLennan, 1997, 2002*), (*Persson and Lonnermark, 2004*)], από βιβλία, από συναφείς ειδήσεις του CSB και από βάσεις δεδομένων. Η έρευνα καλύπτει το χρονικό φάσμα των τελευταίων 40 χρόνων σε ατυχήματα πάνω σε δεξαμενές. Το σύνολο των ατυχημάτων που μελετούνται είναι 242 από τα οποία τα 114 έχουν συμβεί στη Βόρεια Αμερική, 72 στην Ασία και 38 στην Ευρώπη.

Από τα αποτελέσματα της έρευνας προκύπτει ότι τα ατυχήματα που συμβαίνουν σε δεξαμενές εμφανίζονται συχνότερα σε διυλιστήρια πετρελαίου σε σύνολο 116 περιπτώσεων που αποτελούν το 47,9% των συνολικών περιπτώσεων. Έπειτα ακολουθούν σε αριθμό ατυχημάτων τα τερματικά και τα αντλιοστάσια σε ποσοστό 26,4% (64 περιπτώσεις), και το υπόλοιπο 25,7 % περιλαμβάνει ατυχήματα σε πετροχημικά εργοστάσια (12,8%), σε πετρελαιοπηγές (2,5%) και τέλος σε διάφορες βιομηχανικές εγκαταστάσεις (10,3%). Το σύνηθες περιεχόμενο των δεξαμενών είναι μαζούτ, βενζίνη, κηροζίνη, ντίζελ κ.α. Ενώ ο πιο συνηθισμένος τύπος δεξαμενών που

εμφανίζεται να έχει μεγαλύτερη συχνότητα ατυχημάτων είναι η πλωτής οροφής και έπειτα η κωνικής.

Επιπλέον ως κύρια αιτία πρόκλησης ατυχήματος σε δεξαμενή εμφανίζεται η πυρκαγιά, περιλαμβάνοντας 145 περιπτώσεις, η έκρηξη έρχεται δεύτερη με 61 περιπτώσεις. Ενώ το ταυτόχρονο φαινόμενο φωτιάς και έκρηξης αποτελεί το 85% των συνολικών περιπτώσεων.

Τέλος ο παρακάτω **Πίνακας 3-3** απεικονίζει τα δέκα μεγαλύτερα ατυχήματα σε δεξαμενές αποθήκευσης καυσίμων και το μέσο όρο οικονομικών απωλειών. Σύμφωνα με τα στοιχεία, το συνολικό ποσό ανέρχεται σε 114 εκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ το 2002.

Πίνακας 3-3: Τα δέκα μεγαλύτερα ατυχήματα σε δεξαμενές αποθήκευσης μεταξύ 1963 και 2002 *

	Ημερομηνία	Τοποθεσία	Απώλειες **	Περιγραφή
1	2/24/86	Θεσσαλονίκη, Ελλάδα	330	Η πυρκαγιά προήλθε από σπινθήρες οξυγονοκολλησεως κατά τη διάρκεια εργασίας ηλεκτροσυγκολλητών. Η φωτιά εξαπλώθηκε σχεδόν παντού με αποτέλεσμα την καταστροφή των 10 από τις 12 δεξαμενές.
2	4/3/77	UMM, Κατάρ	179	Μία δεξαμενή χωρητικότητας 260,000 βαρελιών που περιείχε 236,000 βαρέλια προπανίου υπό ψύξη στους -45 ⁰ F απέτυχε λειτουργικά. Επίσης μια γειτονική δεξαμενή βουτανίου και το μεγαλύτερο μέρος της εγκατάστασης καταστράφηκε από τη φωτιά
3	1/20/68	Pernis, Ολλανδία	141	Αφρισμός άρχισε να συμβαίνει όταν ένα γαλάκτωμα καυτού πετρελαίου και νερού σε μια δεξαμενή με slop αντέδρασε με το πτητικό slop προκαλώντας φαινόμενο υπερχειλίσσης (Boil-over). Η φωτιά κατέστρεψε χημικές εγκαταστάσεις και 80 δεξαμενές αποθήκευσης
4	9/1/79	Deer Park, Τέξας, ΗΠΑ	138	Σχεδόν ταυτόχρονα εκρήξεις σε ένα ξεφόρτωμα βυτιοφόρων 70,000 DWT και σε δεξαμενή χωρητικότητας 80,000 βαρελιών αιθανόλης σε διυλιστήριο από κεραυνό.
5	5/30/78	Τέξας, ΗΠΑ	120	Μια μη αναγνωρισμένη αποτυχία οδήγησε στην απελευθέρωση ελαφριών υδρογονανθράκων που εξαπλώθηκαν σε πηγή ανάφλεξης. 11 δεξαμενές σε αυτήν την μονάδα αλκυλοποίησης καταστράφηκαν.
6	8/20/81	Κουβέιτ	73	Η πυρκαγιά κατέστρεψε 8 δεξαμενές και έβλαψε διάφορες άλλες. Η αιτία της πυρκαγιάς δεν έχει αποκαλυφθεί
7	9/14/97	Vishakhapatnam, Ινδία	64	Δεξαμενή με LPG αναφλέχτηκε κατά τη διάρκεια φόρτωσής σε ένα πλοίο. Ένα πυκνό σύννεφο καπνού σκόρπισε τον πανικό, με αποτέλεσμα τον θάνατο 37 ανθρώπων και 100 τραυματίστηκαν. 15 δεξαμενές αποθήκευσης καϊγόντουσαν για 2 μέρες
8	12/21/85	Naples, Ιταλία	60	24 από τις 32 δεξαμενές σε ένα θαλάσσιο τερματικό πετρελαιοειδών καταστράφηκαν από πυρκαγιά που άρχισε από την υπερχειλίση μιας δεξαμενής. Η έκρηξη προκάλεσε πλήρη καταστροφή στα κτήρια του τερματικού και στα γειτονικά βιομηχανικά κτήρια
9	1/7/83	Newark, New Jersey, ΗΠΑ	52	Η υπερχειλίση μιας πλωτής οροφής δεξαμενής οδήγησε 1300 βαρέλια βενζίνης στο ανάχωμα των δεξαμενών. Το σύννεφο ατμών που δημιουργήθηκε μεταφέρθηκε από τον αέρα σε έναν κοντινό αποτεφρωτήρα και αναφλέχτηκε. Η έκρηξη κατέστρεψε δύο παρακείμενες δεξαμενές και το τερματικό
10	5/26/83	Prodhoe, Bay, Αλάσκα, ΗΠΑ	47	Ένα χαμηλής πίεσης τροφοδοτικό NGL έσπασε σε έναν σταθμό μάζουτ, με αποτέλεσμα η πυρκαγιά να καταστρέψει το ένα τρίτο του εξωτερικού της περιβάλλουσας δομής για 100 ft
M. O			114	

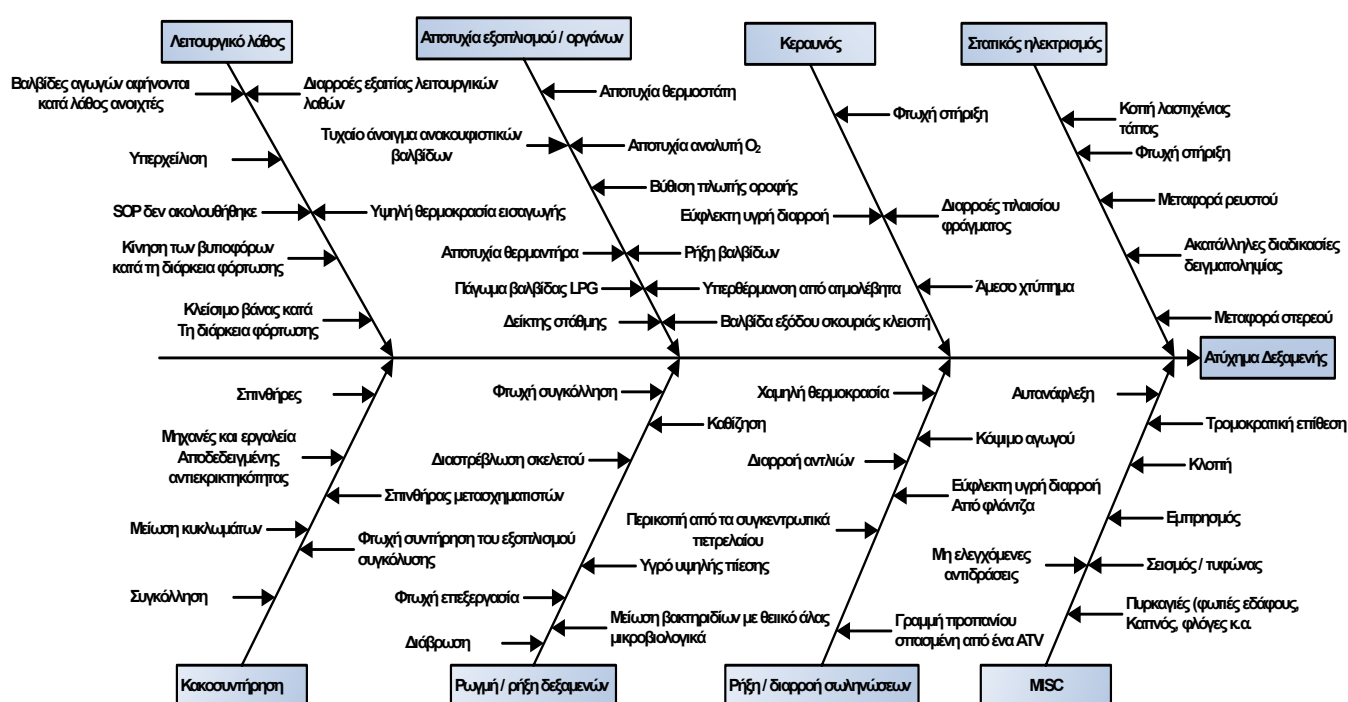
*Σε αυτά τα ατυχήματα δεν περιλαμβάνεται και το ατύχημα που έγινε στην Αγγλία στο Hertfordshire (11/12/2005)

**Οι οικονομικές απώλειες είναι σε εκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ (2002).

Επιπλέον με την έρευνα των Chang και Lin (*Chang and Lin,2006*) γίνεται μια εμπειριστατωμένη ανάλυση των αιτιών που είναι υπεύθυνες για την εμφάνιση

ατυχημάτων σε δεξαμενές καυσίμων. Έτσι η εμφάνιση ατυχημάτων σε δεξαμενές καυσίμων οφείλεται κυρίως στους παρακάτω λόγους: κεραυνό, κακή συντήρηση, θερμές / εύφλεκτες εργασίες, λειτουργικό λάθος, αστοχία εξοπλισμού, σαμποτάζ, ρωγμές και ρήξεις από την παλαιότητα των δεξαμενών, στατικό ηλεκτρισμό, διαρροές, πυρκαγιές σε γειτονικές περιοχές, φυσικές καταστροφές και τέλος ανεξέλεγκτες χημικές αντιδράσεις με ενώσεις που περιέχονται στις δεξαμενές.

Παρακάτω παρατίθενται δύο διαγράμματα τύπου ψαροκόκαλου (fishbone diagram) (Σχήμα 3-2; Σχήμα 3-3) που περιγράφουν τις αιτίες και τις συνέπειες των ατυχημάτων σε δεξαμενές αποθήκευσης (Ishikawa and Lu, 1985).

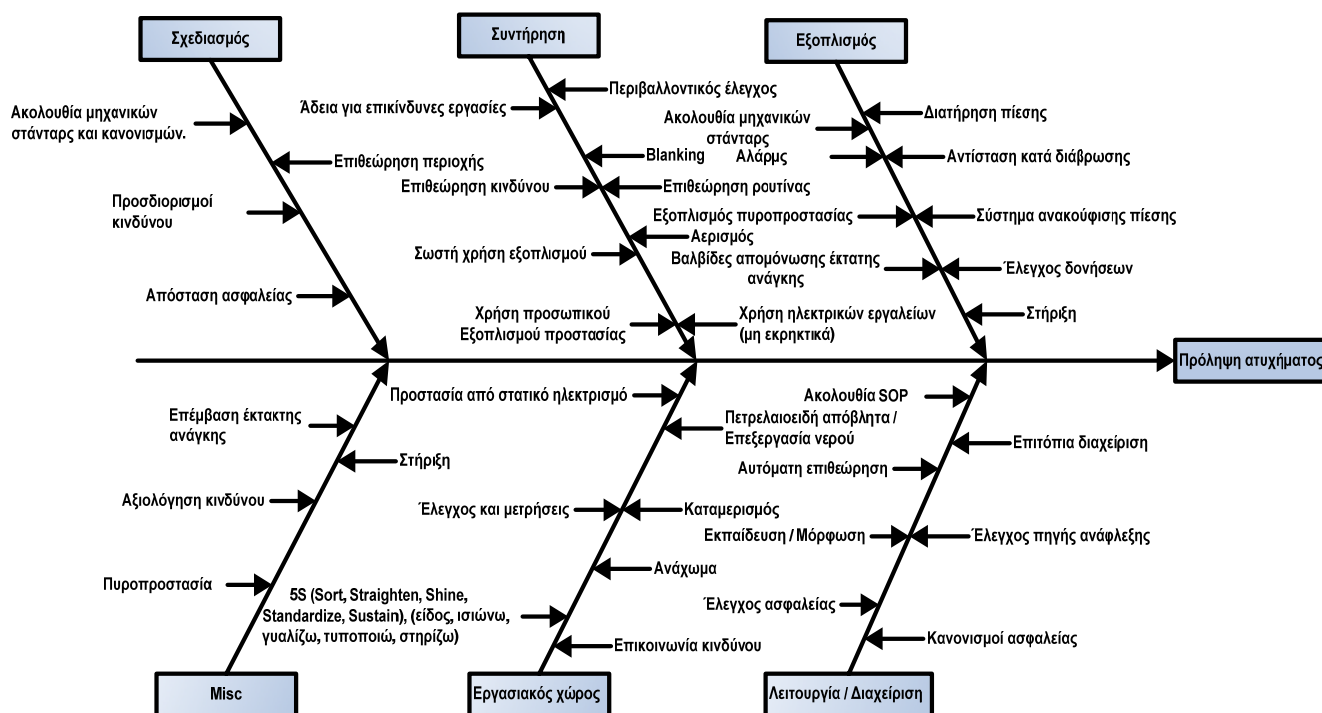


Σχήμα 3-2: Διάγραμμα τύπου ψαροκόκαλου για τις αιτίες ατυχημάτων (Ishikawa and Lu, 1985).

Το πρώτο διάγραμμα των Ishikawa and Lu (Ishikawa and Lu, 1985) απεικονίζει τις αιτίες που είναι υπεύθυνες για την εμφάνιση ατυχήματος σε μία δεξαμενή και έρχονται σε πλήρη αντιστοιχία με τα αποτελέσματα της έρευνας των Chang και Lin (Chang and Lin, 2006).

Το δεύτερο διάγραμμα Ishikawa and Lu (Ishikawa and Lu, 1985) παρουσιάζει και αυτό με συστηματικό τρόπο τις ενέργειες που μπορούν να γίνουν προκειμένου να αποφευχθεί ένα ατύχημα δεξαμενής.

Τα αποτελέσματα της έρευνας των Chang και Lin (*Chang and Lin, 2006*) κατέδειξαν ότι τα ατυχήματα θα είχαν αποφευχθεί αν υπήρχε καλός σχεδιασμός, καλές κατασκευές, καλή συντήρηση του μηχανολογικού εξοπλισμού, σωστή λειτουργία και σωστή διαχείριση ασφάλειας



Σχήμα 3-3: Διάγραμμα τύπου ψαροκόκαλου για την πρόληψη ατυχημάτων (*Ishikawa and Lu, 1985*).

Η έρευνα των Persson και Lonnermark (*Persson and Lonnermark, 2004*) έχει ως κύριο στόχο την βιβλιογραφική ανασκόπηση κατάσβεσης πυρκαγιών σε δεξαμενές αποθήκευσης ενώ παράλληλα έχουν συγκεντρωθεί και στοιχεία από πειράματα που έχουν γίνει πάνω σε τεχνητές μεγάλες πυρκαγιές για την κατάσβεσή τους. Όλα τα ατυχήματα μελέτης της έρευνας έχουν εισαχθεί σε μια βάση δεδομένων όπου παρέχονται λεπτομερή στοιχεία για τα γεγονότα που εκτυλίσσονται κατά τη διάρκεια του ατυχήματος αλλά και για τις επιχειρήσεις κατάσβεσης της πυρκαγιάς.

Η συλλογή των στοιχείων για την συγγραφή αυτής της έρευνας έγινε από τεχνικές αναφορές, περιοδικά, το ίντερνετ και από προσωπικές επικοινωνίες. Η έρευνα μελετά 480 περιπτώσεις ατυχημάτων σε δεξαμενές αποθήκευσης από το 1950 έως και το 2003 και τα δεδομένα της έρευνας έχουν συγκεντρωθεί σε βάση δεδομένων.

Επίσης τα ατυχήματα που αναφέρονται σε δεξαμενές είναι πολύ περισσότερα από αυτά που καταγράφονται αυτά τα 53 χρόνια, διότι πολλά συμβάντα δεν έχουν δημοσιευτεί και έχουν σκεπαστεί από ένα πέπλο μυστηρίου για ευνόητους λόγους.

Τέλος από τη βάση δεδομένων συνεπάγεται ότι τα ατυχήματα σε δεξαμενές αποθήκευσης εμφανίζονται σε ένα μέσο όρο 15 έως 20 κάθε χρόνο. Και η κύρια αιτία πρόκλησης τους εμφανίζεται ο κεραυνός σε σύνολο περίπου 150 περιπτώσεων.

3.4 Εγκαταστάσεις MAMIDOIL JET OIL A.E, Καλοχώρι Θεσσαλονίκης

Στην ενότητα αυτή γίνεται αναφορά στο κύριο ατύχημα που θα αποτελέσει το αντικείμενο μελέτης για την συγκεκριμένη εργασία.

Όλα τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να γίνει μια εμπειριστατωμένη περιγραφή και ανάλυση του ατυχήματος συγκεντρώθηκαν από το Αρχηγείο Πυροσβεστικής Υπηρεσίας, το Υ.Π.Ε.Χ.Ω.Δ.Ε, τη βάση δεδομένων MARS και το βιβλίο του Ι. Α. Λεμονίδη (*Λεμονίδης, 1994*).

3.4.1 Περιγραφή ατυχήματος

Ένα από τα μεγαλύτερα ατυχήματα που έχουν συμβεί στον Ελλαδικό χώρο εμφανίστηκε στις εγκαταστάσεις αποθήκευσης καυσίμων της JET OIL στην περιοχή του Καλοχωρίου της Θεσσαλονίκης. Η πυρκαγιά που προκλήθηκε στις εγκαταστάσεις της JET OIL είναι η μεγαλύτερη που έχει ποτέ υπάρξει σε βιομηχανικό ατύχημα στην Ελλάδα.

Η φωτιά ξέσπασε στις 24-02-1986, στις 13:00 και διήρκησε 7 ημέρες. Η φωτιά προκλήθηκε από οξυγονοκόλληση στους αγωγούς μεταφοράς υγρών καυσίμων στην δεξαμενή D7. Σύμφωνα με την έκθεση του Αρχηγείου Πυροσβεστικής Υπηρεσίας, η Πυροσβεστική και συγκεκριμένα ο Β' Πυροσβεστικός Σταθμός ειδοποιήθηκε για τη φωτιά, στις 13:26 μέσω ΚΑΕ-199.

Το έργο της κατάσβεσης παρακολουθούσε επιτελείο ξένων εμπειρογνομώνων που αποτελούντων από Άγγλους, Ιταλούς και Ολλανδούς. Ο κύριος λόγος των ξένων εμπειρογνομώνων ήταν η συλλογή στοιχείων για την πυρκαγιά και τον τρόπο διεξαγωγής των επιχειρήσεων κατάσβεσης καθώς και η υποβολή εισηγήσεων και παρατηρήσεων σχετικά με τις μεθόδους και τα μέτρα που έπρεπε να παρθούν (*Λεμονίδης, 1994*).

Στις επιχειρήσεις κατάσβεσης της πυρκαγιάς εκτός από τους 750 Έλληνες πυροσβέστες έλαβαν μέρος και πυροσβέστες της πρώην Γιουγκοσλαβίας, οι οποίοι στάλθηκαν ως ειδικοί στις κατασβέσεις πυρκαγιών διυλιστηρίων (*Λεμονίδης, 1994*).

Εν συνεχεία ακολουθεί σύντομη περιγραφή των γεγονότων του ατυχήματος σύμφωνα με την έκθεση του Αρχηγείου Πυροσβεστικής Υπηρεσίας.

Όπως προαναφέρθηκε η πυρκαγιά ξεκίνησε στις 13:00 και η Πυροσβεστική Υπηρεσία ειδοποιήθηκε στις 13:26. Αλλά περίπου στις 14:00 προκλήθηκε τρομακτική έκρηξη της καιγόμενης δεξαμενής D7 με αποτέλεσμα την εξάπλωση της φωτιάς σε όλη την λεκάνη των δεξαμενών D7 και D8.

Την Τετάρτη (26-2-1986) γίνεται νέα έκρηξη στη δεξαμενή D7 με συνέπεια η φωτιά να εξαπλωθεί στην λεκάνη των δεξαμενών D1, D2, D3, και D4. Μετά από αρκετές ώρες έσβησε η φωτιά στα περισσότερα σημεία και διατηρείτο μόνο στο σημείο της δεξαμενής D8.

Το βράδυ της Πέμπτης προς Παρασκευής (27-02-1986 & 25-02-1986) και ώρα περίπου 00:10, έγινε μεγάλη και εκτυφλωτική έκρηξη της δεξαμενής D8. Με αποτέλεσμα να εξαπλωθεί η φωτιά σε όλες τις δεξαμενές των εγκαταστάσεων και στην οροφή της δεξαμενής D10. Μετά από ώρες μαινόμενης κατάσβεσης αποκτήθηκε ο πλήρης έλεγχος της φωτιάς στη δεξαμενή D10.

Το Σάββατο (1-3-1986) το σύνολο των εστιών στη λεκάνη της δεξαμενής D10 είχαν σβηστεί με κοινή προσπάθεια Ελλήνων και Γιουγκοσλάβων Πυροσβεστών. Δυστυχώς όμως εκδηλώθηκε νέα έκρηξη στη δεξαμενή D2 με αποτέλεσμα η πυρκαγιά να μεταδοθεί στις λεκάνες των δεξαμενών (D1, D2, D3, D4), (D5, D6), (D7, D8) και D9 και μερικώς στη λεκάνη της δεξαμενής D10.

Το πρωί της Κυριακής (2-03-1986) προκλήθηκε νέα μεγάλη έκρηξη των δεξαμενών D5 και D6 με φυσικό επακόλουθο την εξάπλωση της φωτιάς σε όλες τις εγκαταστάσεις. Έπειτα από οργανωμένες προσπάθειες των πυροσβεστικών δυνάμεων κατορθώθηκε μέχρι αργά το βράδυ της ίδιας μέρας (Κυριακή 2-03-1986) να τεθούν υπό πλήρη έλεγχο όλες οι οικοπεδικές πυρκαγιές με απομείναντα πλέον τη φλεγόμενη δεξαμενή D5.

Η φωτιά στη δεξαμενή D5 ήταν πολύ επικίνδυνη γιατί έβαζε σε άμεσο κίνδυνο την εξάπλωση της φωτιάς στη μεγάλη δεξαμενή D10, αλλά μετά από πολλές και συνεχείς προσπάθειες η φωτιά στη δεξαμενή D5 έσβησε τα ξημερώματα της Δευτέρας (3-03-1986).

Η πυρκαγιά έλαβε τέλος την 02:30 της 3-03-1986 αλλά στον τόπο της πυρκαγιάς παρέμειναν για αρκετές ημέρες πυροσβεστικές δυνάμεις για το φόβο αναζωπύρωσης της πυρκαγιάς εξαιτίας των εναπομείναντα καυσίμων υλών. Παρακάτω απεικονίζονται σκηνές της κατάσβεσης αλλά και της κατάστασης που επικρατούσε στο χώρο του ατυχήματος (*Εικόνες 3-6, 3-7*).



Εικόνες 3-6, 3-7 : Και στις δύο εικόνες απεικονίζονται οι δύσκολες συνθήκες που επικρατούσαν και το μέγεθος της πυρκαγιάς.

Στην επιχείρηση κατάσβεσης της πυρκαγιάς έλαβαν μέρος 60 Πυροσβεστικά Οχήματα, 750 Πυροσβέστες, Στρατός, Πολεμική Αεροπορία, Ο.Λ.Θ., Νομαρχία, Δήμος, Υπάλληλοι των εγκαταστάσεων Ασπροπύργου, Ε.Κ.Ο., κ.α.

Τραυματίστηκαν 11 Πυροσβέστες και άλλοι 13 παρουσίασαν αναπνευστικά προβλήματα και νοσηλεύτηκαν στο νοσοκομείο. Τέλος κήκηκαν δύο πυροσβεστικά οχήματα. Περισσότερες εικόνες για το ατύχημα παρατίθενται στο *Παράρτημα Ι*.

3.4.2 Ανάλυση των παραμέτρων του ατυχήματος

Οι παράμετροι που καθορίζουν τα χαρακτηριστικά του ατυχήματος είναι το φαινόμενο της φωτιάς, η διασπορά των τοξικών ρύπων, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και ο ανθρώπινος παράγοντας. Έτσι η ανάλυση των παραμέτρων του ατυχήματος θα αναζητηθούν στο περιβάλλον της εγκατάστασης, στην ίδια την εγκατάσταση, στα υλικά καύσης και φυσικά στις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούσαν κατά τη διάρκεια του ατυχήματος

3.4.2.1 Το περιβάλλον της εγκατάστασης

Οι εγκαταστάσεις πετρελαιοειδών της Jet Oil κατανέμονται μεταξύ Θεσσαλονίκης και Καλοχωρίου και πλησίον αυτών υπήρχαν οι εγκαταστάσεις υγραερίων της BP και της ΑΤΖΙΠ-ΓΚΑΖ, με δώδεκα συνολικές δεξαμενές.

Μέσα στον χώρο των εγκαταστάσεων των υγραερίων υπήρχαν πολλές φιάλες υγραερίου άλλες γεμάτες και άλλες άδειες. Συνέχεια των εγκαταστάσεων αυτών και λίγο πιο κάτω από τον δρόμο που οδηγεί στις εγκαταστάσεις των Διυλιστηρίων του Ασπρόπυργου, βρίσκονται οι αποθήκες φυτοφαρμάκων της Bayer.

Ταυτόχρονα υπήρχε μεγάλη ανησυχία από τους κατοίκους της πόλης γιατί πολύ κοντά στην περιοχή της πυρκαγιάς ήταν οι εγκαταστάσεις της Αμμωνίας, και επιπλέον γιατί οι υπόγειοι αγωγοί των διυλιστηρίων επικοινωνούσαν με εργοστάσια κατασκευής και εμφιάλωσης υγραερίου και με όλα τα πρατήρια βενζίνης της πόλης (*Λεμονίδης, 1994*). Οπότε υπήρχε σοβαρός κίνδυνος για φαινόμενο ντόμινο (domino effect).

3.4.2.2 Η εγκατάσταση

Οι εγκαταστάσεις πετρελαιοειδών της Jet Oil την περίοδο του ατυχήματος περιγράφονται με πέντε λεκάνες που περικλείουν δώδεκα δεξαμενές. Από αυτές οι έντεκα ήταν κωνικής οροφής και μία πλωτής οροφής και συγκεκριμένα η D10 χωρητικότητας 62,400 m³ αργού πετρελαίου. Όλες οι δεξαμενές ήταν τοποθετημένες μέσα σε πέντε λεκάνες των οποίων το δάπεδο ήταν χωμάτινο και οι υπερυψωμένοι τοίχοι (bunds), ήταν κατασκευασμένοι από οπλισμένο σκυρόδεμα τεσσάρων περίπου μέτρων (*Λεμονίδης, 1994*).

Στην πρώτη λεκάνη ήταν εγκαταστημένες οι δεξαμενές D1, D2, D3, D4, στη δεύτερη λεκάνη οι δεξαμενές D5, D6, στην Τρίτη οι δεξαμενές D7, D8, D9, και στην τέταρτη οι δεξαμενές D10, D11, D12, οι οποίες και διαχωρίζονται μεταξύ τους με αναχώματα και τσιμεντένια τοιχώματα.

Γύρω και μέσα στις εγκαταστάσεις της Jet Oil το έδαφος ήταν πολύ άσχημο. Ήταν σαν βάλτος και κυρίως δεν υπήρχαν διάδρομοι που θα επέτρεπαν στα πυροσβεστικά οχήματα να πλησιάσουν στο τόπο της πυρκαγιάς.

3.4.2.3 Τα υλικά καύσης

Καθοριστικό ρόλο στην επίδραση του φαινομένου της φωτιάς παίζει η φύση και η ποσότητα των υλικών που καίγονται κατά τη διάρκεια ενός ατυχήματος. Τα χαρακτηριστικά της φωτιάς έχουν άμεση σχέση με το υλικό το οποίο καίγεται αλλά και με τα καυσαέρια που παράγονται.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση στις εγκαταστάσεις της Jet Oil το είδος του ατυχήματος ανήκει κυρίως στην κατηγορία φωτιάς δεξαμενών (tank fire) ωστόσο σε τέτοιου είδους μεγάλα βιομηχανικά ατυχήματα εμφανίζεται το φαινόμενο συνδυασμού φωτιάς και έκρηξης. Έτσι για να αποκτήσει κάποιος μια σφαιρική άποψη αλλά και ουσιαστική για την εκτίμηση των επιπτώσεων από ανεπιθύμητα περιστατικά, χρειάζεται να καταστρωθούν σενάρια ατυχημάτων.

Έτσι διακρίνουμε τα εξής σενάρια:

- ➔ Πυρκαγιά σε πλωτή δεξαμενή
- ➔ Πυρκαγιά σε κωνική δεξαμενή

Με τον ορισμό «**Πυρκαγιά σε πλωτή δεξαμενή**» χαρακτηρίζεται κάθε φωτιά που έχει εκδηλωθεί επί της οροφής της δεξαμενής ή έχει σημείο εκδήλωσης τον περιφερειακό δακτύλιο αποστράγγισης και συγκέντρωσης καταλοίπων, με μετάδοση της φωτιάς και στο άνω μέρος του πλωτήρα.

Επισημαίνεται ότι κάθε ανάφλεξη εντός του αναχώματος της πλωτής δεξαμενής που δεν μεταδίδεται και στην ίδια, δεν χαρακτηρίζεται σαν πυρκαγιά δεξαμενής, είναι εύκολη περίπτωση και σε σύντομο χρονικό διάστημα μπορεί να τεθεί υπό έλεγχο.

Πάντως μικροφωτιές εντός της λεκάνης μεταδίδονται πολύ ευκολότερα προς τις πλωτές δεξαμενές λόγω των πτητικών προϊόντων σε σχέση με τις αντίστοιχες κωνικές δεξαμενές.

Γενικά οι πυρκαγιές σε πλωτές δεξαμενές δεν θεωρούνται από τις σοβαρότερες περιπτώσεις περιστατικών, χαρακτηρίζονται Β' κατηγορίας και μόνο ελάχιστος αριθμός περιστατικών εξελίσσεται σε περιστατικά Γ' κατηγορίας.

Για να εκδηλωθεί πυρκαγιά σε δεξαμενή πλωτής οροφής είναι αναγκαία η σημαντική ποσότητα πτητικών εύφλεκτων ατμών εκ του περιεχομένου, που διαφεύγουν μέσω του συστήματος της περιφερειακής φραγής.

Η μορφή τελικά που μπορεί να έχει ή τελικά να λάβει μια φωτιά σε πλωτή δεξαμενή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Αυτοί έχουν σχέση με την καλή κατάσταση και καλής λειτουργία του μηχανολογικού εξοπλισμού της οροφής, της φραγής και της γείωσης. Ειδικότερα:

- ➔ Στην πλέον συνηθισμένη περίπτωση η φωτιά με περιορισμένες διαστάσεις εντοπίζεται σε 1 ή 2 περιφερειακά σημεία μεταξύ κελύφους και οροφής, εκεί όπου υπάρχει πρόβλημα σωστής φραγής.
- ➔ Σε σοβαρότερη περίπτωση, πέραν των περιφερειακών εστιών στο σύστημα φραγής, υπάρχει και τοπική ανάφλεξη στο κέντρο της οροφής από συγκεντρώσεις υγρών καυσίμων λόγω διαρροών ή φθοράς της μεταλλικής επιφανείας.
- ➔ Τέλος η πολύ σπάνια αλλά και σοβαρότερη περίπτωση είναι της βύθισης του πλωτήρα και ανάφλεξης όλης της επιφάνειας του περιεχομένου. Η βύθιση μπορεί να προκληθεί από εμπλοκή των οδηγών ολίσθησης της πλωτής οροφής και πλάγιασμα αυτής. Η απότομος απεμπλοκή λόγω βάρους είναι πιθανόν να προκαλέσει τη βίαιη κρούση των μετάλλων που έχει ως συνέπεια την πρόκληση σπινθήρα ανάφλεξης.

Στις δεξαμενές πλωτής οροφής συνήθως αποθηκεύονται προϊόντα εύφλεκτα και πτητικά που ενδεχομένως δημιουργούν τις προϋποθέσεις σχηματισμού εκρηκτικού μίγματος. Η χρήση τέτοιων δεξαμενών ενδείκνυται για αποθήκευση βενζινών, νάφθας, αργού πετρελαίου και άλλων υγρών καυσίμων με παρόμοιες ιδιότητες.

Η πράξη έχει αποδείξει ότι η χρονική διάρκεια του περιστατικού εξαρτάται βασικά από την μορφή εκδήλωσης και λιγότερο από το είδος του καυσίμου και την έκταση του μηχανολογικού εξοπλισμού της πλωτής οροφής. Έτσι αναφέρεται:

- ➔ Απλά περιστατικά τοπικής ανάφλεξης σε σημεία του μονωτικού δακτυλίου απαιτούν χρόνο κατάσβεσης 20 – 30 min.
- ➔ Σύνθετα περιστατικά με περιφερειακή ανάφλεξη σε σημεία του μονωτικού δακτυλίου αλλά και με εστίες από πρόσθετες αναφλέξεις στο κέντρο της οροφής, απαιτούν χρόνους της τάξεως 1,5 – 2 h.
- ➔ Περιστατικό με συμμετοχή όλου του περιεχομένου της δεξαμενής στην οποία έχει προηγηθεί βύθιση της οροφής, δημιουργεί προϋποθέσεις μεγάλης χρονικής διάρκειας για καταστολή με παράλληλο κίνδυνο κατάρρευσης των τοιχωμάτων

του κελύφους και επέκτασης της φλεγόμενης επιφάνειας τουλάχιστον μέσα στην λεκάνη προστασίας. Εκτιμάται ότι περιστατικό πυρκαγιάς αυτού του τύπου σε μια από τις δεξαμενές πλωτής οροφής ενός Διυλιστηρίου χωρητικότητας 120000 m³ μπορεί να διαρκέσει περισσότερο από 3 ημέρες. Ο λόγος της μεγάλης χρονικής διάρκειας αυτού του περιστατικού είναι ότι οι δεξαμενές πλωτής οροφής δεν διαθέτουν συστήματα κατάσβεσης της φωτιάς για τις περιπτώσεις βύθισης της οροφής παρά μόνο για πυρκαγιές του δακτυλίου φραγής. Ωστόσο σύμφωνα με τους ισχύοντες ελληνικούς και διεθνείς κανονισμούς οι δεξαμενές πλωτής οροφής θεωρούνται ασφαλείς δεξαμενές και δεν προβλέπουν την εγκατάσταση πυροσβεστικών συστημάτων για αυτού του είδους τις πυρκαγιές (ΠΕΤΡΟΛΑ, 1997).

Με τον ορισμό «*Πυρκαγιά σε κωνική δεξαμενή*» χαρακτηρίζεται κάθε φωτιά που έχει εκδηλωθεί σε κωνική δεξαμενή της οποίας το περιεχόμενο συμμετέχει στην πυρκαγιά ή είναι το κύριο προϊόν καύσης .

Αντίθετα μικροφωτιά στον γύρω χώρο ή στην λεκάνη της δεξαμενής, χωρίς διάδοση στο περιεχόμενο της δεξαμενής, δεν θεωρείται πυρκαγιά δεξαμενής.

Οι τελευταίες είναι από τις απλές περιπτώσεις και εύκολα αντιμετωπίζονται με τα συμβατικά μέσα καταπολέμησης.

Επειδή στις κωνικές δεξαμενές αποθηκεύονται βαρύτεροι υδρογονάνθρακες όπως για παράδειγμα ντίζελ, μαζούτ κ.λ.π. με υψηλό σημείο ανάφλεξης η περίπτωση εκδήλωσης περιστατικού είναι αρκετά σπάνια.

Για να αναπτυχθεί πυρκαγιά σε δεξαμενή κωνικής οροφής θα πρέπει να υπάρχουν οι κατάλληλες προϋποθέσεις δημιουργίας αναφλέξιμου μίγματος εκρηκτικών αερίων στον χώρο μεταξύ στάθμης και οροφής και παράλληλα να υπάρξει αιτία ανάφλεξης.

Για να εμφανισθεί ανάφλεξη στο περιεχόμενο της δεξαμενής απαιτείται σχηματισμός εκρηκτικού μίγματος 2 – 9% ως προς τον αέρα.

Η φωτιά σε κωνική δεξαμενή, όταν υπάρξουν οι κατάλληλες συνθήκες, έχει δύο στάδια εξέλιξης. Στο πρώτο, υπάρχει εσωτερική καύση και εμφάνισης φλεγόμενης γλώσσας από τα εξαεριστικά και τα δειγματοληπτικά ανοίγματα της δεξαμενής, ενώ στο δεύτερο που αναμένεται σε σύντομο χρονικό διάστημα προβλέπεται η μερική ή ολική εκτίναξη της οροφής υπό μορφή ισχυρής έκρηξης.

Οπότε συνεπάγεται η φωτιά θα λάβει διαστάσεις και θα εξαπλωθεί σε όλη την επιφάνεια του περιεχόμενου με παράλληλη έκλυση μαύρων καπνών. Η ταχύτητα καύσης του περιεχομένου άρα και η ένταση της πυρκαγιάς, είναι αποκλειστικά

συνάρτηση του ποσοστού ανοίγματος της οροφής σε σχέση με την όλη επιφάνεια της δεξαμενής.

Το περιστατικό αυτό έχει την μορφή μιας μεγάλης απλής φωτιάς περιορισμένης εντός του κελύφους της δεξαμενής, που έχει όμοια χαρακτηριστικά για όλα τα καιγόμενα αμιγή προϊόντα. Αντίθετα αν το περιεχόμενο είναι αργό πετρέλαιο ή μίγματα μαύρων προϊόντων, τότε πιθανόν θα ακολουθήσει το φαινόμενο αναβρασμός ή Boil Over (*E.A.A.A., 1993*).

Αναβρασμός δεξαμενής (Boil Over): Είναι δυνατό να συμβεί είτε σε δεξαμενή πλωτής οροφής, όταν η οροφή έχει βυθιστεί, είτε σε δεξαμενή κωνικής οροφής όταν αυτή περιέχει αργό πετρέλαιο με σημαντικές ποσότητες νερού.

Το φαινόμενο εμφανίζεται μετά από κάποιες ώρες (8-36) ανάλογα με το ύψος του περιεχομένου και με την ποσότητα νερού που περιέχεται στον πυθμένα της δεξαμενής.

Η σταδιακή καύση των ελαφρών συστατικών, το χαμήλωμα της στάθμης και η δημιουργία προς τα κάτω ενός θερμού μετώπου καυσίμου, υπερθερμαίνουν το νερό στον πυθμένα, αυξάνοντας παράλληλα την πίεση του ατμού που παράγεται, με αποτέλεσμα όταν υπερνικηθεί η υπερκείμενη πίεση να γίνει απότομη εκτίναξη (έκρηξη) του περιεχομένου.

Τότε η μεγάλη μάζα του ατμού από ποσότητες νερού της τάξης των 1000 m³ εκτινάσσεται και συμπαρασύρει καύσιμο και μεταλλικά εξαρτήματα, με συνέπεια να εμφανίζεται πάνω από την δεξαμενή έντονη καύση με εκρηκτικά χαρακτηριστικά, που διασκορπίζονται στο χώρο και διαδίδουν την ανάφλεξη. Η ένταση του φαινομένου δεν μπορεί να προβλεφθεί ακριβώς. Είναι ωστόσο έντονη και μπορεί να επηρεάσει μια περιοχή ακτίνας αρκετών δεκάδων και ανάλογα με την δεξαμενή εκατοντάδων μέτρων.

Υπάρχουν ιστορικά στοιχεία από σχετικά ατυχήματα (boil over) σε δεξαμενής κωνικής οροφής με ακτίνα επίδρασης 300 μέτρα, τα οποία δείχνουν ότι μπορεί να είναι εξαιρετικά βίαιο φαινόμενο με καταστρεπτικά αποτελέσματα.

Οι ενδείξεις για επικείμενο αναβρασμό είναι:

1. Διαύγαση της φλόγας πάνω από τη δεξαμενή (οι φλόγες γίνονται λευκές λόγω του διαφεύγοντος ατμού).
2. Δημιουργία συριγμού από την διαφυγή του ατμού που συνεχώς γίνεται πιο έντονος.

Το συνολικό ποσό καυσίμου που μπορεί να εμπλακεί σε μία τέτοια ανάφλεξη βασικά είναι συνάρτηση της μέγιστης ποσότητας που μπορεί να περιέχεται στη δεξαμενή με το περιστατικό.

Ωστόσο σε ένα πραγματικό περιστατικό πυρκαγιάς σε κωνική δεξαμενή το ποσό του περιεχομένου που συμμετέχει στην καύση εξαρτάται από την διάμετρο της δεξαμενής, το ύψος της στάθμης, αλλά κυρίως από το ποσοστό του ανοίγματος της οροφής σε σχέση με την όλη επιφάνεια αυτής.

Στην πρώτη φάση της εκδήλωσης ανάφλεξης σε δεξαμενές κωνικής οροφής δεν αναμένονται έντονες και καταστροφικές επιπτώσεις. Η φωτιά θα είναι περιορισμένη στον εσωτερικό χώρο μεταξύ στάθμης και οροφής.

Σε δεύτερη φάση και εφόσον δημιουργηθούν κατάλληλες προϋποθέσεις για εκτίναξη της οροφής τότε θα δημιουργηθεί ελαφρό ωστικό κύμα προς τα άνω χωρίς άμεσες επιπτώσεις και εκτίναξη φλεγόμενου περιεχομένου και μεταλλικά ελάσματα.

Οι χρόνοι των διαφόρων φάσεων μιας τέτοιας πυρκαγιάς είναι αρκετά γνωστοί και υπάρχουν πολλά στοιχεία για τον προσδιορισμό τους. Συνήθως μετά την εκδήλωση φωτιάς σε κωνική δεξαμενή αμέσως ή μετά σε λίγα λεπτά αναμένεται η εκτίναξη της οροφής.

Ωστόσο υπάρχει και ένα μικρό ενδεχόμενο η φωτιά να σβήσει μόνη της, εφόσον ακόμη δεν έχει εκτιναχθεί η οροφή και εφόσον η φωτιά δεν έχει μόνιμη αιτία διατήρησης. Η κατάσβεση θα γίνει από τους αποβαλλομένους καπνούς που θα παρεμποδίζουν την είσοδο του αέρα.

Ειδικότερα οι προδιαγραφές προτείνουν χρόνους καταπολέμησης της φωτιάς:

- Για επιφανειακή αφροκάλυψη με παράλληλη ψύξη : max 30 min.
- Για εισαγωγή αφρού στον πυθμένα με παράλληλη ψύξη : max 55 min.

Επομένως με σωστή ψύξη και αφροκάλυψη υπάρχουν χρονικά περιθώρια έως και 60 min για την κατάσβεση της πυρκαγιάς. Εάν όμως η προσπάθεια κατάσβεσης αποτύχει, τότε η πυρκαγιά θα διαρκέσει τόσες ώρες όσες χρειασθεί να καεί το περιεχόμενο (25 cm ανά 1 ώρα) της δεξαμενής. Οι χρόνοι αυτοί συνήθως κυμαίνονται από 1 έως 3 ημέρες.

Παρακάτω στον **Πίνακα 3-4** παρατίθενται αναλυτικά στοιχεία των δεξαμενών στις εγκαταστάσεις της Jet Oil. Και πιο συγκεκριμένα περιγράφουν το περιεχόμενο, την χωρητικότητα και την αποθηκευμένη ποσότητα της κάθε δεξαμενής

Πίνακας 3-4: Στοιχεία για τις δεξαμενές κατά τη διάρκεια του ατυχήματος.

Δεξαμενή	Περιεχόμενο	Χωρητικότητα	Αποθηκευμένη Ποσότητα
D1	Fuel Oil	17900 m ³	11294 m ³
D2	Fuel Oil	10350 m ³	9792 m ³
D3	Empty	5650 m ³	-
D4	Diesel Oil	1450 m ³	420 m ³
D5*	Fuel Oil	10350 m ³	9661 m ³
D6	Fuel Oil	10350 m ³	4698 m ³
D7	Fuel Oil	17900 m ³	4871 m ³
D8	Crude Oil	17900 m ³	14957 m ³
D9	Naphtha	10350 m ³	20 m ³
D10*	Crude Oil	62400 m ³	51053 m ³
D11*	Naphtha	3450 m ³	Μικρή ποσότητα
D12*	Naphtha	3450 m ³	20 m ³
		Συνολικά: 171500 m ³	

* Οι δεξαμενές που δεν καταστράφηκαν

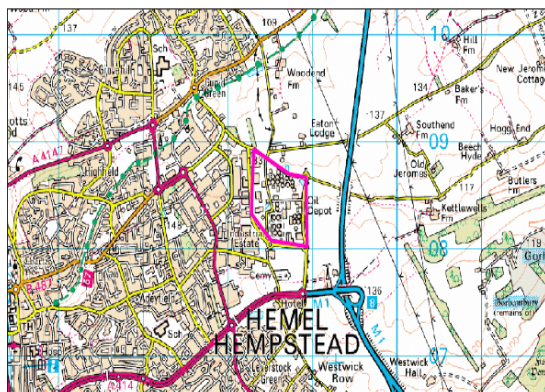
3.4.2.4 Περιβαλλοντικές συνθήκες και επιπτώσεις από το ατύχημα

Εξαιτίας της παλαιότητας του ατυχήματος δεν υπάρχουν αναλυτικά στοιχεία για τις περιβαλλοντικές αλλά και μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούσαν εκείνη την περίοδο. Ωστόσο από αναφορές, περιγράφεται ότι κατά την περίοδο του ατυχήματος επικρατούσαν δυνατοί άνεμοι που έκαναν πολύ δύσκολο το έργο της κατάσβεσης. Επίσης το ίδιο μήκος κύματος επικρατεί και για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του ατυχήματος αφού αν εξαιρέσει κανείς κάποιες δηλώσεις κάποιων ειδικών, δεν υπάρχουν στοιχεία μετρήσεων που να καταγράφουν τοξικούς ρύπους στη γύρω περιοχή.

3.5 Buncefield Oil Storage Depots, Hertfordshire, U.K.

Το ατύχημα της 11 Δεκεμβρίου 2005 στις εγκαταστάσεις αποθήκευσης καυσίμων στο Buncefield (*Εικόνες 3-8, 3-9*) αποτελεί το μεγαλύτερο ατύχημα πυρκαγιάς σε

εγκαταστάσεις αποθήκευσης καυσίμων στην Ευρώπη μετά από τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο. Τα στοιχεία που αναφέρονται παρακάτω για το ατύχημα έχουν προέρθει από συλλογή άρθρων από μεγάλες εφημερίδες της Αγγλίας (*The Guardian*, *The Times*, *The Independent*) καθώς και από Μ.Μ.Ε όπως το κανάλι BBC κ. α. που είχαν αποκλειστική ανταπόκριση για το συμβάν εκείνη της περιόδου.



Εικόνα 3-8: Χάρτης της περιοχής του ατυχήματος όπου στο ροζ περίγραμμα είναι το HOSL (HSE, Buncefield MIIB, 2006c).



Εικόνα 3-9: Οι εγκαταστάσεις και η περιοχή πριν το ατύχημα στο HOSL (HSE, Buncefield MIIB, 2006a).

Ωστόσο η σημαντικότερη και πιο αξιόπιστη πηγή για την περιγραφή και την ανάλυση του ατυχήματος στο Buncefield είναι οι εκθέσεις προόδου που έχουν γίνει μέχρι στιγμής μετά από διαταγή της κυβέρνησης της Μ. Βρετανίας. Την διεξαγωγή των ερευνών ανέλαβε το HSE & EA (Health and Safety Executive και Environment Agency). Έτσι μετά από μερικούς μήνες άρχισαν να διαφαίνονται τα πρώτα αποτελέσματα των ερευνών.

Τα πρώτα αποτελέσματα των ερευνών εμφανίστηκαν με τη δημοσίευση της πρώτης έκθεσης προόδου στις 21 Φεβρουαρίου 2006, σύμφωνα με την οποία αναφέρονται κάποια στοιχεία για την περιγραφή του γεγονότος, την τοπογραφία του ατυχήματος και τις πρώτες ενέργειες που έκαναν το HSE και η EA. Ειδικότερα αναλύθηκε η φύση της έκρηξης και της φωτιάς που αναπτύχθηκε σύμφωνα με ανθρώπινες μαρτυρίες αλλά και από τις κάμερες ασφαλείας που υπήρχαν στον τόπο του ατυχήματος. Ωστόσο είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η συγκεκριμένη έκθεση προόδου δεν αναφέρει τίποτα για την πρωτογενή αιτία που προκάλεσε το ατύχημα (HSE, Buncefield MIIB, 2006a).

Έπειτα από δύο μήνες στις 11 Απριλίου 2006 δημοσιεύεται η δεύτερη έκθεση προόδου για το ατύχημα. Η συγκεκριμένη αναφορά επικεντρώνεται στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που ενδεχομένως να υπάρξουν από τη διαρροή καυσίμων

και του ειδικού αφρού κατάσβεσης κατά τη διάρκεια του ατυχήματος (**HSE, Buncefield MIB, 2006b**).

Τέλος στις 9 Μαΐου δημοσιεύτηκε η τρίτη έκθεση προόδου, σύμφωνα με την οποία γίνεται αναφορά για τις εκρήξεις, τις φωτιές αλλά και τα συμπεράσματα από το ατύχημα. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι σε αυτή την αναφορά παρουσιάζονται πιθανά αίτια που προκάλεσαν το ατύχημα αλλά και οι πιθανές πηγές ανάφλεξης που προκάλεσαν τις εκρήξεις και τις φωτιές (**HSE, Buncefield MIB, 2006c**).

Παρακάτω θα γίνει εκτενής ανάλυση και αναφορά για το ατύχημα σύμφωνα πάντα με τα στοιχεία που έχουν συγκεντρωθεί από όλες τις παραπάνω πηγές που αναφέρθηκαν.

Επίσης οι αποθηκευτικοί χώροι των εγκαταστάσεων του Buncefield για λόγους ευκολίας θα αναφέρονται ως **HOSL (Hertfordshire Oil Storage Ltd)**.

3.5.1 Περιγραφή ατυχήματος

Πριν αρχίσει η χρονική περιγραφή των γεγονότων που οδήγησαν στο ατύχημα, θα ήταν καλό να αναφερθεί ότι οι εγκαταστάσεις του HOSL τροφοδοτούνται με καύσιμα από τρία ιδιαίτερα συστήματα αγωγών :

1. Ο πρώτος αγωγός διαμέτρου 10'' (Finaline) ξεκινάει από το Δωλιστήριο πετρελαίου Lindsay στο Humberside και καταλήγει στο δυτικό τμήμα του HOSL.
2. Ο δεύτερος αγωγός διαμέτρου 10'' (M/B North) ξεκινάει από το Merseyside via Blisworth και καταλήγει στις δεξαμενές τις BPA (British Pipelines Agency) στο δρόμο Cherry Tree.
3. Ο τρίτος αγωγός διαμέτρου 14'' ξεκινάει από το Thameside (T/K South) και καταλήγει στην κύρια περιοχή της BPA.

Το Σάββατο (10 Δεκεμβρίου 2005) γύρω στις 19:00 η δεξαμενή με αριθμό 912 στο Bund A (**Εικόνα 3-10**) του δυτικού τμήματος του HOSL γέμιζε με αμόλυβδη βενζίνη από τον αγωγό T/K South δυναμικότητας 550 m³/h. Κοντά στα μεσάνυχτα και μεταξύ αλλαγής Σαββάτου με Κυριακής (11 Δεκεμβρίου 2005) η ολοκλήρωση

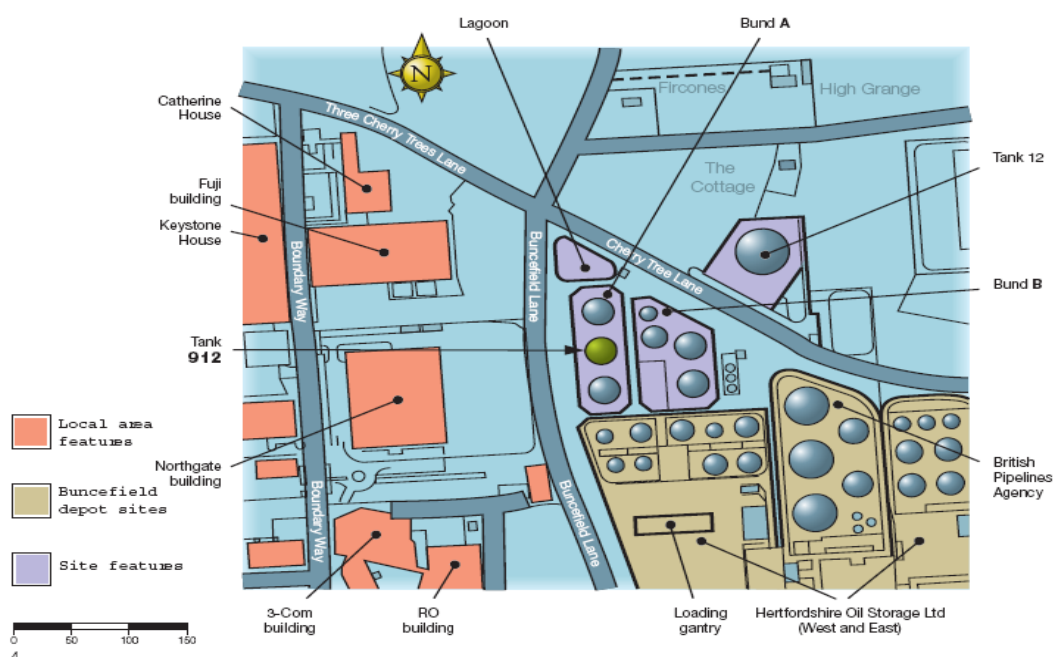
ελέγχου στα αποθέματα των αποθηκευτικών χώρων (stock) δεν έδειξε κάτι ύποπτο στη λειτουργία του HOSL.

Από τις 03:00 ο μετρητής στάθμης της δεξαμενής 912 καταγράφει δεδομένα χωρίς καμία αλλαγή στις ενδείξεις τιμών. Έτσι το γέμισμα της δεξαμενής 912 συνεχίζει με ροή $550 \text{ m}^3/\text{h}$. Σύμφωνα με τους υπολογισμούς για αυτή την ροή καυσίμου η δεξαμενή 912 θα έπρεπε μέχρι τις 05:20 να έχει γεμίσει και να έχει αρχίσει η υπερχειλίση του καυσίμου. Από τις 5:20 και μετά η συνεχής υπερχειλίση καυσίμου από την δεξαμενή και με τη βοήθεια του αέρα οδήγησε στο σχηματισμό πλούσιου μίγματος καυσίμου/αέρα που συγκεντρώθηκε στο Bund A.

Στις 05:38 η κάμερα ασφαλείας έδειξε ροή ατμού καυσίμου έξω από τη βορειοδυτική γωνία του Bund. Και το νέφος ατμού προσδιορίζεται σε πάχος περίπου 1 m. Στις 05:46, το νέφος ατμού είχε φτάσει στα 2m περίπου και άρχισε να μετακινείται έξω από το Bund A προς όλες τις κατευθύνσεις.

Μεταξύ 05:50 και 06:00, η ροή άντλησης του αγωγού στην δεξαμενή 912 ξαφνικά αυξήθηκε γύρω στα $890 \text{ m}^3/\text{h}$ με αποτέλεσμα να έχουμε δραστική αύξηση της ποσότητας που συγκεντρώνεται στο Bund A και μετατρέπεται σε νέφος ατμού.

Από τη 5:50 το νέφος ατμού αρχίζει να κινείται κοντά στη διασταύρωση των δρόμων Cherry Tree Lane και Buncefield, ακολουθώντας την τοπογραφία του εδάφους. Ενώ από τα δυτικά άρχιζε να εξαπλώνεται προς το Northgate House και στο χώρο πάρκιν αυτοκινήτων Fuji, καθώς και στο διπλανό Catherine House **Εικόνα 3-10 (HSE, Buncefield MIIB, 2006c)**.



Εικόνα 3-10: Διάγνωση των εγκαταστάσεων HOSL (HSE, Buncefield MIIB, 2006c).

Από την ανάλυση των στοιχείων που κατέγραψαν οι σειсмоγράφοι, της Βρετανικής Γεωλογικής Υπηρεσίας προκύπτει ότι η κύρια έκρηξη συνέβη στις 06:01:32. Μαρτυρίες τόσο ανθρώπων όσο και αναφορές από τα ΜΜΕ αναφέρουν μια μεγάλη έκρηξη και στη συνέχεια ένα αριθμό μικρότερων. Οι άλλες εκρήξεις που δεν ανιχνεύθηκαν σεισμικά, επιβεβαιώνουν ότι ήταν πολύ μικρότερες σε σχέση με την αρχική. Η πρώτη των μικρότερων σε ένταση εκρήξεων ήταν μερικά λεπτά μετά την κύρια έκρηξη και πιθανότατα όλα συνέβησαν μέσα σε μισή ώρα.

Η δύναμη των εκρήξεων ήταν τόσο μεγάλη που είχε ως άμεσο αποτέλεσμα την εμφάνιση μεγάλης πυρκαγιάς που έλαβε μέρος και στις 20 δεξαμενές της εγκατάστασης (*Εικόνες 3-11, 3-12*). Κατά τη διάρκεια του ατυχήματος συνέβη ο τραυματισμός 43 ανθρώπων ευτυχώς όχι σοβαρά και το σημαντικότερο δεν υπήρχαν ανθρώπινες απώλειες. Σημαντικές ζημιές προκλήθηκαν σε εμπορικές εγκαταστάσεις και κατοικίες της περιοχής, ενώ ταυτόχρονα μεγάλο μέρος της περιοχής γύρω από την εγκατάσταση εκκενώθηκε. Ο αριθμός των ανθρώπων που εκκενώθηκαν έφτασε τους 2000 ενώ παράλληλα πολλά μέρη του αυτοκινητόδρομου M1 έκλεισαν (*HSE, Buncefield MIIB, 2006a*).



Εικόνες 3-11, 3-12: Το μέγεθος της καταστροφής και η δύναμη της πυρκαγιάς που έχει επεκταθεί σε 20 δεξαμενές (*HSE, Buncefield MIIB, 2006a*).

3.5.2 Ανάλυση των παραμέτρων του ατυχήματος

Μετά την περιγραφή του ατυχήματος είναι αναγκαίο να εξεταστούν οι παράμετροι εκείνοι που έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη του ατυχήματος. Ωστόσο στη συγκεκριμένη περίπτωση θα αναλυθούν μόνο η διαρροή (υπερχείλιση και δημιουργία νέφους ατμού, οι πηγές ανάφλεξης και οι περιβαλλοντικές συνθήκες.. Στο

Παράρτημα I στο τέλος της εργασίας υπάρχουν εικόνες για το ατύχημα και το πλήρες χρονοδιάγραμμα των γεγονότων και των μέτρων που ελήφθησαν.

3.5.2.1 Διαρροή (υπερχείλιση) και δημιουργία νέφους ατμών καυσίμου

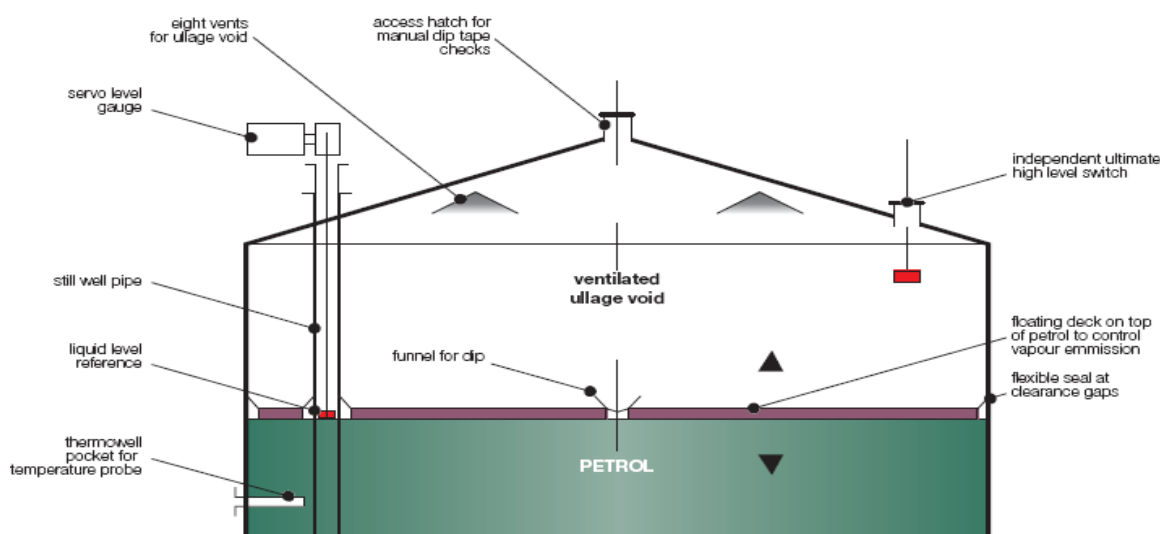
Σύμφωνα με τα στοιχεία που έχουν καταγράψει οι κάμερες ασφαλείας εμφανίζεται νέφος ατμών καυσίμου από το Bund A του δυτικού τμήματος του HOSL. Την ώρα του ατυχήματος στις 06:00 υπήρχε μεταφορά καυσίμων μέσω των τριών αγωγών που εφοδιάζουν με καύσιμα το χώρο του HOSL.

Ο πρώτος αγωγός (FINALINE) μετέφερε αμόλυβδη βενζίνη με ροή δυναμικότητας 220 m³/h στη δεξαμενή 915 στο δυτικό τμήμα του HOSL (που ανήκει και αυτή μέσα στο Bund A).

Ο δεύτερος αγωγός N/B μετέφερε ντίζελ με ροή δυναμικότητας 400 m³/h στη δεξαμενή 908 που ανήκει στο Bund D.

Ο τρίτος αγωγός T/K μετέφερε αμόλυβδη βενζίνη με μια ροή περίπου της τάξης των 890 m³/h στην δεξαμενή 912 (*HSE, Buncefield MIIB, 2006c*).

Παρόλο που οι έρευνες συνεχίζονται για τον προσδιορισμό της απελευθέρωσης του καυσίμου, αυτό που υιοθετείται από την παρούσα έρευνα είναι ότι η απελευθέρωση του καυσίμου προήρθε από τη δεξαμενή 912. Οπότε γίνεται κατανοητό ότι χρειάζεται να γίνει μελέτη της συμπεριφοράς λειτουργίας της δεξαμενής, όπως απεικονίζεται παρακάτω η **Εικόνα 3-13**.



Εικόνα 3-13: Βασικό σχεδιάγραμμα της δεξαμενής 912 (*HSE, Buncefield MIIB, 2006c*).

Ο τύπος της δεξαμενής 912 ανήκει στην κατηγορία των δεξαμενών πλωτής οροφής (floating deck tank) όπου εκτός από την εξωτερική οροφή της δεξαμενής υπήρχε και μια οροφή μέσα στη δεξαμενή η οποία ανεβοκατεβαίνει ανάλογα με τη στάθμη του καυσίμου, έτσι ώστε να αποφεύγεται στο ελάχιστο η τάση ατμών του καυσίμου *Εικόνα 3-14 (HSE, Buncefield MIIB, 2006c)*.

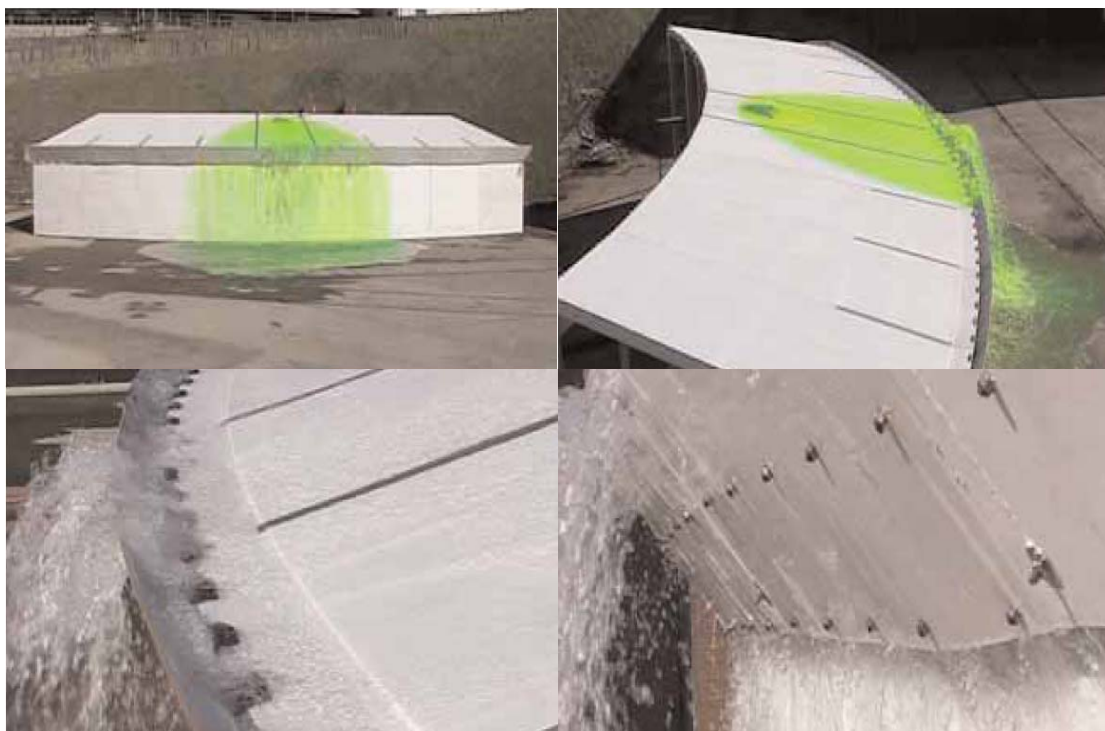


Εικόνα 3-14 : Λεπτομέρειες δεξαμενής 912 αμέσως μετά την κατασκευή της (HSE, Buncefield MIIB, 2006c).

Το HSE (*HSE, Buncefield MIIB, 2006c*) προκειμένου να μπορέσει να προσομοιώσει την υπερχειλίση καυσίμου από τη πλωτή δεξαμενή 912 κατασκεύασε ένα πραγματικό μοντέλο που αντιστοιχούσε στο 1/8 της κορυφής της δεξαμενής 912 συμπεριλαμβάνοντας και μία από τις οπές εξόδου που υπάρχουν στην κορυφή. Η πρότυπη κατασκευή φτιάχτηκε στο HSL στο Buxton του Derbyshire.

Επίσης περιλαμβάνει ένα “deflector plate” στην άκρη της κορυφής της δεξαμενής. Το «αρχικό πιάτο» στην κορυφή της δεξαμενής σχεδιάστηκε για να παρέχει ψύξη με ψεκασμό νερού σε περίπτωση πυρκαγιάς. Το υγρό που τρέχει από την κορυφή της δεξαμενής χτυπά πάνω σε αυτό το πιάτο και κατευθύνεται πίσω και πάνω στη δεξαμενή (*Εικόνες 3-15 a, b, c, d*).

Τέλος στην πρότυπη αυτή κατασκευή έχουν εφαρμοστεί άντληση νερού με παροχή δυναμικότητας 550 m³/h όπου αντιστοιχεί στην πραγματική ροή που δεχόταν η δεξαμενή 912.



Εικόνες 3-15 a, b, c, d: Διαρροή καυσίμου από τις οπές στην κορυφή της δεξαμενής (HSE, *Buncefield MIIB, 2006c*).

3.5.2.2 Πηγές ανάφλεξης

Η ένταση του ορατού νέφους ατμών μέχρι την ώρα της κύριας έκρηξης ταυτίζεται με το εκτενές κάψιμο της περιοχής του ατυχήματος. Μέσα σε αυτήν την εκτενή περιοχή 80,000 m² πολλές ήταν οι πηγές που θα μπορούσαν να είχαν αναφλέξει το νέφος ατμού. Ωστόσο θα ήταν αρκετά ριψοκίνδυνο να ειπωθεί με βεβαιότητα η πηγή ανάφλεξης που προκάλεσε την έκρηξη. Παρόλα αυτά υπάρχουν αρκετά πιθανά σενάρια που μπορούν να δώσουν μια λογική εξήγηση (HSE, *Buncefield MIIB, 2006c*).

Τα ακριβή σημεία ανάφλεξης δεν είναι εμφανή, αλλά φαίνεται να είναι ένα κτήριο γεννητριών στο Northgate πάρκινγκ αυτοκινήτων και το αντλιοστάσιο στο δυτικό τμήμα του HOSL. Το σενάριο επιβεβαιώνεται από τα στοιχεία που υπάρχουν για μια εσωτερική έκρηξη στο αντλιοστάσιο που βρίσκεται στην ανατολική πλευρά του δυτικού τμήματος του HOSL. Θεωρείται ότι οι αντλίες πρέπει να είχαν αρχίσει την λειτουργία τους όταν ενεργοποιήθηκε ο συναγερμός πυρκαγιάς έκτακτης ανάγκης λίγο πριν από την έκρηξη και έτσι να ήταν η πηγή ανάφλεξης (HSE, *Buncefield MIIB, 2006c*).

Η άλλη περίπτωση είναι η εσωτερική έκρηξη στο χώρο της γεννήτριας έκτατης ανάγκης στα βόριο τμήμα του Northgate Building. Το γεγονός στηρίζεται στο ότι από τους αεραγωγούς εισαγωγής της γεννήτριας πετρελαίου θα μπορούσε να είχε εισχωρήσει το νέφος ατμού και να αναφλεχθεί.

3.5.2.3 Περιβαλλοντικές συνθήκες

Από τα μετεωρολογικά δεδομένα για δύο γειτονικές περιοχές κοντά στο ατύχημα, μπορεί κανείς να βγάλει συμπεράσματα για τις συνθήκες που επικρατούσαν. Οι περιοχές αυτές είναι το αεροδρόμιο του Luton και το Northolt. Ο καιρός το πρωί της 11 Δεκεμβρίου 2005 ήταν σταθερός, κρύος και με σχετική υγρασία σε ποσοστό 99%. Επιπλέον στο Northolt υπήρχε άπνοια ενώ στο Luton επικρατούσε άνεμος ταχύτητας 3 m/s μέχρι 10 λεπτά πριν την έκρηξη. Η θερμοκρασία αέρα στο Northolt ήταν -1.7 °C ενώ στο Luton 1 °C. Ενώ η κατάσταση της ατμόσφαιρας σύμφωνα με την μεθοδολογία του Pasquill κατατάσσεται στην κατηγορία F (*HSE, Buncefield MIB, 2006b*).

Ο προσδιορισμός των παραπάνω περιβαλλοντικών συνθηκών που επικρατούσαν την ώρα του ατυχήματος έπαιξαν βασικό ρόλο, διότι με βάση αυτές έγινε η προσομοίωση και η μέτρηση διασποράς των τοξικών ρύπων για όλη τη περίοδο του ατυχήματος. Αποτελέσματα των παραπάνω ενεργειών έχουν δημοσιευτεί σε τεχνική αναφορά (*AEAP/ENV/R/1784, 2006*), όπου υπάρχει πλήρης αναφορά σε μετρήσεις τοξικών ρύπων που επικρατούσαν στην περιοχή του ατυχήματος .

4

ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζεται το Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα (Α.Ο.Σ). Αρχικά ορίζεται το Α.Ο.Σ και περιγράφεται η τυρβώδης φύση του. Εν συνεχεία αναλύεται η δομή του Α.Ο.Σ και γίνεται εκτενής περιγραφή του αναμειγμένου στρώματος όπου διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη μελέτη του φυσικού προβλήματος. Έπειτα παρουσιάζονται οι κλάσεις ευστάθειας του Α.Ο.Σ και το καθεστώς που επικρατεί στην μοντελοποίηση διασποράς στην ατμόσφαιρα. Ολοκληρώνοντας με χρήσιμα συμπεράσματα για τα ποιοτικά μοντέλα ατμόσφαιρας και τους λόγους της συνεχιζόμενης μελέτης του Α.Ο.Σ τόσο για τον άνθρωπο όσο και για την ίδια την ύπαρξη της ζωής στον πλανήτη.



Εικόνες 4-1, 4-2: Οι παραπάνω εικόνες δείχνουν μορφές του Α.Ο.Σ. Και συγκεκριμένα απεικονίζουν διάφορες μορφές νεφών.

4. ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ (Α.Ο.Σ)

4.1 Εισαγωγή

Το μέρος της τροπόσφαιρας που επηρεάζεται άμεσα από την επιφάνεια της γης και αντιδρά στις διάφορες επιφανειακές μεταβολές σε μια κλίμακα χρόνου της μιας ώρας ή λιγότερο ονομάζεται *ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα (Α.Ο.Σ)*.

Στο οριακό στρώμα της ατμόσφαιρας υπάρχουν αρκετά υψηλοί ρυθμοί μεταφοράς μάζας, ορμής και θερμότητας και συντηρούνται από τυρβώδεις κινήσεις που έχουν την ίδια κλίμακα μήκους με το οριακό στρώμα.

Τα αίτια των παραπάνω επιφανειακών μεταβολών μπορεί να οφείλονται σε *(Λεμονίδης, 2003)*:

- Οριζόντια και κατακόρυφη μεταφορά θερμότητας.
- Δυνάμεις τριβής.
- Εξάτμιση.
- Εκπομπή ρύπων.
- Μεταβολή της ροής λόγω του εδάφους (τραχύτητα).
- Ρυθμό θέρμανσης ή ψύξης της επιφάνειας.

Όπως είναι γνωστό η κρίσιμη τιμή του αριθμού Reynolds υπερβαίνεται κατά πολύ, αν θεωρηθεί ως χαρακτηριστική κλίμακα μήκους το ύψος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος σε μία τυπική μέρα, περίπου 1000 m , και για ταχύτητα περίπου 10 m/s, τότε προκύπτει ότι:

$$Re = \frac{10 \cdot 10^3}{1.5 \cdot 10^{-5}} = 7 \cdot 10^8$$

Όπου επιβεβαιώνεται ο παραπάνω ισχυρισμός ότι το οριακό στρώμα είναι τυρβώδες. Το μοναδικό σημείο το οποίο μπορεί να ειπωθεί ότι η ροή είναι στρωτή, είναι τα τελευταία χιλιοστά πάνω από την επιφάνεια της γης *(Τσιώκου, 2003)*.

Εξαιτίας των παραπάνω φαινομένων και της τρισδιάστατης και τυρβώδους φύσης του, το Α.Ο.Σ είναι χρονικά και χωρικά μεταβαλλόμενο. Αυτό εξηγεί την ιδιότητα του οριακού στρώματος να έχει μικρότερο πάχος σε περιοχές υψηλής πίεσης απότι σε περιοχές με χαμηλή πίεση. Ως εκ τούτου η δομή του οριακού στρώματος είναι

διαφορετική το πρωί σε σχέση με άλλες ώρες της μέρας, αλλά εξίσου ποικίλει και στον αν η περιοχή είναι πεδινή ή παραθαλάσσια.

4.2 Δομή Ατμοσφαιρικού Οριακού Στρώματος (Α.Ο.Σ)

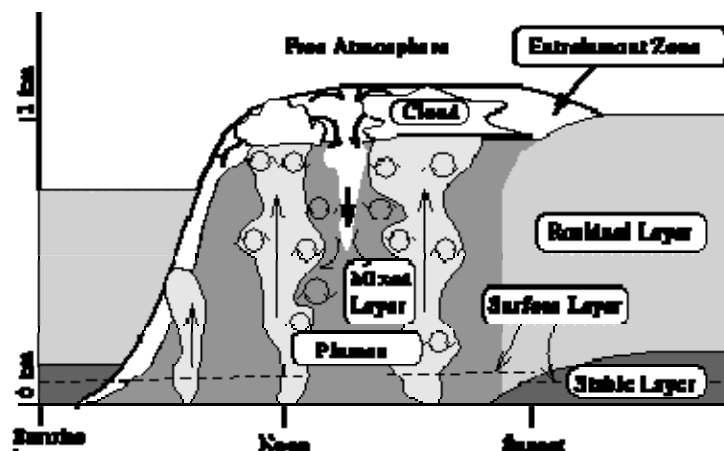
4.2.1. Εισαγωγή

Η δομή του Α.Ο.Σ αποτελείται από τα παρακάτω στρώματα (*Εικόνα 4-3*):

- Το αναμειγμένο στρώμα (mixed layer)
- Το υπολειπόμενο στρώμα (residual layer)
- Το νυχτερινό ευσταθές Α.Ο.Σ (stable nocturnal boundary layer)
- Το επιφανειακό στρώμα (surface layer)

Επιπλέον μπορεί να συναντήσει κάποιος και ένα από τα τρία δευτερεύοντα στρώματα:

- Τα στρώματα σύννεφων (cloud layer)
- Τις ζώνες αναστροφής (capping inversions)
- Τις ζώνες κατακράτησης (entrainment zones)



Εικόνα 4-3: Πρόχειρη περιγραφή δομής του Α.Ο.Σ.

4.2.2 Αναμειγμένο στρώμα (convective mixed layer)

Μισή ώρα μετά από την ανατολή του ηλίου λαμβάνει χώρα η ανάπτυξη του αναμειγμένου στρώματος που οφείλεται στην θέρμανση του εδάφους από την ηλιακή ακτινοβολία. Ενώ η στρωτή ροή του ευσταθούς νυχτερινού αέρα μετατρέπεται σε τυρβώδης. Κατά την αύξηση του υψομέτρου η συντήρηση της τύρβης μειώνεται εξαιτίας των διατμηματικών τάσεων και έτσι αυξάνεται η παραγωγή της.

Ταυτόχρονα το πάχος του στρώματος ανάμιξης αυξάνει εξαιτίας της θέρμανσης του εδάφους που συνεχίζεται κατά τη διάρκεια της ημέρας λόγω συναγωγής.

Η τύρβη στο στρώμα αυτό εξαρτάται από τις κινήσεις του αέρα που οφείλονται στις ανωστικές δυνάμεις λόγω διαφοράς πυκνότητας. Οι δύο βασικές συνιστώσες που δημιουργούν τις κινήσεις αυτές είναι η μεταφορά θερμότητας από τη θερμή επιφάνεια της γης και η ψύξη από ακτινοβολία από την κορυφή του στρώματος των νεφών. Ο πρώτος μηχανισμός δημιουργεί τμήματα θερμού αέρα που ανυψώνονται από το έδαφος ενώ ο δεύτερος τμήματα ψυχρού αέρα που κατεβαίνουν από τη κορυφή των νεφών. Παρόλο που οι ανωστικές δυνάμεις αποτελούν το κύριο μηχανισμό γένεσης της τύρβης στο στρώμα αυτό, εντούτοις συνήθως υπάρχει και βαθμίδα ανέμου που συμμετέχει στη παραγωγή της τύρβης. Ολοκληρώνοντας, η τύρβη που παράγεται τείνει να αναμίξει θερμότητα, υδρατμούς και ορμή ενιαία στη κατακόρυφη διεύθυνση (Τσιώκου, 2003).

Οι κατανομές του θερμοκρασιακού δυναμικού στο μισό του αναμειγμένου στρώματος είναι σχεδόν αδιαβατικές. Ενώ οι ταχύτητες του ανέμου είναι υπογεωστροφικές και παρουσιάζουν διευθύνσεις που τέμνουν τις ισοβαρείς με μικρή γωνία προς τη πλευρά των χαμηλών πιέσεων. Το μισό του αναμειγμένου στρώματος έχει σχεδόν σταθερή ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου, ενώ οι ταχύτητες ελαττώνονται πλησιάζοντας το έδαφος. Τέλος, η αναλογία υδρατμών-αέρα ελαττώνεται με το ύψος ακόμη και στο κεντρικό τμήμα του αναμειγμένου στρώματος. Κάτι τέτοιο αντανακλά την εξάτμιση του εδάφους, την υγρασία της βλάστησης από κάτω και την εισροή του ξηρότερου αέρα από πάνω. Η ελάττωση της υγρασίας στην κορυφή του στρώματος είναι έντονη και πολλές φορές χρησιμοποιείται με τις κατανομές της δυναμικής θερμοκρασίας για να προσδιοριστεί η κορυφή του αναμειγμένου στρώματος από ραδιοβολίσσεις (Λεμονίδης, 2003).

4.3 Κλάσεις ευστάθειας Α.Ο.Σ.

Για μια αρχική εκτίμηση των σ_y , σ_z στην περίπτωση απουσίας αξιόπιστων μετρήσεων τύρβης χρειάζεται πρώτα να καθοριστεί η κατηγορία ευστάθειας με μια κατά προτίμηση απλή μέθοδο, βασισμένη σε φθηνές και εύκολες μετρήσεις. Η πιο ευρύτερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος αναπτύχθηκε από τον Pasquill (*Pasquill, 1961*) και ελαφρώς τροποποιήθηκε από τον Turner (*Turner, 1967*). Έτσι κατόπιν συστηματικών συσχετίσεων που έχουν αναπτυχθεί μεταξύ μετεωρολογικών μετρήσεων ρουτίνας (ταχύτητα ανέμου στα 10 m από το έδαφος, ένταση ηλιακής ακτινοβολίας, νέφωση) και κατάσταση ευστάθειας ατμόσφαιρας, έχει προταθεί από τον Pasquill ο ακόλουθος **Πίνακας 4-1** κατηγοριών ευστάθειας.

Εάν είναι διαθέσιμες μετρήσεις τύρβης τότε είναι προτιμότερο να εκτιμηθούν οι σ_y και σ_z με βάση τα σ_θ , σ_ϵ που είναι οι τυπικές αποκλίσεις των διακυμάνσεων της κατεύθυνσης του ανέμου κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση αντίστοιχα (*Hanna et al., 1982*).

Πίνακας 4-1: Μετεωρολογικές συνθήκες καθορισμού κατηγοριών ευστάθειας κατά Pasquill.

Επιφανειακός άνεμος (m/s)	Ημερήσια ηλιοφάνεια			Νυχτερινές συνθήκες	
	Ισχυρή	Μέση	Ελαφρά	Ελαφρά νέφωση ή > 4/8 χαμηλά νέφη	Νέφωση ⁺⁺ , ≤ 3/8
< 2	A	A – B	B	G	G
2 – 3	A – B	B	C	E	F
3 – 4	B	B – C	C	D	E
4 – 6	C	C – D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Πηγή: (Gifford, 1976)

+ Εφαρμόσιμες για βαριά νέφωση, νύχτα ή μέρα.

++ Ορίζεται ως το τμήμα εκείνο του ουρανού πάνω από τον τοπικό ορίζοντα που καλύπτεται από σύννεφα.

Στον **Πίνακα 4-1** η ευστάθεια της ατμόσφαιρας χωρίζεται σε επτά κατηγορίες:

Κατηγορία A: Εξαιρετικά ευσταθής κατάσταση.

Κατηγορία B: Ενδιάμεσα ασταθής κατάσταση.

Κατηγορία C: Ελαφρά ασταθής κατάσταση.

Κατηγορία D: Ουδέτερη⁺.

Κατηγορία E: Ελαφρά ευσταθής κατάσταση.

Κατηγορία F: Ευσταθής κατάσταση.

Κατηγορία G: Πολύ ευσταθής κατάσταση ατμόσφαιρας.

Η μέθοδος του Pasquill δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα όταν χρησιμοποιείται για ανοιχτές και ημιαστικές περιοχές. Αυτό οφείλεται στην επίδραση της μεγαλύτερης τραχύτητας που υπάρχει στις πόλεις λόγω της ύπαρξης κτηρίων, καθώς και στο φαινόμενο της θερμικής νησίδας που αναπτύσσεται στις περιοχές αυτές. Η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ της ανοιχτής υπαίθρου και των αστικών περιοχών παρατηρείται σε ήρεμες νύχτες χωρίς σύννεφα όπου στην υπαίθρο υπάρχει πολύ σταθερή κατάσταση της ατμόσφαιρας ενώ στις πόλεις επικρατούν ελαφρώς ασταθείς ή ουδέτερες συνθήκες.

Ωστόσο ο πιθανός χρήστης χρειάζεται να είναι ενήμερος για τις περιπτώσεις που χρησιμοποιεί τις κατηγορίες Pasquill έξω από την περιοχή ισχύος τους όπως είναι για παράδειγμα η πολύπλοκη μορφολογία εδάφους, αποστάσεις μεγαλύτερες των 10 Km, ενεργά ύψη εκπομπών μεγαλύτερα των 100 m και πολλές άλλες περιπτώσεις. Για τις περιπτώσεις αυτές κρίνονται άμεσες μετρήσεις τύρβης ή θεωρητικές επεκτάσεις (Hanna et al., 1982).

Στον ακόλουθο **Πίνακα 4-2** φαίνονται οι διαφορές των κλάσεων ευστάθειας κατά Zanetti.

Πίνακας 4-2: Σύγκριση κλάσεων ευστάθειας κατά Zanetti.

Κλάση	Περίοδος 24 h	Βαθμίδα Θερμοκρασίας (°C/m)	Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Ύψος αναστροφής (m)
A	Ημέρα	-0,02	2,0	700
B	Ημέρα	-0,018	2,5	600
C	Ημέρα	-0,016	3,0	500
D	Ημέρα -Νύχτα	-0,01	5,0	500
E	Νύχτα	0,005	3,0	200
F	Νύχτα	0,028	2,0	200

Τέλος στον ακόλουθο **Πίνακα 4-3** συνοψίζονται οι διαφορές των κλάσεων ευστάθειας ως προς την πιθανή αλλαγή κατεύθυνσης του ανέμου, καθώς και την παραγόμενη κάθετη και οριζόντια διάχυση. Όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα οι ασταθείς συνθήκες είναι οι χειρότερες για τη περίπτωση της φωτιάς γιατί

περιλαμβάνουν τις μεγαλύτερες πιθανότητες αλλαγής της κατεύθυνσης ανέμου. Κάτι τέτοιο σημαίνει ότι δεν είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε με βεβαιότητα την πορεία του μετώπου της φωτιάς.

Για την διασπορά αερίων ρύπων, οι χειρότερες για τον ανθρώπινο πληθυσμό συνθήκες είναι οι Α και F. Στην περίπτωση της κλάσεως Α έχουμε υψηλή κατακόρυφη διάχυση με αποτέλεσμα οι μέγιστες συγκεντρώσεις ρύπων να είναι κοντά στις πηγές. Στη περίπτωση της κλάσεως F λόγω έλλειψης κατακόρυφης και παράπλευρης διάχυσης έχουμε ισχυρή οριζόντια διάχυση. Ως αποτέλεσμα οι ρύποι «ταξιδεύουν» πιο μακριά σε σχέση με την περίπτωση Α και επομένως οι μέγιστες συγκεντρώσεις εμφανίζονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις από τις πηγές εκπομπής (Λεμονίδης, 2003).

Πίνακας 4-3: Σύγκριση κλάσεων ευστάθειας με βάση τη κατεύθυνση ανέμου και τις παραγόμενες διαχύσεις.

Κλάση	Αλλαγή κατεύθυνσης ανέμου	Παραγόμενη κάθετη διάχυση	Παραγόμενη πλευρική διάχυση
A	> 135°	Πολύ υψηλή	Πολύ υψηλή
B	105° – 135°	Υψηλή	Υψηλή
C	75° – 105°	Μέτρια – Υψηλή	Μέτρια – Υψηλή
D	45° – 75°	Μέτρια – Χαμηλή	Μέτρια – Χαμηλή
E	15° – 45°	Χαμηλή	Χαμηλή
F	< 15°	Πολύ χαμηλή	Πολύ χαμηλή
G	< 15°	Πολύ χαμηλή	Υψηλή

4.4 Μοντέλα ποιότητας ατμόσφαιρας

4.4.1 Εισαγωγή

Η χρήση μοντέλων ποιότητας ατμόσφαιρας είναι ευρεία διαδεδομένη σε πολλές εφαρμογές. Για παράδειγμα, η παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα, η περιβαλλοντική αδειοδότηση βιομηχανικών μονάδων ή άλλων μείζονος σημασίας έργων (De Leeuw et al., 1995), η βραχυπρόθεσμη πρόγνωση των επιπέδων ρύπων, η διαδικασία λήψης αποφάσεων στην περίπτωση ατυχημάτων σε βιομηχανικές ή άλλες

εγκαταστάσεις και η διαχείριση του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος αποτελούν εφαρμογές των μοντέλων ποιότητας ατμόσφαιρας.

Επιπλέον η σωστή επιλογή του κατάλληλου μοντέλου δεν είναι μια εύκολη διαδικασία γιατί χρειάζεται να ληφθούν υπόψη σημαντικές παράμετροι για τη σωστή λειτουργία του. Όπως για παράδειγμα το είδος της εφαρμογής, τα χαρακτηριστικά των πηγών ρύπανσης, ποιος είναι ο ρύπος που πρώτιστα ενδιαφέρει, ποια θα είναι η διάρκεια της προσομοίωσης καθώς και ποιες θα είναι οι διεργασίες που θα πρέπει να συνεκτιμηθούν κ.α (*Μουσιόπουλος, 1997*).

Τέλος η αξιοπιστία των μοντέλων ποιότητας της ατμόσφαιρας παίζει καθοριστικό ρόλο, αν αναλογιστεί κανείς ότι από την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων εξαρτάται η αδειοδότηση βιομηχανικών μονάδων διότι υπάρχουν συγκεκριμένα όρια ρύπανσης που μπορεί να εκπέμπει κάθε βιομηχανία σύμφωνα πάντα με την εκάστοτε νομοθεσία. Ως εκ τούτου διαφορετικές εκτιμήσεις σημαίνει διαφορετικές αποφάσεις. Διαφορετική απόφαση σημαίνει μεταξύ των άλλων και διαφορετικό κόστος. Για τους παραπάνω λόγους είναι αναγκαίο τα μοντέλα να πληρούν ορισμένες προϋποθέσεις όπως (*Μπαρτζής, 1997*):

1. Να αντανakλούν όσο γίνεται περισσότερο το σημερινό επίπεδο τεχνογνωσίας.
2. Να έχουν αξιολογηθεί επαρκώς τόσο επιστημονικά όσο και με αξιόπιστα πειραματικά αποτελέσματα ή άλλα αξιόπιστα μοντέλα.
3. Να υπάρχει υιοθέτηση αντικειμενικών κανόνων για τον καθορισμό των παραμέτρων εισόδου του μοντέλου που σχετίζονται με την έκλυση, τις ανεμολογικές συνθήκες και τις συνθήκες εδάφους.
4. Να υπάρχουν σαφείς οδηγίες χρήσης ή επιλογής του μοντέλου. Είναι αναγκαίο να αναφερθεί ότι πολλές φορές οι χρήστες αυτών των μοντέλων δεν είναι εργαζόμενοι στον ακαδημαϊκό χώρο αλλά τεχνικοί επιστήμονες χωρίς μεγάλη εμπέθυνση στα φαινόμενα που διέπουν τη σύνθετη διαδικασία της διασποράς.

4.4.2 Κατηγορίες μοντέλων διασποράς

Η ταξινόμηση των μοντέλων διασποράς μπορεί να γίνει με βάση διάφορα κριτήρια όπως για παράδειγμα (*Μουσιόπουλος, 1997*):

1. Τη χωρική κλίμακα (τοπική, τοπική έως περιφερειακή, περιφερειακή έως ηπειρωτική, παγκόσμια).
2. Τη χρονική κλίμακα (μοντέλα επεισοδίων, στατιστικά μοντέλα για μακροχρόνιες περιόδους).
3. Τον χειρισμό των εξισώσεων μεταφοράς (Ουλεριανά και Λαγκρανζιανά μοντέλα).
4. Τη μεταχείριση διαφόρων διεργασιών (χημικός μετασχηματισμός, υγρή και ξηρή εναπόθεση).
5. Την πολυπλοκότητα της προσέγγισης (Γκαουσιανός τύπος, ημιεμπειρικά, μοντέλα, μοντέλα καννάβου).

Ωστόσο ο πιο επιστημονικός διαχωρισμός τους είναι με βάση την μαθηματική προσέγγιση. Έτσι διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες (*Μπαρτζής, 1997*):

1. Τα εμπειρικά μοντέλα
2. Τα Λαγκρανζιανά μοντέλα
3. Τα Ουλεριανά μοντέλα

4.4.2.1 Εμπειρικά μοντέλα

Τα εμπειρικά μοντέλα δεν χαρακτηρίζονται για την αυστηρή μαθηματική τους θεώρηση και έχουν εμπειρικό χαρακτήρα. Είναι η μεγαλύτερη κατηγορία μοντέλων για ρυθμιστικούς σκοπούς. Επιπλέον διακρίνονται κυρίως σε δύο κατηγορίες (*Μπαρτζής, 1997*):

1. Γκαουσιανά μοντέλα συνεχούς έκλυσης
2. Μοντέλα κουτιού (box models) για στιγμιαία έκλυση

Η μεθοδολογία και ο τρόπος χρήσης των Γκαουσιανών μοντέλων δίνεται από τον Οδηγό IAEA Safety Series 50-SG-S3. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημά τους έγκειται στην απλότητά τους και στους ελάχιστους χρόνους υπολογισμού. Τέλος η μεγάλη εμπειρία αυτών των μοντέλων τα κάνει αναντικατάστατα ιδιαίτερα στις απλές ατμοσφαιρικές συνθήκες με επαρκή συνοπτικό άνεμο, ομαλή τοπογραφία και

ομοιόμορφη χρήση γης. Για περισσότερες πληροφορίες μπορεί κανείς να ανατρέξει στο βιβλίο του Szepesi (*Szepesi, 1989*).

Τα μοντέλα κουτιού (Box models) έχουν κυρίως χρησιμοποιηθεί για τη διασπορά πυκνών αερίων (dense gases) με σκοπό την συμμόρφωση μιας βιομηχανικής εγκατάστασης που χρησιμοποιεί επικίνδυνες ουσίες με την οδηγία SEVESO της Ε.Ε. Υπάρχει μεγάλος αριθμός μοντέλων στη βιβλιογραφία που διαφέρουν ουσιαστικά στον τρόπο εκτίμησης των ταχυτήτων εισόδου του αέρα στο νέφος u_E και u_T , στην ταχύτητα μετακίνησης του νέφους (*Andronopoulos, 1992*).

4.4.2.2 Τα Ουλεριανά μοντέλα

Η μαθηματική προσέγγιση των συγκεκριμένων μοντέλων ακολουθεί τις συνήθεις διαφορικές εξισώσεις μεταφοράς συνεχούς μέσου ολοκληρωμένες στην κλίμακα χρόνου της τύρβης (Reynolds).

Η κατηγορία αυτή μοντέλων έχει την ευχέρεια να επιλύει σύνθετα προβλήματα με φαινόμενα ατμόσφαιρας και ρύπων. Ως εκ τούτου η πολυπλοκότητα του προβλήματος δημιουργεί μεγάλες απαιτήσεις σε υπολογιστική δύναμη και εμπειρία εφαρμογής του μοντέλου από το χρήστη. Παρόλο αυτά είναι η καλύτερη επιλογή για προβλήματα με επιφανειακές ή χωρικές πηγές και για μεγάλες χωρικές κλίμακες υπολογισμού (long range transport).

4.4.2.3 Τα Λαγκρανζιανά μοντέλα

Σε αυτή την κατηγορία μοντέλων η επίλυση του ρύπου χωρίζεται σε σωματίδια-πακέτα (parcels) με την συνολική έκλυση διαιρεμένη ομοιόμορφη ή ανομοιόμορφη χρονικά ή και χωρικά.

Κάθε σωματίδιο εκτελεί στο χώρο γενικά δύο κύριες κινήσεις:

- Την κίνηση της μέσης ροής
- Την κίνηση λόγω τυρβώδους ροής

4.4.3 Συμπεράσματα

Η σημασία των μοντέλων ποιότητας είναι αναμφισβήτητη για την εκτίμηση της ρύπανσης του αέρα αλλά και για την εφαρμογή στρατηγικών αντιρρύπανσης. Σε αρκετές εφαρμογές πλέον υπάρχουν και τα αντίστοιχα μοντέλα ενώ η ακρίβεια και η τεκμηρίωση των αποτελεσμάτων τους έχει φτάσει σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο. Ωστόσο όπως γίνεται σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις που υπάρχει προσομοίωση και μοντελοποίηση, ο χρήστης δεν έχει αντιληφθεί πλήρως τις δυνατότητες του μοντέλου.

Ο ξέφρενος ρυθμός ανάπτυξης της τεχνολογίας έχει σαν συνέπεια να δημιουργήσει μία τάση για ακριβέστερα μοντέλα αέριας ρύπανσης. Έτσι έγινε εφικτή η εγκατάλειψη του συμβατικού αυστηρού διαχωρισμού των ατμοσφαιρικών διεργασιών σε ξεχωριστές κλίμακες. Εντούτοις, η προσέγγιση πολλαπλών κλιμάκων είναι μονόδρομος ενώ ταυτόχρονα η τεχνική «τηλεσκοπικών μοντέλων είναι απαραίτητη έτσι ώστε μοντέλα που αναπτύχθηκαν για ξεχωριστές κλίμακες να μπορούν να συνδυασθούν για την περιγραφή διαδικασιών που εκτείνονται σε περισσότερες κλίμακες.

Τέλος με δεδομένο ότι η αποτίμηση μοντέλων δεν μπορεί να γίνει παρά μόνο με βάση πειραματικά δεδομένα αυξημένης ακρίβειας, απαιτείται η δημιουργία κατάλληλων βάσεων δεδομένων στοιχείων ρύπανσης σε περιοχές με έντονα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά, που θα προέρχονται από υψηλής ποιότητας μετρήσεις πεδίου σε κατάλληλες θέσεις (*Μουσιόπουλος, 1997*).

4.5 Σημασία του Α.Ο.Σ

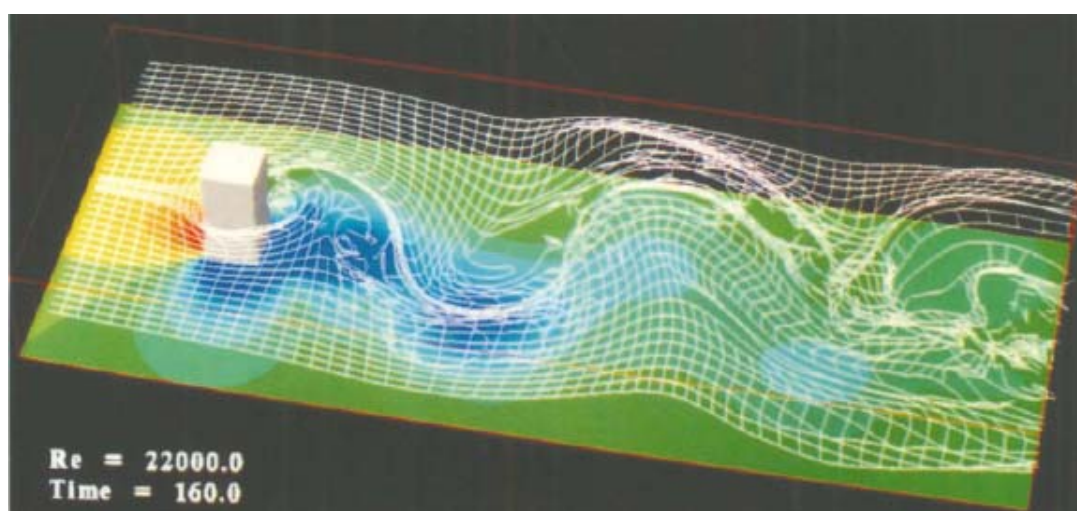
Αν και το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα είναι ένα μικρό τμήμα της ατμόσφαιρας, εντούτοις η σημασία του είναι ζωτική τόσο για τον άνθρωπο όσο και για την ίδια την ύπαρξη της ζωής στον πλανήτη. Παρόλο που η συστηματική του μελέτη είναι δύσκολη υπάρχουν αρκετοί λόγοι για τους οποίους συνεχίζονται οι προσπάθειες μελέτης και εξιχνίασης των φαινομένων που το διέπουν. Μερικοί από αυτούς αναφέρονται παρακάτω (*Λεμονίδης, 2003*):

- Στο Α.Ο.Σ λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της ρύπανσης του ατμοσφαιρικού αέρα και επηρεάζεται άμεσα από τη δομή του αφού είναι υπεύθυνη για τον καθορισμό των τιμών των συγκεντρώσεων των ρυπαντών και του ρυθμού της τυρβώδους ανάμειξης.
- Το Α.Ο.Σ. αποτελεί τη μεγαλύτερη πηγή θερμικής ενέργειας στην ατμόσφαιρα ως μέσο εξισορρόπησης των συνεχών απωλειών προς το διάστημα.
- Σημαντικό ρόλο έχει επίσης στον υδρολογικό κύκλο, όπου οι υδρατμοί που προέρχονται από εξάτμιση (επιφανειακή) με την είσοδό τους στο Α.Ο.Σ σχηματίζουν τα νέφη.
- Η μικρή κλίμακα τύρβης είναι υπεύθυνη για την κατανάλωση του 50% της κινητικής ενέργειας της ατμόσφαιρας στο Α.Ο.Σ.
- Στο χαμηλότερο τμήμα του Α.Ο.Σ συναντάμε τα αέρια τμήματα της βιόσφαιρας και ως εκ τούτου η ανάπτυξη των περισσότερων οικοσυστημάτων συνδέεται με τις διεργασίες του Α.Ο.Σ.
- Τέλος η ανάπτυξη και η βελτιστοποίηση των μοντέλων ώστε να προβλέπουν με μεγαλύτερη ακρίβεια στηρίζεται στην καλύτερη εκτίμηση και μοντελοποίηση των επιφανειακών δυνάμεων τριβής και της ανταλλαγής θερμότητας και υδρατμών στην επιφάνεια.

5

ΦΥΣΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζεται το Φυσικό Πρόβλημα που αντιμετωπίζεται στην παρούσα εργασία. Αρχικά αναφέρονται οι τρεις απαραίτητες συνθήκες προκειμένου να καθοριστεί σωστά ένα φυσικό πρόβλημα και εν συνεχεία γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση μελέτης του φυσικού προβλήματος. Τέλος παρουσιάζονται αναλυτικά και σχηματικά η γεωμετρία που λαμβάνεται για τη μελέτη του φυσικού προβλήματος καθώς και οι παραδοχές που λαμβάνονται.



Εικόνα 5-1: Τυρβώδη ροή γύρω από ορθογωνική στήλη (LES) (Kobayashi, T., 1997).

5. ΦΥΣΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

5.1 Εισαγωγή

Ένα φυσικό πρόβλημα για να επιλυθεί μαθηματικά πρέπει να είναι καλά τοποθετημένο. Αυτό σημαίνει ότι:

1. Υπάρχει λύση
2. Η λύση είναι μοναδική
3. Η λύση εξαρτάται με συνεχή τρόπο από τις βοηθητικές σχέσεις

Πολλές φορές η μη ύπαρξη λύσης οφείλεται στον κακό συνδυασμό των οριακών συνθηκών και της διαφορικής εξίσωσης. Στη περίπτωση των εξισώσεων δυναμικού που είναι αρμόδιες για την περιγραφή άτριβων και αστρόβιλων ροών καθώς και για ροές οριακού στρώματος οι αρμόζουσες οριακές συνθήκες είναι καλά μελετημένες. Για τις εξισώσεις Navier-Stokes έχουν εξετασθεί σε ένα καλό επίπεδο οι οριακές συνθήκες για τα όρια με στερεή επιφάνεια. Το ίδιο δεν ισχύει για όρια σε επιφάνειες τα πράγματα είναι πιο περίπλοκα.

Γενικά ο υποπροσδιορισμός των οριακών συνθηκών οδηγεί σε μη-μοναδικές λύσεις. Ενώ ο υπερπροσδιορισμός των οριακών συνθηκών οδηγεί σε αφύσικες λύσεις κοντά στα όρια. Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις όπου η πολλαπλότητα των λύσεων αναμένεται από τη φυσική του προβλήματος. Η περίπτωση αυτή συνήθως εμφανίζεται κατά τη μετάβαση από τη στρωτή στην τυρβώδη ροή.

Η τρίτη συνθήκη απαιτεί ότι μια μικρή μεταβολή στις αρχικές ή οριακές συνθήκες θα πρέπει να προκαλεί μια πεπερασμένη μεταβολή στη λύση (*Μαρκάτος και Ασημακόπουλος, 1995*).

5.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Αναμφισβήτητα, η μελέτη του φαινομένου της φωτιάς και η κίνηση του πλουμίου του καπνού έχει απασχολήσει πολύ τη διεθνή επιστημονική κοινότητα. Η υφιστάμενη γνώση για την συμπεριφορά του πλουμίου βασίζεται κυρίως σε παρατηρήσεις και

διαστατική ανάλυση, συμπληρωμένη με αναλυτικά μοντέλα. Ωστόσο η αριθμητική ανάλυση σε τυρβώδεις φωτιές τώρα τελευταία αρχίζει να φαίνεται πολλά υποσχόμενη.

Στη μελέτη και εξιχνίαση του φαινομένου έχουν συνεισφέρει με τις εργασίες τους πολλοί εκ των οποίων μερικοί αναφέρονται παρακάτω, (*Yokoi, 1960; Thomas et al., 1965; McCaffrey, 1979; Morton et al., 1980; Zukoski et al., 1980; Kung et al., 1982; Markatos et al., 1982; Heskestad, 1983; Hasemi and Tokunaga, 1984; Cox et al., 1985; Delichatsios, 1987; Hamins et al., 1996*).

Τα αποτελέσματα των εργασιών των παραπάνω έχουν συγκεντρωθεί από τους *Beylar, 1986, McCaffrey, 1995, Heskestad, 1995, Delichatsios, 1995, Zukoski, 1995, Heskestad, 1998* και πιο πρόσφατα από τους *Quintiere and Grove, 1998*.

Παράλληλα η ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων με την ταυτόχρονη ανάπτυξη νέων υπολογιστικών μεθόδων έχει δώσει το έναυσμα για πολλούς ερευνητές στην ενασχόλησή τους με την αριθμητική προσομοίωση των πλουμίων.

Το 1982 οι You και Faeth (*You and Faeth, 1982*) παρουσίασαν ένα βελτιωμένο μοντέλο καύσης που στηριζόταν στο μοντέλο τύρβης $k\sim\epsilon$. Έτσι κατάφεραν να είναι οι πρώτοι που έδωσαν ολοκληρωμένη σύγκριση αποτελεσμάτων αριθμητικής προσομοίωσης με πειραματικά δεδομένα για ανωστικές φλόγες. Ομοίως μερικά χρόνια αργότερα ο Tamanini (*Tamanini, 1997*) χρησιμοποίησε μια βελτιωμένη μέθοδο ενός μοντέλου τύρβης $k\sim\epsilon\sim g$ για την προσομοίωση ανωστικής φλόγας.

Τον ίδιο χρόνο ο Markatos (*Markatos et al., 1982*) ανέπτυξαν υπολογιστική μέθοδο για την πρόβλεψη της ταχύτητας και τη θερμοκρασιακή κατανομή για φωτιά εσωτερικού χώρου. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται είναι δύο διαστάσεων και η λύση στηρίζεται στη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών ενώ ταυτόχρονα λαμβάνεται υπόψη στην προσομοίωση και η επίδραση της άνωσης στο τυρβώδες μοντέλο $k\sim\epsilon$. Τέλος τα αποτελέσματα συγκρίνονται με πειραματικά δίνοντας πολύ καλή ακρίβεια.

Έπειτα ο Cranford et al. (*Cranford et al., 1985*) χρησιμοποίησε το $k\sim\epsilon$ για την προσομοίωση μιας τυρβώδους φλόγας αερίου διαστάσεως 25 cm. Ενώ αργότερα η Adiga (*Adiga, 1989*) έκανε χρήση του $k\sim\epsilon$ για καύση.

Στις αρχές του 1980, άρχισε η εμφάνιση κάποιων εμπορικών κωδικών υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD), μερικοί από αυτούς ήταν οι **JASMINE, KAMELEON, FLUENT, SOFIE, PHOENICS**.

Ως εκ τούτου με την εργασία τους οι Nam και Bill (*Nam and Bill, 1993*) κάνοντας χρήση του μοντέλου k-ε στον υπολογιστικό κώδικα ρευστοδυναμικής PHOENICS με βελτιώσεις στις σταθερές του μοντέλου, Ct και στον αριθμό Prandtl σh, κατάφεραν να επιφέρουν συμφωνία πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων με απόκλιση μόνο 2%.

Εν συνεχεία οι Sinai και Owens (*Sinai and Owens, 1995*) χρησιμοποιώντας το FLOW 3D μοντελοποίησαν φωτιά λίμνης δίνοντας έμφαση στα στοιχεία της γεωμετρίας.

Ένα χρόνο μετά οι Kato et al. (*Kato et al, 1996*) χρησιμοποιώντας τον κώδικα JASMINE προσομοίωσαν αριθμητικά με μια μικρή κλίμακας, φυσικό μοντέλο. Έχοντας τέλεια συμφωνία μεταξύ πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων στη ροή μάζας για τα χαμηλά ύψη του πλουμίου, αλλά προφανώς στα μεγαλύτερα ύψη ανόδου του πλουμίου υπάρχει απόκλιση.

Ωστόσο η ανάπτυξη ενός αναμορφωμένου μοντέλου k-ε αντιμετωπίζει καλύτερα τις ανισοτροπικές επιδράσεις της τύρβης. Οι Ohira et al. (*Ohira et al., 1998*) επιβεβαίωσαν το μοντέλο για αρκετές περιπτώσεις ροών δείχνοντας αποτελέσματα μεγάλης αξιοπιστίας.

Λίγα χρόνια αργότερα το 1999 οι Baum και McGrattan (*Baum and McGrattan, 1999*) με την εργασία τους παρουσίασαν μια μεθοδολογία για την προσομοίωση μεγάλων υπαίθριων βιομηχανικών πυρκαγιών. Χρησιμοποιείται η τεχνική της προσομοίωσης των μεγάλων δινών για τη προσομοίωση της φωτιάς στην κορυφή μεγάλης δεξαμενής πετρελαίου. Το μοντέλο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας από φωτιά σε γειτονικές δεξαμενές.

Έπειτα οι Fisher et al. (*Fisher et al., 2001*) με την εργασία τους περιγράφουν τη συμπεριφορά του πλουμίου του καπνού που δημιουργείται από φωτιά λίμνης. Το σημαντικό της έρευνας τους είναι ότι συγκρίνουν αποτελέσματα υπολογιστικών μοντέλων με πειραματικά δεδομένα από φωτιά λίμνης μεγάλης κλίμακας (εκλυόμενη ισχύς 72 MW, εμβαδόν επιφάνειας καύσης 294 m²). Τέλος η εργασία τους έδειξε ότι οι εμπειρικές σχέσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη της διασποράς του πλουμίου από φωτιές μεγάλης κλίμακας.

5.3 Γεωμετρία προβλήματος

5.3.1 Εισαγωγή

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η επιλογή της γεωμετρίας που χαρακτηρίζει το φυσικό πρόβλημα. Τα χαρακτηριστικά του φυσικού προβλήματος αποτελούνται από τη γεωμετρία του πεδίου ροής του χώρου για τον οποίο γίνεται η προσομοίωση, τη γεωμετρία της δεξαμενής και τη γεωμετρία της πηγής των ρύπων που ουσιαστικά είναι η επιφάνεια της κορυφής της δεξαμενής.

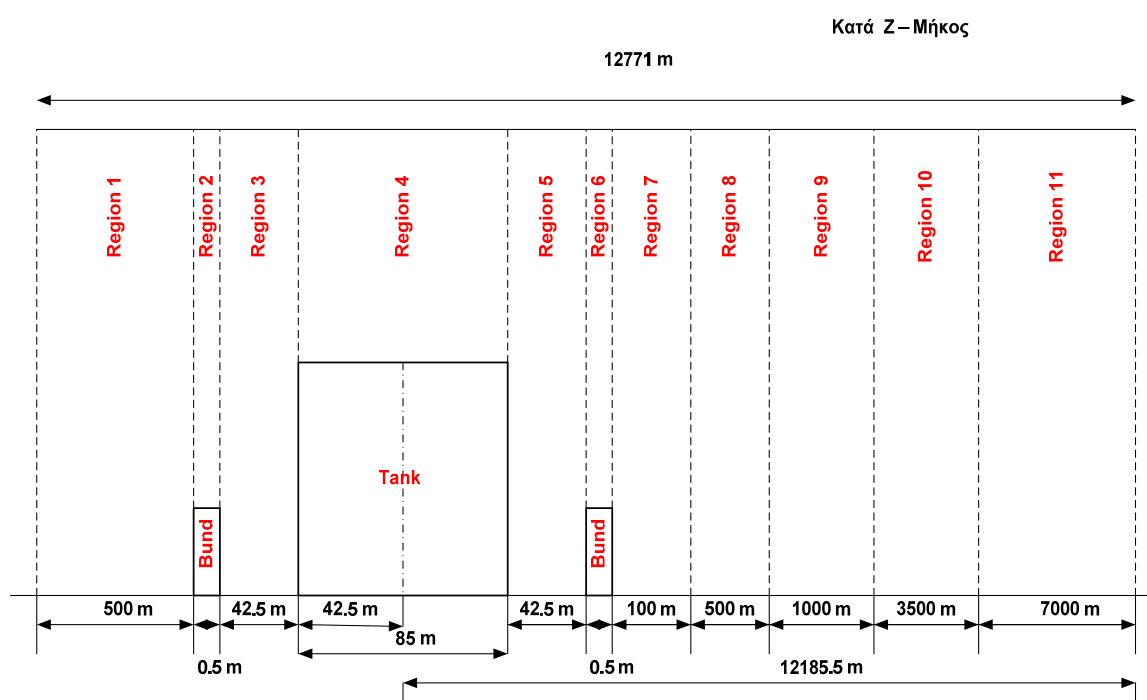
5.3.2 Γεωμετρία πεδίου ροής χώρου προσομοίωσης

Το πεδίο ροής του χώρου προσομοίωσης που επιλέγεται είναι τρισδιάστατο. Με διαστάσεις του παρουσιάζονται στον παρακάτω *Πίνακα 5-1*.

Πίνακας 5-1: Διαστάσεις του πεδίου ροής του χώρου προσομοίωσης.

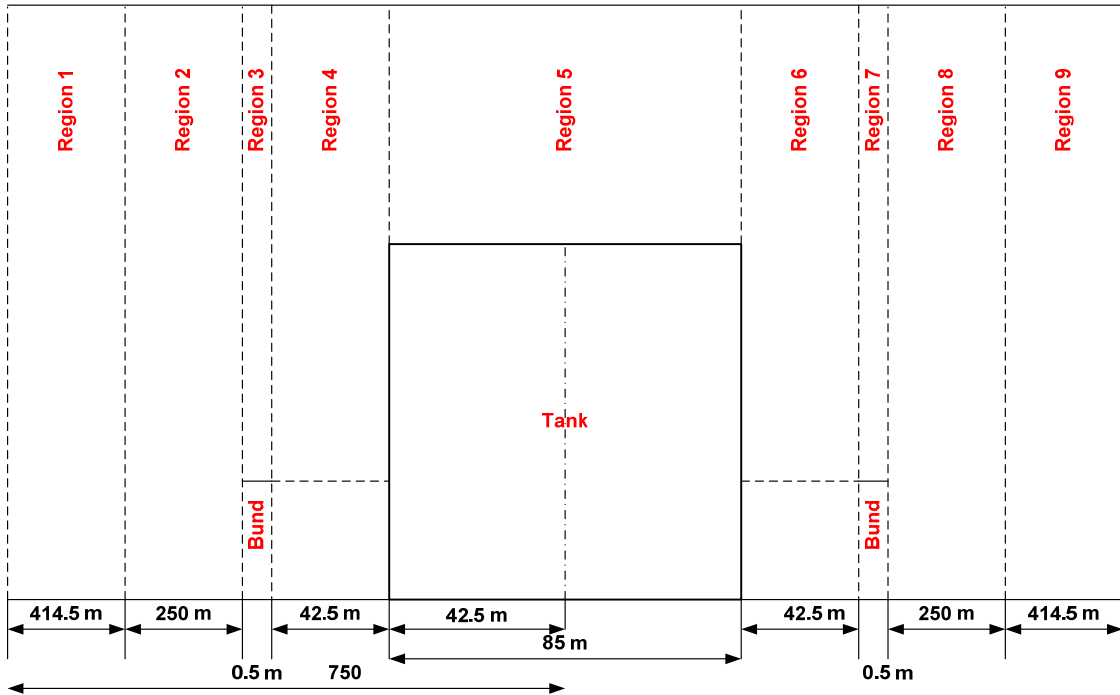
Διάσταση	Μήκος (Z)	Πλάτος (X)	Ύψος (Y)
Τιμή (m)	12771	1500	1800

Εν συνεχεία παρουσιάζεται η γεωμετρία του πεδίου ροής για κάθε μία κατεύθυνση Z, X, Y στα παρακάτω τρία σχήματα (*Σχήματα 5-1; 5-2; 5-3*).



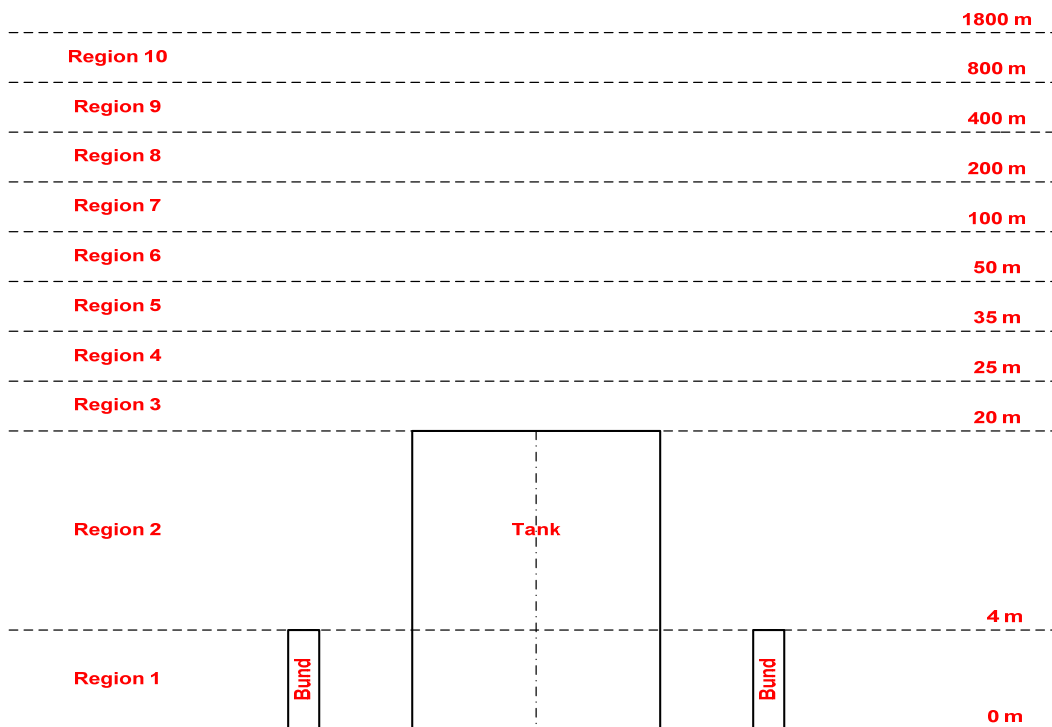
Σχήμα 5-1: Γεωμετρία πεδίου ροής του χώρου κατά τη διεύθυνση Z.

Κατά Χ - Πλάτος



Σχήμα 5-2: Γεωμετρία πεδίου ροής του χώρου κατά τη διεύθυνση Χ.

Κατά Υ - Ύψος

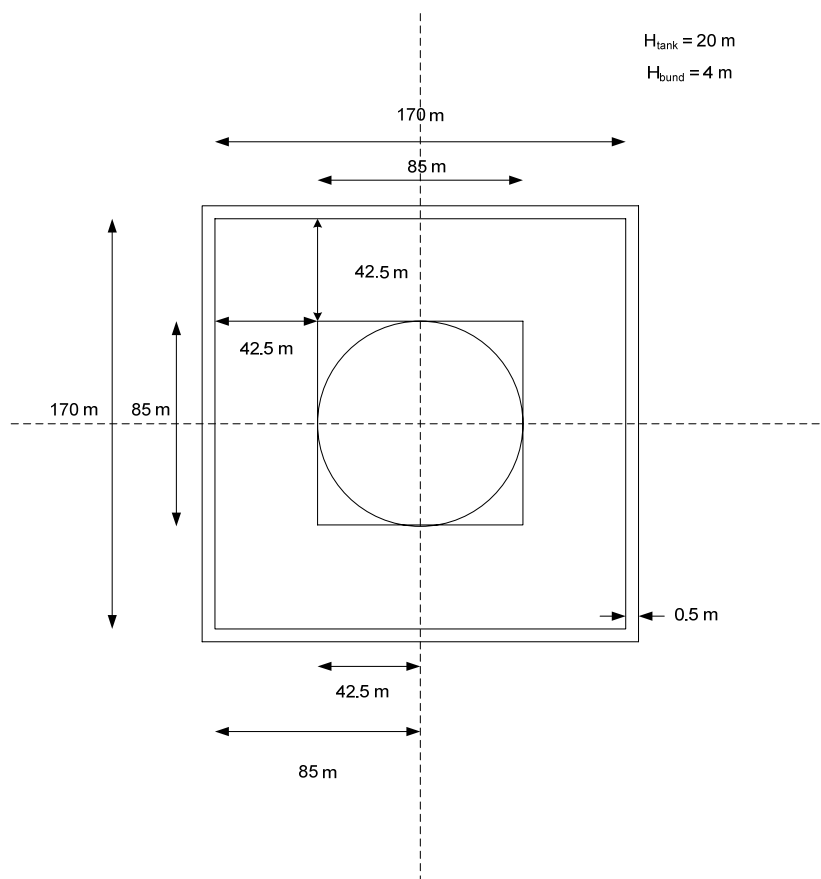


Σχήμα 5-3: Γεωμετρία πεδίου ροής του χώρου κατά τη διεύθυνση Υ.

Ο διαχωρισμός σε περιοχές εκτός ότι χρειάζεται προκειμένου να θέσουμε τον αριθμό των κελιών της αριθμητικής ανάλυσης για την πύκνωση του πλέγματος, μας επιτρέπει να κατανοήσουμε τις φάσεις που εξελίσσονται κατά τη ροή του ρευστού μέσα στο πεδίο ροής. Επιδιώκεται η πύκνωση των γραμμών του αριθμητικού πλέγματος στις περιοχές όπου υπάρχουν μεγάλες κλίσεις των εξαρτημένων μεταβλητών.

5.3.3 Γεωμετρία δεξαμενής

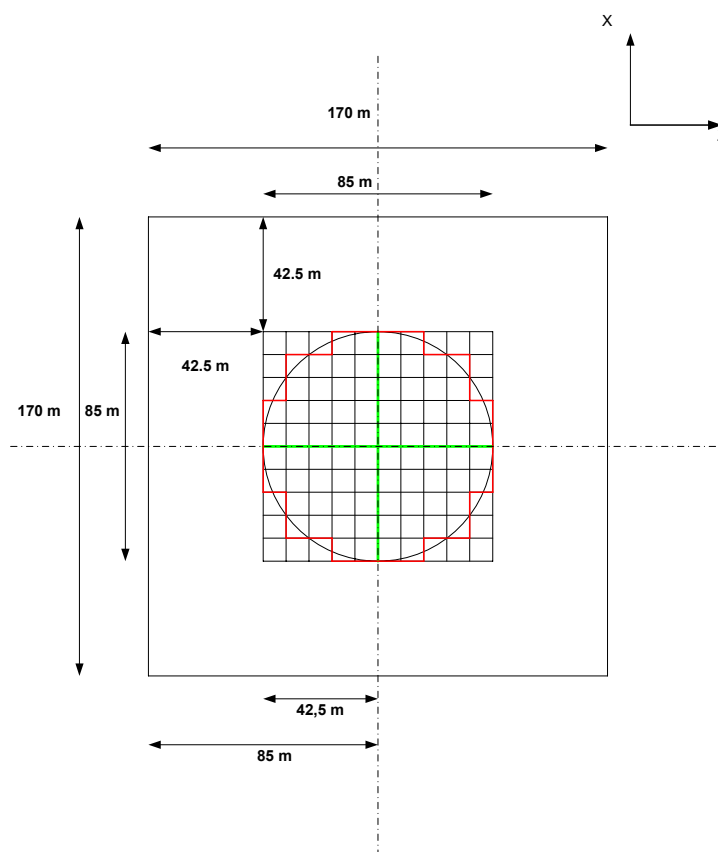
Το **Σχήμα 5-4** παρουσιάζει σε κάτοψη τη δεξαμενή για την οποία θα γίνει η προσομοίωση του φυσικού προβλήματος. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η δεξαμενή δεν εξετάζεται μεμονωμένα αλλά λαμβάνονται υπόψη και τα φράγματα που περιβάλλουν τη δεξαμενή σε περίπτωση υπερχειλίσης ή αστοχίας της δεξαμενής (bunds). Τέλος η δεξαμενή είναι πλωτής οροφής διαμέτρου 85 m και ύψους 20 m και τα bunds έχουν ύψος 4 m και πλάτος 0,5 m. Η επιλογή του συγκεκριμένου είδους δεξαμενής οφείλεται στο ότι είναι το πιο αντιπροσωπευτικό που υπάρχει.



Σχήμα 5-4: Κάτοψη της δεξαμενής μαζί με τις χαρακτηριστικές διαστάσεις της.

5.3.4 Γεωμετρία όρου πηγής ρύπων

Ιδιαίτερη και καθοριστική σημασία στην προσομοίωση του προβλήματος παίζει η γεωμετρία της πηγής ρύπων που ουσιαστικά πρόκειται για την επιφάνεια της δεξαμενής στην οποία έχουμε φωτιά λίμνης (pool fire). Η αντιμετώπιση στη συγκεκριμένη περίπτωση παρουσιάζεται στο παρακάτω **Σχήμα 5-5**. Στην επιφάνεια της πηγής χρησιμοποιούμε δέκα κελιά τόσο στη διεύθυνση x όσο και στη διεύθυνση z ίδιου μεγέθους. Ενώ ταυτόχρονα η διάταξη των κελιών τοποθετείται έτσι ώστε να πάρουμε σε κάποιο βαθμό το κυκλικό σχήμα. Αυτό επιτυγχάνεται με την «**τετραγωνοποίηση**» του κύκλου όπως φαίνεται με τη κόκκινη γραμμή στο **Σχήμα 5-5**.



Σχήμα 5-5: Διαμόρφωση του όρου πηγής ρύπων για τη διαδικασία της προσομοίωσης.

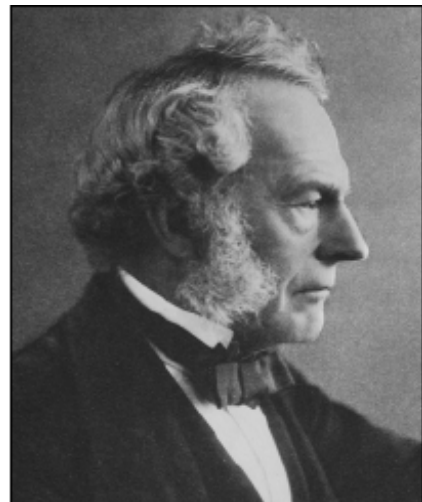
6

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Στο **Κεφάλαιο 6** αναπτύσσεται το Μαθηματικό Μοντέλο. Αρχικά παρουσιάζονται οι θεμελιώδεις διαφορικές εξισώσεις και εν συνεχεία οι εξισώσεις επίλυσης του προβλήματος. Έπειτα γίνεται καθορισμός των οριακών συνθηκών του προβλήματος για την προσομοίωση. Τέλος γίνεται εκτενής αναφορά στην μελέτη της τύρβης και στην μοντελοποίησή της σύμφωνα με το χρονικό φάσμα μελέτης της από την επιστημονική κοινότητα.



Εικόνα 6-1: Claude Louis Marie Henri Navier. Γεννήθηκε στη Dijon το 1785 και πέθανε στο Παρίσι το 1836.



Εικόνα 6-2: George Gabriel Stokes. Γεννήθηκε στο Skreen, County Sligo, στην Ιρλανδία το 1819 και πέθανε στο Cambridge το 1903.

6. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

6.1 Αρχές Διατήρησης - Θεμελιώδεις διαφορικές εξισώσεις

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 όρο ποσοτική πρόβλεψη ονομάζεται η γνώση του πεδίου τιμών της εξαρτημένης μεταβλητής.

Ωστόσο από τη μέθοδο ποσοτικής πρόβλεψης απαιτείται αξιοπιστία, ταχύτητα, οικονομία, διαθεσιμότητα και ευλυγισία (*Μαρκάτος και Ασημακόπουλος, 1995*).

Εξαιτίας της πολυπλοκότητας των διαφορικών εξισώσεων των φαινομένων μεταφοράς η επίλυσή τους δεν είναι πάντα δυνατή σε κλειστή μορφή. Αλλά με τη βοήθεια αριθμητικών μεθόδων και με ισχυρή υπολογιστική δύναμη δίδεται η δυνατότητα επίλυσής τους και ταυτόχρονα η απάντηση σε δύσκολα σχεδιαστικά προβλήματα.

Η αρχή διατήρησης για την φυσική ποσότητα Φ σε συντεταγμένες Euler θα έχει την εξής μορφή (*Μαρκάτος και Ασημακόπουλος, 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 αρχή διατήρησης μάζας για ένα πεπερασμένο όγκου ελέγχου περιγράφεται σε μορφή καρτεσιανών τανυστών:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (6-1)$$

Η Διατήρηση Ορμής γράφεται σε μορφή καρτεσιανών τανυστών ως εξής (*Μαρκάτος και Ασημακόπουλος, 1995*):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_m) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_m) = \frac{\partial}{\partial x_i} p_{m,i} + g_m - f_m \quad (6-2)$$

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega_l) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \omega_l + J_{l,i}) = R_l \quad (6-3)$$

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\tilde{h} - \rho) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_i \tilde{h} + q_i + w_{s,i} + \sum_l h_l J_{l,i} \right) = S_{rad} + \dots \quad (6-4)$$

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:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho\vec{u}\phi + \vec{J}_\phi) = S_\phi \quad (6-5)$$

όπου ϕ παριστάνει τις φυσικές ποσότητες u_m , ω_l , \tilde{h} , ή τη μονάδα (στην περίπτωση της εξίσωσης της συνέχειας).

6.2 Εξισώσεις Προβλήματος

Για μόνιμη ροή οι εξισώσεις που καλούμαστε να επιλύσουμε δεν είναι άλλες από τις διαφορικές εξισώσεις συνέχειας, ορμής, θερμότητας, συγκέντρωσης και τύρβης.

Εξίσωση συνέχειας

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

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j) = 0 \quad (6-6)$$

Η εξίσωση αυτή καθορίζει την πυκνότητα και τη ταχύτητα του ρευστού σε κάθε σημείο του πεδίου ροής.

Η εξίσωση συνέχειας ισχύει για κάθε περίπτωση τρισδιάστατης ροής (μόνιμης ή μη μόνιμης, στρωτής ή τυρβώδους, συμπιεστής ή ασυμπιεστής) ενός καθαρού ρευστού ή ενός ομοιογενούς μείγματος ρευστών (πραγματικών ή ιδανικών), υπό την προϋπόθεση ότι δεν συμβαίνουν πυρηνικές ή χημικές αντιδράσεις στον απειροστό όγκο ελέγχου (*Παπαϊωάννου, 2002*).

Στη συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε τρισδιάστατη, μόνιμη ροή και συμπιεστή ροή έτσι οι όροι της εξίσωσης συνέχειας με τη μορφή των δεικτών (2) θα γίνει:

$$\frac{\partial v_j}{\partial x_j} = 0 \quad (6-7)$$

Αν τώρα στη εξίσωση (6-7) θέσουμε όπου j τις τιμές x , y και z αντίστοιχα και αθροίζοντας τις επιμέρους παραγώγους θα έχουμε την τελική εξίσωση της παρακάτω μορφής:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (6-8)$$

Εξίσωση ορμής (Navier – Stokes)

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

$$\rho \left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) = \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (6-9)$$

Για να ισχύει η παραπάνω εξίσωση θα πρέπει να ισχύουν οι εξής προϋποθέσεις: νευτώνικό ρευστό, ασυμπιεστή ροή, και σταθερό ιξώδες.

Από την εξίσωση (6-9) προκύπτουν άμεσα οι τρεις καρτεσιανές συνιστώσες της εξίσωσης Navier–Stokes, αν αντικαταστήσουμε τον ελεύθερο δείκτη i με x , y , και z αντίστοιχα, και τον επαναλαμβανόμενο δείκτη j με x , y , και z (για κάθε τιμή του i). Επειδή έχουμε τρισδιάστατη ροή οι εξισώσεις κατά τη διεύθυνση x , y και z , θα είναι (*Παπαϊωάννου, 2002*):

***x* – Διεύθυνση:**

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \quad (6-10)$$

***y* – Διεύθυνση:**

$$\rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) \quad (6-11)$$

***z* – Διεύθυνση:**

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \quad (6-12)$$

Οι εξισώσεις **Navier – Stokes** είναι μερικές διαφορικές εξισώσεις δευτέρου βαθμού. Οι εξισώσεις αυτές είναι μη γραμμικές λόγω της παρουσίας του τελεστή μεταφοράς $v \cdot \nabla$. Έτσι η αναλυτική λύση των διαφορικών εξισώσεων **Navier – Stokes** είναι αδύνατη στη γενική περίπτωση. Η επίλυσή τους γίνεται συνήθως με διάφορες αριθμητικές μεθόδους, οι οποίες όμως δίνουν προσεγγιστικές λύσεις (*Peyret and Taylor, 1983*).

Βασικό τους πλεονέκτημα είναι ότι μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιοδήποτε πρόβλημα ροής. Έτσι, δεν χρειάζεται να καταστρώνεται κάθε φορά διαφορετικό ισοζύγιο δυνάμεων για την επίλυση του εξεταζόμενου προβλήματος.

Εξίσωση Θερμότητας

Η γενική μορφή της εξίσωσης θερμότητας είναι η παρακάτω:

$$\rho \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + S_T \quad (6-13)$$

Στον όρο S_T εκτός του όρου πηγής συμπεριλαμβάνεται και ο όρος $\left(\frac{dP}{dt} + v_j \frac{dP}{dj} \right)$,

ο οποίος στα πλαίσια της αριθμητικής προσομοίωσης θεωρείται ως πηγή. Εάν το φυσικό μας πρόβλημα δεν εμφανίζει υψηλές κλίσεις πίεσης και δεν είναι μεταβατικό τότε ο παραπάνω όρος αμελείται. Τέλος ο όρος S_T αναφέρεται στον όρο παραγωγής ή κατανάλωσης που τυχόν υπάρχει στο πεδίο.

Εξίσωση Συγκέντρωσης

Η γενική μορφή της εξίσωσης ενέργειας θα είναι:

$$\rho \left(\frac{\partial C}{\partial t} + v_x \frac{\partial C}{\partial x} + v_y \frac{\partial C}{\partial y} + v_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) = \rho D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) + S_C \quad (6-14)$$

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

Στη συγκεκριμένη εργασία η προσομοίωση του προβλήματος περιλαμβάνει αδιαβατική ατμόσφαιρα και το μοντέλο τύρβης, **RNG derived k-ε** των (*Yakhot and Orszag, 1986; Yakhot and Smith, 1992; Yakhot et al., 1992*). Η επιλογή του μοντέλου τύρβης **RNG derived k-ε** έγινε με βάση ότι δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με το κλασσικό μοντέλο **k-ε**.

Εξισώσεις επίλυσης προβλήματος**1. Εξίσωση Συνέχειας:**

$$\frac{\partial v_j}{\partial x_j} = 0 \quad (6-15)$$

2. Εξίσωση Ορμής:

$$v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \nu_t) \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) \right] + g_i \frac{T - T_{ref}}{T_{ref}} \quad (6-16)$$

Όπου:

P : είναι η διαφορά της πίεσης από την αδιαβατική κατάσταση

ρ : είναι η πυκνότητα στο επίπεδο του εδάφους

Επίσης η θερμοκρασία στον παραπάνω όρο ισούται με $T = T - T_{ad} + T_{ref}$ όπου ως T_{ad} ορίζεται η αδιαβατική θερμοκρασία και ως T_o η θερμοκρασία στο επίπεδο του εδάφους, η οποία λαμβάνεται ίση με 298 K.

3. Εξίσωση Θερμότητας

$$v_j \frac{\partial h}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{v}{P_r} + \frac{v_T}{\sigma_T} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} \right] \quad (6-17)$$

4. Εξίσωση Συγκέντρωσης:

$$v_j \frac{\partial C}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{v}{S_c} + \frac{v_T}{\sigma_c} \right) \frac{\partial C}{\partial x_j} \right] \quad (6-18)$$

5. Εξίσωση Κινητικής Ενέργειας Τύρβης:

$$v_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v + \frac{v_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + G_b - \varepsilon \quad (6-19)$$

6. Εξίσωση Κατανάλωσης Κινητικής Ενέργειας Τύρβης:

$$v_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(v + \frac{v_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon + C_{\varepsilon 3} G_b) \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 4} \frac{\sigma_k^2}{k} \quad (6-20)$$

7. Εξισώσεις των όρων Παραγωγής και Κατανάλωσης Κινητικής Ενέργειας Τύρβης είναι:

$$v_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} = c_\mu k^{\frac{1}{2}} L_k \quad (6-21)$$

$$G_b = -g\beta \frac{v_t}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial y} \quad (6-22)$$

$$P_k = v_t \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (6-23)$$

Οι σταθερές του μοντέλου **RNG derived k-ε** δίνονται στον παρακάτω **Πίνακα 6-1**:

Πίνακας 6-1: Τιμές των σταθερών του μοντέλου RNG derived k-ε.

C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{\varepsilon 3}$	n_0	σ_k	σ_ε	β
0.09	1.42	1.68	$\tanh(v/v)$	4.38	0.719	0.719	0.012

6.3 Οριακές συνθήκες προβλήματος

Στην περίπτωση των πεπερασμένων όγκων ελέγχου οι οριακές συνθήκες εισάγονται με τη μορφή ενός όρου πηγής (ψευδοπηγή). Η μέθοδος αυτή επιτρέπει ακριβέστερη προσομοίωση των οριακών συνθηκών.

Οι οριακές συνθήκες για την εξίσωση της ορμής είναι:

- Είσοδος: Διατήρηση των τιμών από τις αρχικές συνθήκες, στα όρια του πεδίου.
- Εκροή: Ορίζονται οι κλίσεις των μεταβλητών, κατά τη διεύθυνση της ροής ίσες με μηδέν.
- Στερεά όρια: η συνιστώσα της ταχύτητας που είναι παράλληλη στον τοίχο ορίζεται ίση με μηδέν.

Στα στερεά όρια στο πλέγμα γίνεται χρήση των συναρτήσεων τοίχου (wall functions), όπου επιτρέπουν υπολογισμούς με λιγότερα πλεγματικά σημεία. Έτσι η τιμή της παράλληλης προς το τοίχωμα ταχύτητας και η διατμητική τάση που ασκείται στο τοίχωμα υπολογίζονται από διαφορετικές συσχετίσεις στην περιοχή κοντά στο τοίχωμα.

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

$$\frac{\phi}{\phi^*} = \frac{\sigma_\phi}{k} \ln\left(\frac{z}{z_o}\right) \quad (6-24)$$

Όπου:

σ_ϕ : ο τυρβώδης αριθμός Prandtl

k : η σταθερά Von Karman (=0.41)

Φ : το φυσικό μέγεθος

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

$$y^+ = \frac{\rho y}{\mu} \left(\frac{\tau_w}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6-25)$$

όπου y : η απόσταση από το τοίχωμα.

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

$$u^+ = y^+ \quad (6-26) \quad u^+ = \frac{u_p}{u_*} \quad (6-27)$$

Όπου:

u^+ : η αδιάστατη ταχύτητα

u^* : η ταχύτητα τριβής

u_p : η ταχύτητα στο πλεγματικό σημείο P.

Όταν το πλεγματικό σημείο βρίσκεται στο αδρανειακό στρώμα θα ισχύει:

Ο λογαριθμικός νόμος δίνει συντελεστή τριβής:

$$s = \left(\frac{u^*}{U} \right)^2 \quad (6-28)$$

όπου: U : η ταχύτητα στον πρώτο κόμβο

Ο συντελεστής τριβής για τυρβώδη ροή είναι:

$$s = \left(\frac{k}{\ln(ER_e s^{1/2})} \right)^2 \quad (6-29)$$

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

$$s = \frac{1}{R} \quad (6-30)$$

όπου:

κ : η σταθερά Von Karman (=0.416)

ε : η παράμετρος τραχύτητας η οποία είναι συνάρτηση της τραχύτητας και των διατμηματικών τάσεων. Για λείο τοίχο είναι $E = 8.6$.

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

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (6-31)$$

Και για το ε :

$$\varepsilon = \frac{0.1643k^{\frac{3}{2}}}{0.41y} \quad (6-32)$$

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 ότι η μεταβολή των μεταβλητών που επιλύονται είναι μηδενική.

Τέλος στον παρακάτω Πίνακα 6-2 παρουσιάζονται συνοπτικά οι οριακές συνθήκες.

Πίνακας 6-2: Οριακές συνθήκες.

Μεταβλητή	Είσοδος	Στερεά όρια	Άνω όριο	Πλευρικά όρια	Έξοδος
w	0	Συναρτήσεις τοίχου	$\frac{\partial}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial}{\partial x} = 0$
v	0	Συναρτήσεις τοίχου	$\frac{\partial}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial}{\partial x} = 0$
u	$u = u_{10} \left(\frac{z}{10}\right)^{0.19}$ για $z \leq \delta$ $u = u_{\delta}$ για $z > \delta$	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 $z > 0.9\delta$ (Huser et al., 1997)	Συναρτήσεις τοίχου	$\frac{\partial}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial}{\partial x} = 0$
ε	$\varepsilon = \frac{C_{\mu}^{3/4} k^{1.5}}{l_m}$ $l_m = 0.41z, l_{m\max} = 0.09\delta$	Συναρτήσεις τοίχου	$\frac{\partial}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial}{\partial x} = 0$
P_{dyn}	-	-	-	-	0

6.4 Τύρβη

6.4.1 Εισαγωγή

Το θέμα της κατανόησης της τυρβώδους ροής καθώς και η μοντελοποίησή της είναι από τις μεγαλύτερες αναζητήσεις για κάθε μηχανικό αλλά και από τα μεγαλύτερα προβλήματα της κλασικής φυσικής. Γι' αυτό άλλωστε θεωρείται και από πολλούς από τα πιο δυσνόητα προβλήματα του αιώνα μας, και αυτό δεν οφείλεται μόνο στην κατανόηση του φαινομένου αλλά και στο μεγάλο εύρος των εφαρμογών που το κάνει κάθε φορά όλο και πιο δύσκολο (*Αργυρόπουλος et al., 2005*).

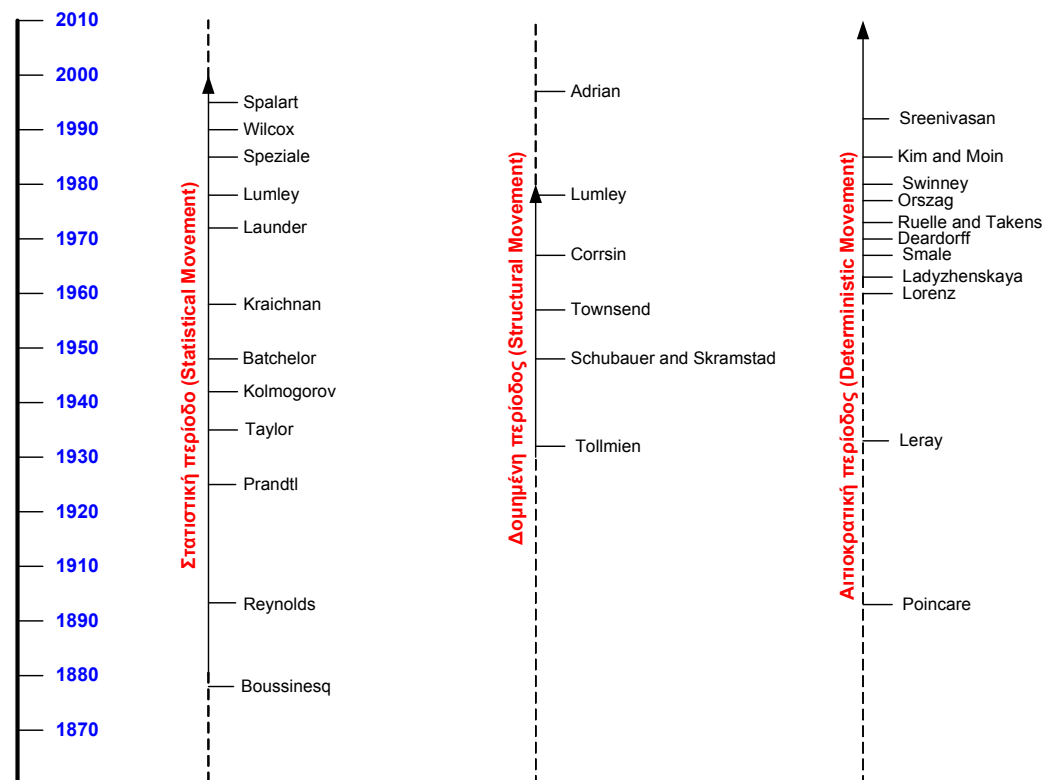
Είναι γεγονός ότι το φαινόμενο της «τύρβης» εμφανίζεται εκτός από τις βιομηχανικές διεργασίες τόσο στα βιολογικά συστήματα των ανθρώπων, ζώων και μερικών φυτών, όσο και σε μακροσκοπικές κλίμακες όπως είναι η ατμόσφαιρα της Γης, οι ωκεανοί, τα γεωφυσικά και αστροφυσικά φαινόμενα. Παρόλο την μεγάλη ανάπτυξη της τεχνολογίας και των επιστημών «το πρόβλημα της τύρβης» παραμένει ακόμα στις μέρες μας άλυτο.

Ως εκ τούτου ο ορισμός της «τύρβης» είναι δύσκολος. Διότι οι ομοιότητες που παρατηρούνται σε διαφορετικές χαοτικές ροές πολλαπλών κλιμάκων ομαδοποιούνται ως «τύρβη», αν και δεν υπάρχει ισχυρό θεωρητικό υπόβαθρο ώστε να προταθεί η «τύρβη» ως κάποια «παγκόσμια» φυσική κατάσταση (*Μαρκάτος, 1998*).

6.4.2 Ιστορική αναδρομή των ερευνών για τη τύρβη

Στο παρακάτω *Σχήμα 6-1* δίνεται από τους (*Champan and Tobak, 1985*) μία πολύ καλή περιγραφή των χρονικών περιόδων μελέτης της τύρβης. Οι Champan and Tobak χωρίζουν την χρονική περίοδο μελέτης της τύρβης στη περίοδο των πειραμάτων του Reynolds το 1883 μέχρι την περίοδο του 1984. Αυτή την περίοδο την χαρακτηρίζουν τρεις κατευθύνσεις έρευνας της τύρβης αυτές είναι η Στατιστική, η Δομημένη και η Αιτιοκρατική.

Σκοπός της παρούσας εργασίας δεν είναι να κάνει πλήρης ιστορική ανάλυση των ερευνών για την τύρβη, ωστόσο για τον απαιτητικό αναγνώστη που αναζητά μια πιο πλήρη ανάλυση μπορεί να ανατρέξει στο βιβλίο των (*Champan and Tobak, 1985*) και σε άλλα πιο σύγχρονα συγγράμματα και επιστημονικά άρθρα.



Σχήμα 6-1: Χρονικοί περίοδοι μελέτης της τύρβης, σύμφωνα με τους (Champan and Tobak, 1985).

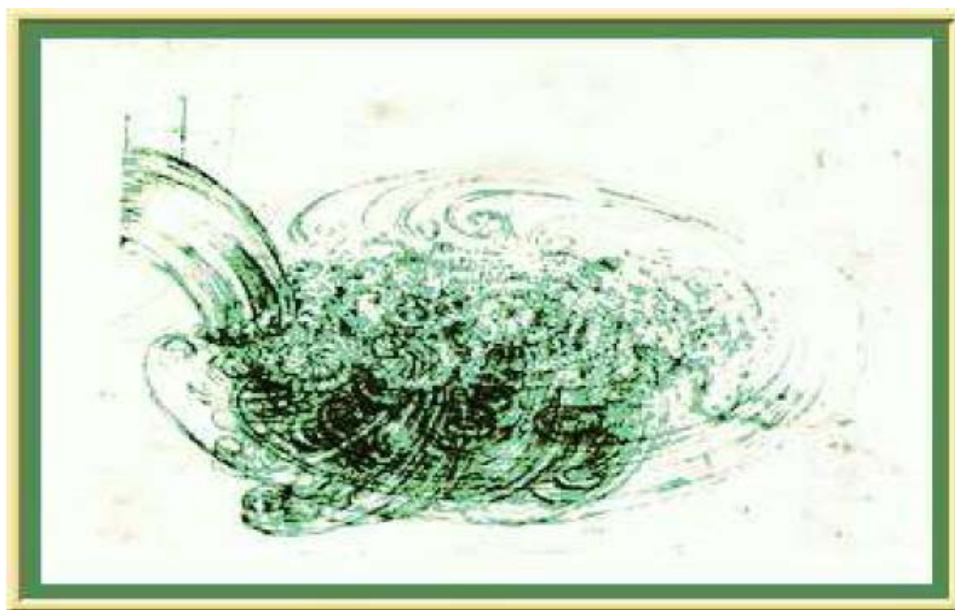
6.4.3 Ορισμοί – κύρια χαρακτηριστικά τύρβης

Η τύρβη ως φαινόμενο είναι γνωστό εδώ και 500 χρόνια τουλάχιστον ως μια συμπεριφορά των ρευστών.

Σε σημειώσεις του Λεονάρντο Ντα Βίτσι συναντάμε μία αξιοθαύμαστη προσπάθεια περιγραφής αλλά και απεικόνισης της τύρβης, που αποδεικνύει ότι η τύρβη είχε απασχολήσει αρκετούς επιστήμονες και μηχανικούς της εποχής. Η παρακάτω **Εικόνα 6-3** απεικονίζει την τύρβη σύμφωνα πάντα με το Ντα Βίτσι.

Παράλληλα ο Ντα Βίτσι έδωσε και μία περιγραφή για το φαινόμενο της «τύρβης» σύμφωνα με την οποία:

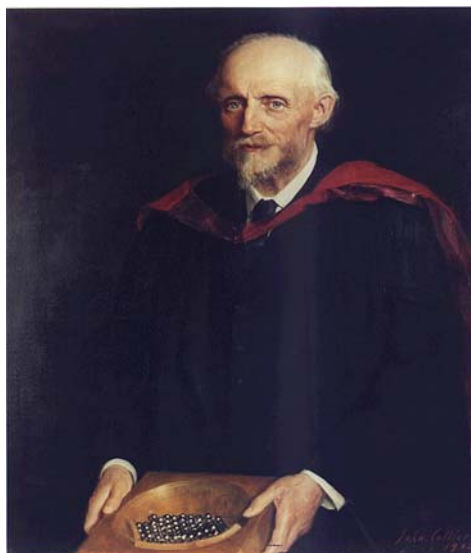
«... οι μικρότερες δίνες είναι σχεδόν αμέτρητες, και μεγάλα αντικείμενα περιστρέφονται μόνο με μεγάλες δίνες και όχι από μικρές, και μικρά αντικείμενα γυρίζουν από μικρές δίνες και μεγάλες»



Εικόνα 6-3: Το σκίτσο του Λεονάρντο Ντα Βίτσι για την «τύρβη» (McDonough, 2004).

Φαινόμενα με την παραπάνω περιγραφή ονομάζονταν «turbolenza» σύμφωνα με τον Ντα Βίτσι (McDonough, 2004).

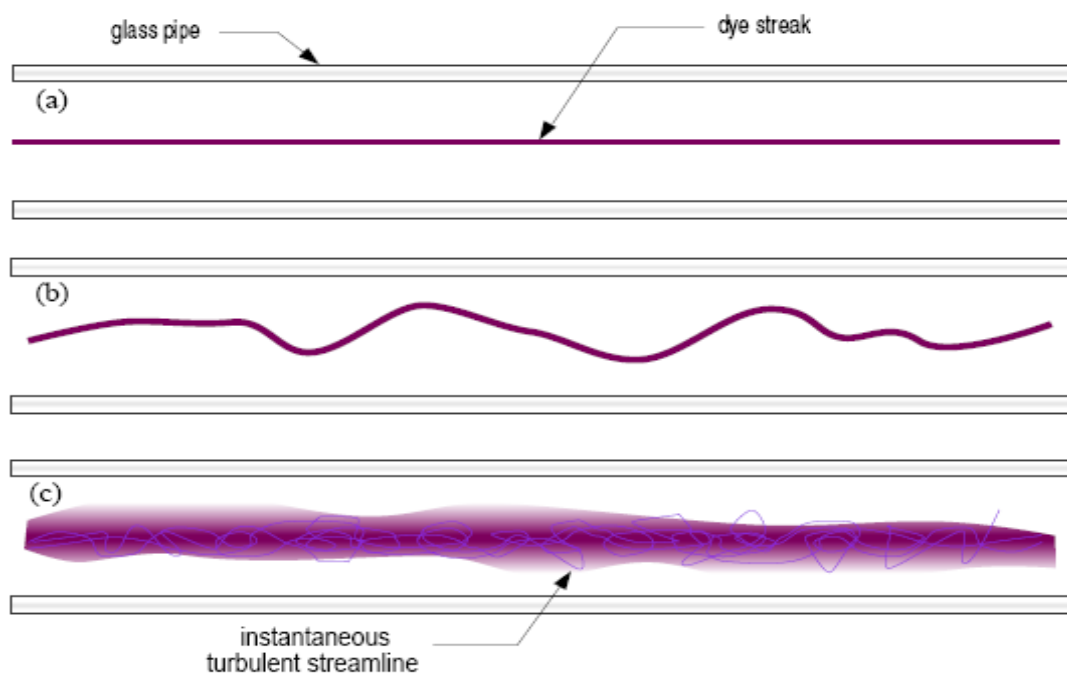
Έπειτα τον 19^ο αιώνα και συγκεκριμένα το 1880 ο Osborne Reynolds (Εικόνα 6-4) ήταν ο πρώτος που ερεύνησε την μετάβαση από την στρωτή ροή στη τυρβώδη. Η διαφορά μεταξύ της στρωτής και τυρβώδους ροής παρουσιάζεται στο γνωστό πείραμα του Reynolds (Εικόνα 6-5), (Reynolds, 1894).



Συχνά υποστηρίζεται ότι δεν υπάρχει καλός καθορισμός του όρου της τύρβης και έτσι πολλοί ερευνητές τείνουν να αποποιηθούν ενός επίσημου ορισμού σύμφωνα με τις δικές τους απόψεις. Ένας από τους πιο γνωστούς δόθηκε το 1922 από τον Richardson (Richardson, 1922):

Εικόνα 6-4 : Γεννήθηκε στο Belfast στις 23 Αυγούστου 1842. Αποφοίτησε το 1867 από το Cambridge, μέχρι το 1905 παρέμεινε καθηγητής στο Πανεπιστήμιο του Manchester και πέθανε το Φεβρουάριο του 1912 στο Watchet in Somerset σε ηλικία 69 ετών (Jackson, 1995).

«Οι μεγάλες σπείρες έχουν τις μικρές σπείρες, οι οποίες τροφοδοτούνται με την ταχύτητά τους; Και οι μικρές σπείρες έχουν τις μικρότερες σπείρες οι οποίες τροφοδοτούνται από το ιξώδες»



Εικόνα 6-5 : Το πείραμα του Reynolds : (a) στρωτή ροή, (b) μεταβατική ροή, (c) τυρβώδης ροή ((McDonough, 2004).

Αυτός ο ορισμός απεικονίζει την φυσική έννοια του ενεργειακού καταρράχτη (energy cascade) όπου τελικά μετατρέπεται σε μοριακή θερμική ενέργεια.

Έπειτα ακολούθησε ο ορισμός των T. Von Karman και G. I. Taylor (*Karman Von T and Taylor G. I., 1938*) σύμφωνα με τον οποίο:

«Η τύρβη είναι μια μη κανονική κίνηση που κάνει την εμφάνιση 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»

Εν συνεχεία ο Hinze (*Hinze, 1959*) όρισε την τυρβώδη ροή ως εξής:

«Μια ροή λέγεται τυρβώδης όταν τα σωματίδια του ρευστού κινούνται σε εξαιρετικά μη κανονικό, τυχαίο και τρισεδιάστατο τρόπο σε μία συνεχή κλίμακα μήκους και χρόνου»

Από τους παραπάνω ορισμούς το κύριο συμπέρασμα είναι ότι η τυρβώδης κίνηση έχει τυχαίο και χαοτικό χαρακτήρα, εντούτοις υπάρχουν κινήσεις ισχυρά ακανόνιστες και χαοτικές που δεν είναι τυρβώδεις όπως π.χ. οι κινήσεις των κυμάτων στην

ανοιχτή θάλασσα. Για να γίνει λοιπόν πιο κατανοητή ή έννοια της τύρβης παραθέτουμε ακολούθως τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά της:

- ➔ Η τυρβώδης ροή έχει μεγάλο αριθμό Reynolds
- ➔ Η τύρβη είναι περιστροφική και τριών διαστάσεων
- ➔ Μη μόνιμη και ισχυρά τυχαία στο χώρο και το χρόνο
- ➔ Σκεδαστική (η ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα λόγω των ιξωδών τάσεων)
- ➔ Είναι καταναλωτική

Τέλος αυτό που συμπεραίνεται είναι ότι η ταχύτητα, η πίεση και όλες οι άλλες ιδιότητες σε οποιοδήποτε σημείο του πεδίου ροής, παρουσιάζουν συνεχείς, ακανόνιστες, μεγάλης συχνότητας διακυμάνσεις. Η ακανόνιστη και τυχαία διακύμανση των ιδιοτήτων του ρευστού καθιστά αδύνατη την αναλυτική έκφραση του πεδίου τυρβώδους ροής ως συνάρτηση του χώρου και του χρόνου.

6.5 Μοντελοποίηση Τύρβης

6.5.1 Εισαγωγή

Ένα μαθηματικό πρότυπο τυρβώδους ροή θα πρέπει να πληρεί κάποιες βασικές αρχές προκειμένου να μπορεί να αναπτύξει τις κατάλληλες υπολογιστικές διαδικασίες, έτσι ώστε να μπορεί να προβλέπει τις τάσεις Reynolds και του όρους τυρβώδους μεταφοράς των βαθμωτών μεταβλητών. Αυτές οι βασικές αρχές σύμφωνα με τον Spalding (*Spalding, 1983*) είναι:

- ➔ Οικονομία στη χρήση τους, δηλαδή όσο το δυνατόν λιγότερες εξισώσεις χρειάζονται να λυθούν και λιγότερες σταθερές που πρέπει να καθοριστούν από το πείραμα τόσο το καλύτερο.
- ➔ Ευρεία εφαρμογή που σημαίνει ότι όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος των πειραματικών συνθηκών για τις οποίες οι εξισώσεις και οι σταθερές ισχύουν, τόσο το καλύτερο.

- Επίσης να είναι ακριβή και πρακτικά κατά την εφαρμογή τους.
- Τέλος να είναι ρεαλιστικά, δηλαδή τα καλύτερα μοντέλα τύρβης είναι αυτά που έχουν ισχυρές και ποσοτικές σχέσεις με τις πραγματικές φυσικές διεργασίες και τα φυσικά φαινόμενα.

Ωστόσο για τον απαιτητικό αναγνώστη μπορεί να ανατρέξει στις διαλέξεις του Hanjalic (*Hanjalic, 2004*) για μια πιο σύγχρονη αντίληψη για τις απαιτήσεις και προσδοκίες των μοντέλων περιγραφής τύρβης.

Γενικά η προσπάθεια μοντελοποίησης της τύρβης έχει επιχειρηθεί μέχρι στιγμής με πέντε μεθόδους (*Markatos, 1985*):

- **Αναλυτικές θεωρίες τύρβης**: πρόκειται για περίπλοκες θεωρίες που δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για την επίλυση πραγματικών προβλημάτων μηχανικών. Η ανάπτυξή τους γίνεται γενικά σε χώρο Fourier (αριθμός κύματος ή συχνότητας).
- **Πρότυπα υπο-πλεγματικής κλίμακας ή Εξομοίωση Μεγάλων Δινών(LES)**: οι συγκεκριμένες μέθοδοι διακρίνονται για τον υπερβολικό υπολογιστικό χρόνο αλλά είναι πολλά υποσχόμενες. Βασίζονται στην υπόθεση ότι η τυρβώδης κίνηση μπορεί να αναλυθεί σε δυο συνιστώσες, σε μία μεγάλης κλίμακας και σε μία υπο-πλεγματικής (μικρής) κλίμακας, έτσι ώστε να μην υπάρξει σημαντική επίδραση στην ανάπτυξη των μεγάλων κλιμάκων.
- **Άμεση αριθμητική προσομοίωση (DNS)**: η συγκεκριμένη μέθοδος στηρίζεται στην άμεση προσομοίωση όλων των δυναμικά σημαντικών κλιμάκων των τυρβωδών ροών με υψηλό αριθμό Reynolds. Η βασική αρχή της μεθόδου εστιάζεται στην τεχνητή μείωση του αριθμού Reynolds μέχρι του σημείου όπου μπορούν να προσομοιωθούν με ακρίβεια στα υπάρχοντα υπολογιστικά συστήματα όλες οι σημαντικές κλίμακες, και ότι ένας ικανός αριθμός μεγάλων κλιμάκων παραμένει αμετάβλητος από κάθε αλλαγή του αριθμού Reynolds. Ωστόσο το υπολογιστικό κόστος ακόμα και για τη σημερινή εποχή είναι τεράστιο, διότι προσομοιώσεις τέτοιου είδους χρειάζονται πολύ μεγάλο υπολογιστικό χρόνο.

- **Μοντέλα τύρβης δύο ρευστών**: η χρησιμότητα αυτών των μοντέλων έγκειται στο ότι επιτρέπουν σε δύο διαφορετικά ρευστά να υπάρχουν και να αλληλεπιδρούν στον ίδιο χώρο. Έτσι προσομοιάζεται η τμηματικότητα της τύρβης. Η έρευνα στο συγκεκριμένο χώρο είναι ακόμα σε αρχικό επίπεδο αλλά το μέλλον προδιαγράφεται πολλά υποσχόμενο (*(Spalding, 1983), (Malin, 1983), (Malin and Spalding, 1984)*).

- **Πρότυπα μεταφοράς τύρβης**: τα συγκεκριμένα μοντέλα αποτελούν τη βάση της προσέγγισης των μηχανικών. Με κύριο στόχο την εύρεση απλών μοντέλων για την περιγραφή των όρων των εξισώσεων της μεταφοράς ορμής, θερμότητας. Ως εκ τούτου ο βαθμός ομοιότητας των αναλυτικών θεωριών τύρβης με τα πρότυπα μοντέλα τύρβης οφείλεται στο ότι χρησιμοποιούν τις δυναμικές ποσότητες ως στατιστικά-μέσα πεδία. Ωστόσο η προσομοίωση των προτύπων μεταφοράς τύρβης επικεντρώνεται μόνο στα συνολικά χαρακτηριστικά της τύρβης, ενώ οι αναλυτικές θεωρίες αναδεικνύουν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διαφόρων κλιμάκων της κίνησης (*(Launder and Spalding, 1972)*).

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 τυρβωδών κινήσεων.

Η κατάταξη των διαφόρων 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 (*Μαρκάτος, 1998*) :

1. Μοντέλα μηδενικής εξίσωσης-μοντέλο μήκους ανάμιξης
2. Μοντέλα μίας διαφορικής εξίσωσης
3. Μοντέλα δύο διαφορικών εξισώσεων – μοντέλο $k \sim \epsilon$
4. Μοντέλα εξισώσεων τάσεων Reynolds
5. Μοντέλα αλγεβρικών εξισώσεων τάσεων Reynolds

6.5.2 Το μοντέλο $k\sim\epsilon$

Το μοντέλο $k\sim\epsilon$ είναι το πιο διαδεδομένο μοντέλο τύρβης και το πιο καλά επιβεβαιωμένο. Το συγκεκριμένο μοντέλο επικεντρώνεται στους μηχανισμούς που επιδρούν στη τυρβώδη κινητική ενέργεια. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το μοντέλο **RNG derived $k\sim\epsilon$** αλλά γίνεται αναφορά και στο μοντέλο $k\sim\epsilon$ προκειμένου να γίνει μια σύγκριση μεταξύ των δύο μοντέλων για να δικαιολογηθεί η επιλογή του **RNG derived $k\sim\epsilon$** .

Το μοντέλο $k\sim\epsilon$ των Launder and Spalding (*Launder and Spalding, 1974*) αποτελείται από δύο εξισώσεις, μία για το k και μία για το ϵ . Οι εξισώσεις για το μοντέλο $k\sim\epsilon$ περιέχονται στο *Παράρτημα II*.

Τα πλεονεκτήματα του μοντέλου $k\sim\epsilon$ είναι τα εξής (*Μαρκάτος, 1998*):

- ➔ Είναι το πιο απλό μοντέλο για το οποίο χρειάζονται μόνο αρχικές και οριακές συνθήκες.
- ➔ Εμφανίζει πολύ καλή λειτουργία σε πολλές βιομηχανικές ροές.
- ➔ Θεωρείται το πιο δημοφιλές και διαδεδομένο μοντέλο. Ενώ έχει γίνει καλή έρευνα μελέτης πάνω του.

Τα μειονεκτήματα του μοντέλου $k\sim\epsilon$ είναι αντιστοίχως (*Μαρκάτος, 1998*):

- ➔ Πιο δαπανηρό σε υπολογιστικό χρόνο από τα μοντέλα μήκους ανάμιξης (δύο επιπλέον διαφορικές εξισώσεις)
- ➔ Δεν εμφανίζει σωστή λειτουργία σε αρκετές περιπτώσεις όπως:
 - Μερικές ελεύθερες ροές
 - Ροές με μεγάλες πρόσθετες παραμορφώσεις (π.χ καμπύλα οριακά στρώματα, ροές περιδίνησης)
 - Περιστρεφόμενες ροές
- ➔ Έπειτα το μοντέλο $k\sim\epsilon$ και τα συναφή μοντέλα αναφοράς αγνοούν το 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 $k\sim\epsilon$ παρουσιάζει σοβαρά μειονεκτήματα όταν εφαρμόζεται για την πρόβλεψη ροών με περίπλοκα πεδία παραμορφώσεων ή με σημαντικές δυνάμεις σώματος. Κάτω από τέτοιες συνθήκες οι τάσεις του Reynolds δεν παριστάνονται ικανοποιητικά από τη σχέση Boussinesq ακόμα και αν η κινητική ενέργεια της τύρβης υπολογίζεται με ικανοποιητική ακρίβεια.

Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων έχουν προταθεί κατά καιρούς αρκετά μοντέλα δεύτερης τάξης, με ένα από τα πιο σπουδαία το **RNG derived $k\sim\epsilon$** των Yakhot και Orszag.

6.5.3 Το μοντέλο RNG derived $k\sim\epsilon$

Το μοντέλο που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη άσκηση είναι το μοντέλο τύρβης **RNG derived $k\sim\epsilon$** . Το συγκεκριμένο μοντέλο τύρβης επινοήθηκε από τους Yakhot και Orszag (*Yakhot and Orszag, 1986; Yakhot and Smith, 1992; Yakhot et al., 1992*) στο Πανεπιστήμιο του Πρίνστον, ενώ τα αρχικά **RNG** προέρχονται από τις λέξεις **Renormalization Group**. Η συγκεκριμένη εργασία των προσώπων που προαναφέρθηκαν παρουσιάζει τα αποτελέσματα μιας μικρής κλίμακας τύρβης με τη βοήθεια μιας τυχαίας λειτουργίας των εξισώσεων Navier-Stokes. Η διαδικασία του μοντέλου RNG μετακινεί συστηματικά της μικρής κλίμακας κίνηση από τις εξισώσεις εκφράζοντας τις επιδράσεις σε κινήσεις μεγαλύτερης κλίμακας καθώς και σε μεταβλητό ιξώδες. Οι τελικές εξισώσεις του μοντέλου τύρβης και οι τιμές των σταθερών του περιέχονται στο **Παράρτημα II** (*Yakhot et al., 1992*) :

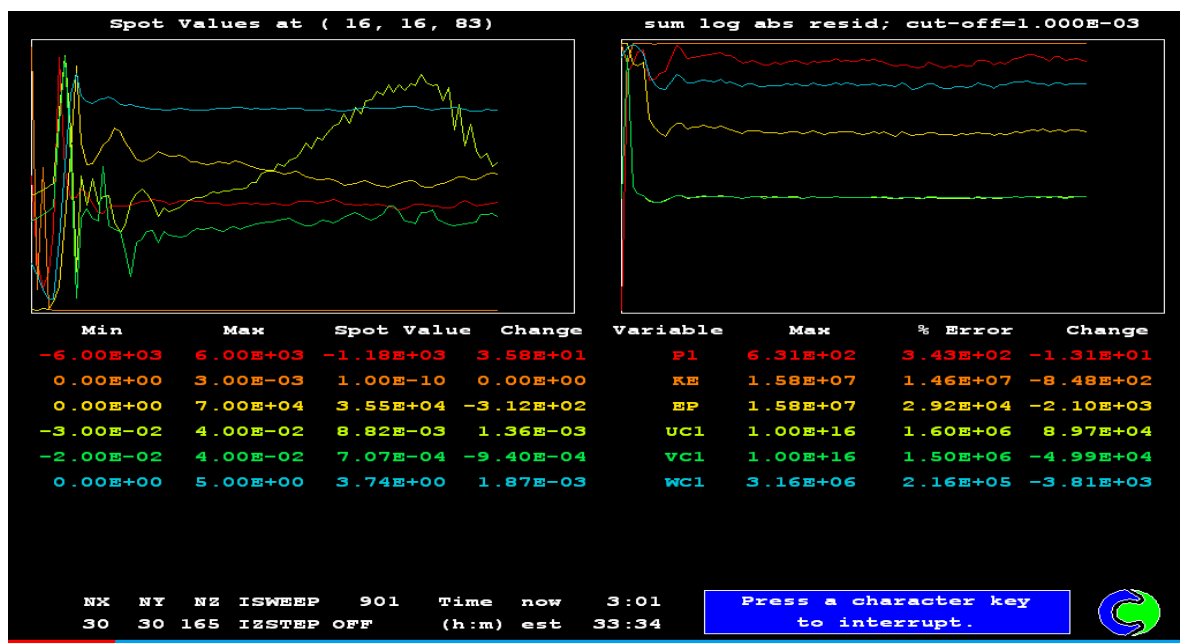
Το πλεονέκτημα του μοντέλου **RNG derived $k\sim\epsilon$** έγκειται στο ότι περιέχει ένα διορθωτικό όρο στη σταθερά $C_{1\epsilon}$ της ϵ -εξίσωσης του που εξαρτάται από την παραμόρφωση. Παράλληλα το μοντέλο μπορεί να εφαρμοσθεί είτε με τον μη-γραμμικό τύπο είτε με τον ισοτροπικό τύπο της τάσης Reynolds.

Τέλος το μοντέλο είναι ουσιαστικά μια παραλλαγή του $k\sim\epsilon$ μοντέλου και επομένως οι υπολογιστικοί υπολογισμοί είναι λίγο πιο δαπανηροί από το κλασσικό $k\sim\epsilon$, ωστόσο όμως οδηγεί σε βελτιώσεις στην πρόβλεψη περίπλοκων τυρβωδών ροών (*Μαρκάτος, 1998*).

7

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

Στο **Κεφάλαιο 7** παρουσιάζεται η μέθοδος αριθμητικής επίλυσης. Αρχικά γίνεται αναφορά στις αριθμητικές μεθόδους επίλυσης που υπάρχουν και στις διαφορές τους. Έπειτα ακολουθεί η μαθηματική ανάλυση της μεθόδου με την περιγραφή της διαδικασίας επίλυσης και τον αλγόριθμο επίλυσης. Εν συνεχεία περιγράφονται οι τέσσερις βασικοί κανόνες που πρέπει να πληρεί κάθε πιθανή μοντελοποίηση ενός προβλήματος. Τέλος αναφέρεται ο τρόπος σύγκλισης και η επιλογή των τεχνικών υποχαλάρωσης.



Εικόνα 7-1: Παράθυρο ελέγχου του PHOENICS.

7. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

7.1 Μέθοδος πεπερασμένων όγκων ελέγχου (F.V.M)

Η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων ελέγχου είναι 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 αριθμητικές μεθόδους επίλυσης. Οι αριθμητικές τεχνικές επίλυσης προβλημάτων ακολουθούν κάποια βήματα που καθορίζουν την διαδικασία επίλυσης (*Versteeg and Malalasekera, 1995*):

1. Προσέγγιση των άγνωστων μεταβλητών ροής με τη βοήθεια απλών διαδικασιών.
2. Διακριτοποίηση με μετασχηματισμό των διαφορικών εξισώσεων σε αλγεβρικές εξισώσεις.
3. Επίλυση των αλγεβρικών εξισώσεων.

Οι κύριες διαφορές μεταξύ των τριών διαφορετικών μεθόδων σχετίζονται με τις προσεγγίσεις των μεταβλητών ροής και με τη διαδικασία διακριτοποίησης. Το πιο μεγάλο πλεονέκτημα που έχει η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων ελέγχου είναι ότι η προκύπτουσα λύση τηρεί την ολοκληρωτική διατήρηση μάζας, ορμής και θερμότητας για όλους τους όγκους ελέγχου, επομένως και για ολόκληρο το πεδίο. Η ιδιότητα αυτή τηρείται για οποιονδήποτε αριθμό πλεγματικών σημείων, δηλαδή δεν έχει την έννοια της οριακής ισχύος όταν ο αριθμός των πλεγματικών σημείων αυξάνει πολύ. Αν όντως αυξήσουμε τον αριθμό των πλεγματικών σημείων, η λύση που προκύπτει προσεγγίζει ολοένα και περισσότερο τη πραγματική. Παράλληλα είναι η πιο εύκολη μέθοδος για εκμάθηση ιδίως από μηχανικούς σε σχέση με τις άλλες δύο μεθόδους. Ως εκ τούτου η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων ελέγχου είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος στους εμπορικούς κώδικες υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) και εφαρμόζεται στους παρακάτω:

- ➔ **PHOENICS, CHAM Ltd.**
- ➔ **FLUENT, FLUENT Inc.**
- ➔ **FLOW-3D, FLOW SCIENCE Inc.**
- ➔ **STAR-CD, COMPUTATIONAL DYNAMICS Ltd.**
- ➔ **CFX, ANSYS.**

Για πιο λεπτομερή ενημέρωση για τις δυνατότητες των παραπάνω υπολογιστικών κωδίκων ρευστοδυναμικής μπορεί να ανατρέξει κανείς στις αντίστοιχες ιστοσελίδες των εταιρειών τους στο διαδίκτυο.

Επίσης, προτείνεται και ένα άρθρο του Freitas (*Freitas, 1994*) που συγκρίνει τους κώδικες με βάση τις επιδόσεις τους σε συγκεκριμένα προβλήματα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, που έχουν συσχετιστεί και με αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα. Έτσι ο αναγνώστης μπορεί να συγκρίνει τις δυνατότητες τους, την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων τους σύμφωνα πάντα με τα πειραματικά δεδομένα, αλλά και τον υπολογιστικό χρόνο που χρειάζονται για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων.

Η αντιμετώπιση του τρισδιάστατου προβλήματος που πραγματεύεται η συγκεκριμένη εργασία θα γίνει με τη χρήση του υπολογιστικού κώδικα ρευστομηχανικής **PHOENICS** (*Λονδίνο 1981*) από τα αρχικά των λέξεων, **Parabolic Hyperbolic Or Elliptic Numerical Integration Code Series** της εταιρίας **CHAM Ltd (Concentration, Heat and Momentum Limited)**, η οποία ιδρύθηκε το 1974 (www.cham.co.uk , *Site CHAM Ltd*).

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

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη διακριτοποίηση του πεδίου επίλυσης σε μικρότερους όγκους ελέγχου που δεν αλληλεπικαλύπτονται και περιβάλλουν ο καθένας ένα πλεγματοειδές σημείο. Δηλαδή το πεδίο υπολογισμού διαιρείται σ' έναν αριθμό όγκων ελέγχου, που ο καθένας περικλείει έναν κόμβο και η διαφορική εξίσωση ολοκληρώνεται πάνω σε κάθε όγκο ελέγχου. Τέλος περιλαμβάνει τρία στάδια: τη δημιουργία πλέγματος, τη διακριτοποίηση και τέλος την επίλυση των εξισώσεων (*Μαρκάτος, 1988*). Η όλη διαδικασία θα περιγραφεί στην παρακάτω ενότητα της μαθηματικής ανάλυσης της μεθόδου.

7.2 Μαθηματική ανάλυση μεθόδου

7.2.1 Ολοκληρωτική μορφή της εξίσωσης μεταφοράς

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

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi\mathbf{u}) = \text{div}(\Gamma \text{grad } \phi) + S_\phi \quad (7-1)$$

Όπου:

- t : ο χρόνος
- ρ : η πυκνότητα του ρευστού
- Φ : η μεταβλητή Φ ανά μονάδα μάζας
- \vec{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:

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

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:

$$\int_{CV} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int_{CV} \text{div}(\rho\phi\tilde{u}) dV = \int_{CV} \text{div}(\Gamma \cdot \text{grad}\phi) dV + \int_{CV} S_\phi dV \quad (7-2)$$

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

$$\int_{CV} \text{div}\tilde{a} dV = \int_A \tilde{n} \cdot \tilde{a} dA \quad (7-3)$$

Όπου το $\tilde{n} \cdot \tilde{a}$ είναι η συνιστώσα του \tilde{a} στη διεύθυνση του \tilde{n} που είναι το κάθετο μοναδιαίο άνυσμα στην επιφάνεια A.

Επομένως προκύπτει :

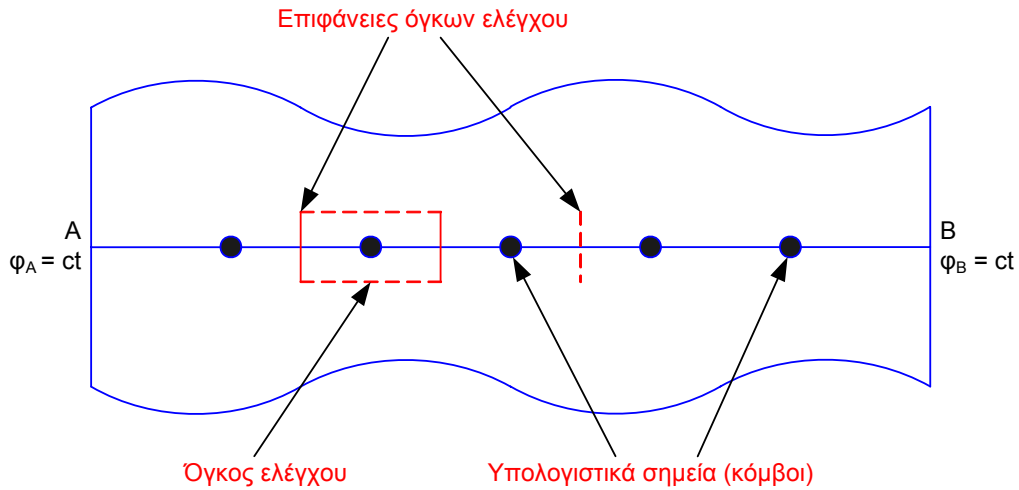
$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{CV} \rho\phi dV \right) + \int_A \tilde{n} \cdot (\rho\phi\tilde{u}) dA = \int_A \tilde{n} \cdot (\Gamma \cdot \text{grad}\phi) dA + \int_{CV} S_\phi dV \quad (7-4)$$

7.2.2 Περιγραφή διαδικασίας επίλυσης

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, διάχυσης και συναγωγής.

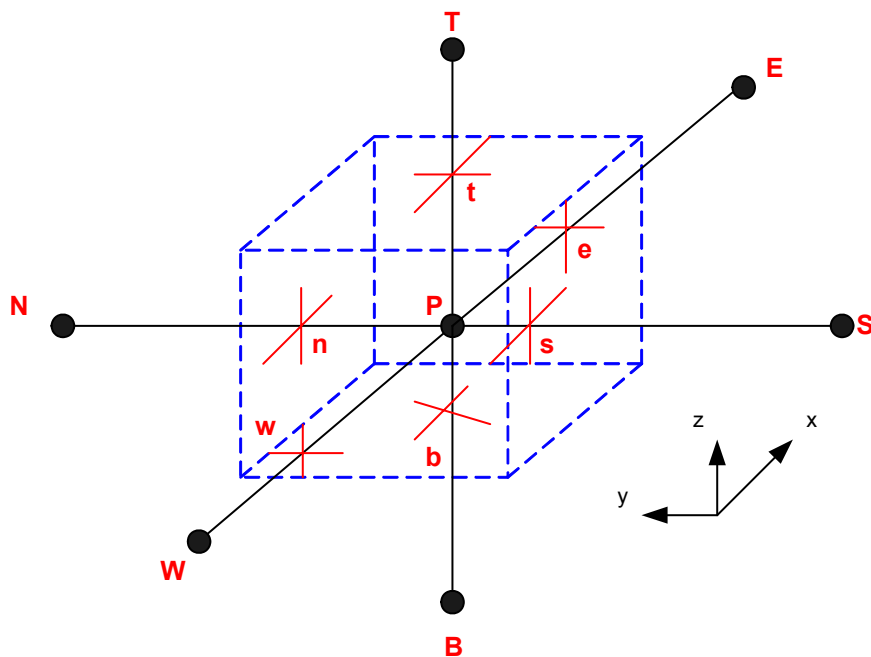
Στάδιο 1^ο: Δημιουργία πλέγματος – Όγκοι Ελέγχου

Το αρχικό βήμα στη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων ελέγχου είναι η διαίρεση του πεδίου σε επιμέρους όγκους ελέγχου όπως στο **Σχήμα (7-1)**. Έπειτα υφίσταται ολοκλήρωση όλων των εξισώσεων διατήρησης του ρευστού πάνω σε όλους τους πεπερασμένους όγκους ελέγχου του χωρίου επίλυσης.



Σχήμα 7-1: Διαίρεση του υπολογιστικού πεδίου σε όγκους ελέγχου (Versteeg and Malalasekera, 1995).

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 **Σχήμα (7-2)** 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.



Σχήμα 7-2: Στοιχειώδης όγκος ελέγχου (Versteeg and Malalasekera, 1995).

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 (7-4) για τον όγκο ελέγχου του Σχήματος (7-2) θα έχουμε:

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho\phi] V_p + (g_e - g_w) + (g_n - g_s) + (g_h - g_l) = [S_v] V_p \quad (7-5)$$

Όπου:

$$g_i = \iint_{A_e} \left(\rho \tilde{u}_i \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dA_i \quad (7-6)$$

με $\mathbf{i} = \mathbf{e}, \mathbf{t}, \mathbf{s}, \mathbf{n}, \mathbf{b}, \mathbf{w}$ 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:

$$[\rho\phi] V_p = \rho_p \phi_p V_p \quad (7-7) \quad \text{και} \quad [S_\phi] V_p = S_{\phi,p} V_p \quad (7-8)$$

2. Ομοιόμορφη κατανομή των ποσοτήτων στα μέτωπα του όγκου ελέγχου.

$$g_i = (\rho u)_i A_i \phi_i - \Gamma_i A_i \left[\frac{\partial \phi}{\partial x} \right]_i \quad (7-9) \quad , \quad \text{με } \mathbf{i} = \mathbf{e}, \mathbf{t}, \mathbf{s}, \mathbf{n}, \mathbf{b}, \mathbf{w}$$

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:

$$(CE + DE) - (CW + DW) + (CN + DN) - (CS + DS) + (CT + DT) - (CB + DB) = S_{\phi,P} V_P \quad (7-10)$$

Στην εξίσωση (7-10) οι όροι CE, CW, κ.ο.κ. εκφράζουν τους όρους συναγωγής, ενώ οι όροι DE, DW, κ.ο.κ. εκφράζουν την διάχυση. Ως εκ τούτου θα έχουμε:

$$C_i = (\rho u)_i A_i \Phi_i \quad (7-11) \qquad D_i = \Gamma_i A_i \left[\frac{\partial \phi}{\partial x} \right]_i \quad (7-12)$$

όπου: $\mathbf{i} = \mathbf{e}, \mathbf{t}, \mathbf{s}, \mathbf{n}, \mathbf{b}, \mathbf{w}$, επίσης οι τιμές της πυκνότητας και του συντελεστή Γ υπολογίζονται με γραμμική παρεμβολή.

Εν συνεχεία για τον υπολογισμό των όρων συναγωγής και διάχυσης χρησιμοποιείται κάποιο σχήμα διακριτοποίησης. Στη συγκεκριμένη εργασία έγινε χρήση τριών σχημάτων, του **Υβριδικού** (*Spalding, 1972; Μαρκάτος και Ασημακόπουλος, 1995*) του **Van Leer** (*Van Leer, 1973; 1974; 1979*) και του **QUICK** (*Leonard, 1979; Hayase et al., 1992*). Εκ των οποίων επιλέχθηκε το **QUICK** εξαιτίας των καλύτερων αποτελεσμάτων σε σύγκριση με τα άλλα σχήματα. Όπως είναι γνωστό το **Υβριδικό** είναι πρώτης τάξης σε όρους σφάλματος Taylor, ενώ το **Van Leer** και αντίστοιχα το **QUICK** είναι δεύτερης και τρίτης τάξης.

Το κύριο πλεονέκτημα του **QUICK** είναι ότι ελαχιστοποιεί τα σφάλματα ψευτοδιάχυσης αλλά είναι αρκετά ασταθές υπολογιστικά, γι' αυτό χρειάζεται σωστή χρήση και αρκετή εμπειρία για την εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων με μεγάλη ακρίβεια. Επίσης έχει πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα σε σχέση με τα σχήματα κεντρικών διαφορών ή υβρικών ενώ παράλληλα διατηρεί τα χαρακτηριστικά των ανάντι διαφορών.

Στα μειονεκτήματά του συγκαταλέγονται, η εμφάνιση μικρών ταλαντώσεων κατά την απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε διάγραμμα 2D ενώ σε σύνθετες ροές μπορεί να δώσει αρνητικές τιμές στην κινητική ενέργεια τύρβης του μοντέλου **k-ε** (*Versteeg and Malalasekera, 1995*).

Οι εξισώσεις διακριτοποίησης για το **QUICK** του **Leonard** για ένα οποιοδήποτε εσωτερικό κόμβο θα έχουν την εξής μορφή (*Versteeg and Malalasekera, 1995*):

$$\alpha_P \phi_P = \alpha_W \phi_W + \alpha_E \phi_E + \alpha_{WW} \phi_{WW} + \alpha_{EE} \phi_{EE} \quad (7-13)$$

Όπου:

$$\alpha_P = \alpha_W + \alpha_E + \alpha_{WW} + \alpha_{EE} + (F_e - F_w) \quad (7-14)$$

Οι γειτονικές σταθερές του σχήματος **QUICK** είναι :

Πίνακας 7-1: Οι τιμές των σταθερών για το QUICK (Versteeg and Malalasekera, 1995).

	QUICK
α_W	$D_w + \frac{6}{8}\alpha_w F_w + \frac{1}{8}\alpha_e F_e + \frac{3}{8}(1 - \alpha_w)F_w$
α_{WW}	$-\frac{1}{8}\alpha_w F_w$
α_E	$D_e - \frac{3}{8}\alpha_e F_e - \frac{6}{8}(1 - \alpha_e)F_e - \frac{1}{8}(1 - \alpha_w)F_w$
α_{EE}	$\frac{1}{8}(1 - \alpha_e)F_e$

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 υπερχαλάρωσης, κ.α. Παρακάτω ακολουθεί η περιγραφή του αλγόριθμου επίλυσης που χρησιμοποιήθηκε για την αντιμετώπιση του προβλήματος.

7.3 Αλγόριθμος επίλυσης

7.3.1 Εισαγωγή

Για την επίλυση μιας ορισμένης Φ μεταβλητής όπως της παραπάνω εξίσωσης (7-4) 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 τους 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 επιτυχημένος 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.

Μία 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» $\tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{w}$, 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 πίεσεως (*Μαρκάτος, 1988*).

Επομένως ο **SIMPLER** 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 εφαρμοστή 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*).

7.3.2 Αλγόριθμος SIMPLEST

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

Ως εκ τούτου, τα βήματα του αλγόριθμου που είναι αντίστοιχα ίδια με του **SIMPLE** είναι (*Μαρκάτος και Ασημάκοπουλος, 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, συγκέντρωσης συστατικού).
7. Επιστροφή στον Βήμα 1, θέσε $p^* = p$ και επανέλαβε μέχρι να πραγματοποιηθεί 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 συγκεντρώνεται μαζί με τους όρους πηγής όπου αντιμετωπίζονται ως γνωστές σταθερές. Κατά αυτόν το 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*).

7.3.3 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τον Jang (*Jang et al, 1986*) σε μια σύγκριση που έκανε για τους αλγόριθμους **PISO**, **SIMPLER**, 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 **SIMPLER** και **SIMPLEC** επειδή έχουν πολύ καλή σύγκλιση, αλλά τίποτα δεν μπορεί να βεβαιώσει ότι ο ένας σε σχέση με τον άλλο αλγόριθμο είναι ανώτερος του ή όχι. Επιπλέον είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί ότι όλοι αλγόριθμοι χρειάζονται υποχαλάρωση προκειμένου να εξασφαλίσουν σταθερότητα στις επαναληπτικές μεθόδους.

Ο Anderson και η ομάδα του (*Anderson et al., 1984*) υποστηρίζουν ότι ο αλγόριθμος **SIMPLER** 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 **SIMPLEST** αποτελούν προσπάθειες εξάλειψης των μειονεκτημάτων του **SIMPLE** και δημιουργίας μιας άριστη 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 **SIMPLEST**, η ολοκλήρωση της αριθμητικής επίλυσης θα γίνει με την αναφορά των τεσσάρων βασικών κανόνων που θα πρέπει να πληρεί η μοντελοποίηση του προβλήματος.

7.4 Οι τέσσερις βασικοί κανόνες

Για να εξασφαλίζεται ρεαλιστική λύση και κλειστό ολικό ισοζύγιο, οι εξισώσεις διακριτοποίησης πρέπει να υπακούουν στους τέσσερις βασικούς κανόνες.

Οι τέσσερις βασικοί κανόνες που χρειάζεται να πληρεί κάθε πιθανή μοντελοποίηση ενός προβλήματος που επιλύεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων ελέγχου είναι οι εξής (*Patankar, 1980*), (*Μαρκάτος, 1988*):

1. **Αντιστρεπτότητα** : Όταν μια επιφάνεια είναι κοινή σε δύο γειτονικούς όγκους ελέγχου, τότε η ροή διαμέσου της επιφάνειας αυτής πρέπει να αναπαρίσταται από την ίδια έκφραση στις διακριτοποιημένες εξισώσεις για τους δύο όγκους ελέγχου. Έτσι η θερμική ροή που εγκαταλείπει έναν όγκο ελέγχου διαμέσου μιας επιφάνειάς του πρέπει να είναι ίδια με τη 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 επηρεάζονται από τις τιμές στους γειτονικούς του 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 θα πρέπει να οδηγεί σε αύξηση της T_P οπότε οι συντελεστές a_E και a_P είναι ομόσημοι. Επιλέγουμε τους συντελεστές να είναι θετικοί και άρα όλοι οι συντελεστές θα πρέπει πάντα να είναι θετικοί.
3. **Γραμμικοποίηση πηγών με αρνητική κλίση** : Σύμφωνα με την εξίσωση (7-4), ακόμη και αν εμφανίζονται οι γειτονικοί συντελεστές θετικοί, ο συντελεστής του κεντρικού σημείου μπορεί να προκύψει αρνητικός μέσω του όρου S_P . Ο κίνδυνος αυτός εξαλείφεται αν απαιτήσουμε ο όρος S_P να μην είναι θετικός. Ο κανόνας αυτός δεν είναι τόσο αυθαίρετος όσο φαίνεται. 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 που οδηγεί με τη σειρά του σε νέα αύξηση του T_P . Τέλος από υπολογιστικής άποψης είναι απόλυτα απαραίτητο να κρατηθεί το S_P αρνητικό ώστε να μην δημιουργηθεί αστάθεια και μη ρεαλιστικές λύσεις.
4. **Άθροισμα των γειτονικών συντελεστών** : Πολλές φορές οι διαφορικές εξισώσεις περιέχουν μόνο παραγώγους των μεταβλητών. Τότε Φ και $\Phi+c$ (όπου c αυθαίρετη σταθερά) ικανοποιούν τη 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 τα T_P και όλα τα T_Γ κατά μια σταθερά. Έτσι θεσπίζεται ο κανόνας 4 σύμφωνα με τον οποίο θα πρέπει $\alpha_P = \sum a_\Gamma$ στις περιπτώσεις όπου η διαφορική εξίσωση ικανοποιείται από το Φ και το $\Phi+c$. Ο κανόνας αυτός υπονοεί ότι η κεντρική τιμή T_P είναι ένας σταθμισμένος μέσος όρος των γειτονικών τιμών T_Γ . Όταν όμως ο όρος πηγής εξαρτάται από τη θερμοκρασία τότε παρατηρείται ότι ισχύει: $\alpha_P = \sum a_\Gamma - S_P$. Σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει παραβίαση του κανόνα αλλά μια περίπτωση μη εφαρμογής του κανόνα. Όταν ο όρος πηγής εξαρτάται από τη θερμοκρασία τότε η διαφορική εξίσωση δεν ικανοποιείται από τη Φ και από την $\Phi+c$. Ακόμη όμως και σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να ισχύει $S_P = 0$. Όταν δεν υπάρχει όρος πηγής και όλα τα T_Γ είναι ίσα τότε θα πρέπει και η κεντρική θερμοκρασία T_P να είναι ίση με τις γειτονικές. Μόνο μία πολύ κακή μέθοδος δεν θα έδινε τέτοια λύση υπό αυτές τις συνθήκες.

7.5 Τεχνικές υποχαλάρωσης

Για την καλύτερη σύγκλιση και την αποφυγή μεγάλων διακυμάνσεων των μεταβλητών ανάμεσα σε δυο διαδοχικές επαναλήψεις, που θα μπορούσαν να προκαλέσουν απόκλιση της λύσης, χρησιμοποιείται η τεχνική της υποχαλάρωσης. Ο κώδικας PHOENICS χρησιμοποιεί δύο μεθόδους υποχαλάρωσης (www.cham.co.uk, Site CHAM Ltd).

7.5.1 Γραμμική υποχαλάρωση

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

$$\phi^{new} = \alpha\phi^{new} + (1 - \alpha)\phi^{old} \quad (7-15)$$

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. Στην αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος η γραμμική υποχαλάρωση χρησιμοποιείται για την πίεση.

7.5.2 Υποχαλάρωση ψευδούς χρονικού βήματος

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

$$S_{\phi} = (\rho V)_P \frac{\phi^{old} - \phi^{new}}{df_t} \quad (7-16)$$

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

$$S_u = \frac{(\rho V)_P}{df_t} \phi^{old} \quad (7-17)$$

$$S_P = -\frac{(\rho V)_P}{dt_f} \quad (7-18)$$

Ο συντελεστής df_t ονομάζεται συντελεστής υποχαλάρωσης και εκφράζει το ψευδές χρονικό βήμα. Όσο μικρότερος είναι ο συντελεστής αυτός, τόσο πιο μεγάλη είναι η τιμή των όρων S_u και S_P . Ως εκ τούτου η νέα λύση τείνει να ταυτιστεί με τη προηγούμενη επανάληψη (ισχυρή υποχαλάρωση).

7.6 Σύγκλιση

Η σύγκλιση είναι το αποτέλεσμα της μετάθεσης του λάθους και της εξάλειψης του στα όρια. Όσον αφορά την επίτευξη σύγκλισης εφαρμόστηκαν τα παρακάτω κριτήρια:

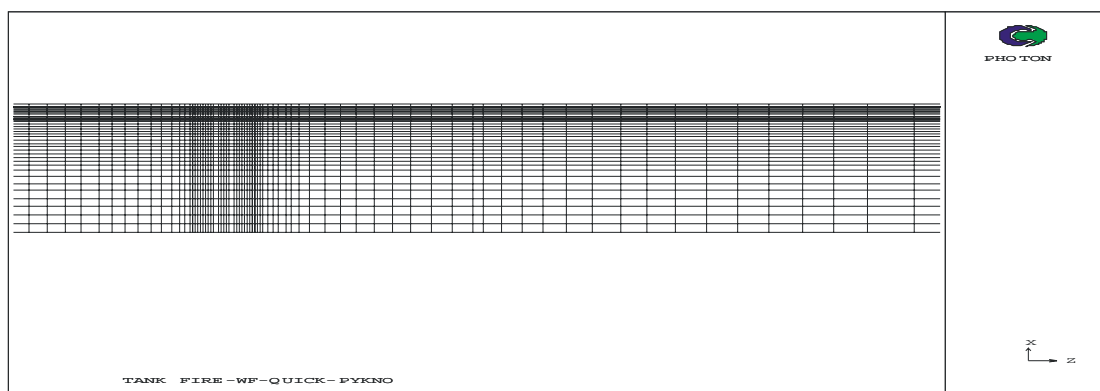
1. Η πτώση των υπολοίπων στις εξισώσεις κάτω από μια τιμή που έχει προεπιλεγεί από τον χρήστη. Τα υπόλοιπα εκφράζουν τις διαφορές των μεταβλητών μεταξύ δυο διαδοχικών επαναλήψεων.
2. Η σταθερότητα της τιμής μιας μεταβλητής σε κάποιο κρίσιμο σημείο (**spot value**), δηλαδή σε κάποιο σημείο όπου υπάρχουν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



ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ

ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Στο **Κεφάλαιο 8** γίνεται αναφορά στην ανάπτυξη του αριθμητικού μοντέλου. Αρχικά παρουσιάζεται ο υπολογισμός του ρυθμού καύσης και η εξάρτηση της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος σύμφωνα με τον εκθετικό νόμο. Έπειτα επιλέγεται το κατάλληλο πεδίο ροής και πλέγμα για την προσομοίωση του προβλήματος. Τέλος γίνεται μελέτη ανεξαρτησίας της λύσης από το πλέγμα προκειμένου να αποδειχθεί ότι το πλέγμα που έχει επιλεγεί ως βασικό πράγματι ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις του προβλήματος.



Εικόνα 8-1: Επιλογή βασικού πλέγματος για την αριθμητική προσομοίωση του προβλήματος.

8. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

8.1 Υπολογισμός ρυθμού καύσης και ο εκθετικός νόμος για την εξάρτηση της ταχύτητας με το ύψος

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία προκειμένου να υπολογισθεί ο ρυθμός απώλειας μάζας ανά μονάδα εμβαδού, δίνεται από τον παρακάτω τύπο (*Mudan, 1984*):

$$y''' = y'''_{\text{inf}} (1 - e^{-kd}) \quad (8-1)$$

Όπου

y''' : ρυθμός απώλειας μάζας

y'''_{inf} : ρυθμός απώλειας μάζας για φωτιά λίμνης άπειρης ακτίνας

k: συντελεστής μείωσης

d: διάμετρος της λίμνης φωτιάς

Ο ρυθμός απώλειας μάζας προσδιορίζεται από την σχέση:

$$q' = H_c \cdot m''' \cdot A \quad (8-2)$$

Όπου:

q' : ρυθμός έκλυσης θερμότητας

H_c : ειδική ενθαλπία καύσης του υλικού

A : το εμβαδόν της επιφάνειας καύσης

Ωστόσο στις φωτιές λίμνης διακρίνονται δύο περιπτώσεις. Αυτές είναι η φωτιά περιορισμένης λίμνης και η φωτιά μη-περιορισμένης λίμνης. Η διαφορά μεταξύ αυτών των δύο καταστάσεων στηρίζεται στο αν υπάρχει κατάλληλη μορφολογία στο έδαφος που να περιορίζει ή μη την εξάπλωση της λίμνης του υγρού. Στην περίπτωση μεγάλων δεξαμενών αποθήκευσης καυσίμων, τα όρια για την εξάπλωση της λίμνης του υγρού μπορεί να είναι φυσικά ή τεχνητά, όπως είναι τα φράγματα (bunds) από τσιμέντο ή φυσικά αναχώματα.

Όταν υφίσταται περιορισμένη κλίμακα φωτιά λίμνης ο προσδιορισμός της έκτασης της είναι πιο εύκολος σε σχέση με την δεύτερη περίπτωση που πρέπει να γίνουν υποθέσεις για την ποσότητα του υγρού που διαρρέει και για το ύψος του υγρού της λίμνης που σχηματίζεται (*Κεφαλάς, 2004*).

Στην παρούσα εργασία για την διάμετρο της δεξαμενής που προσομοιώνεται δεν υπάρχει από τη βιβλιογραφία κάποια τιμή που να περιγράφει τον ρυθμό καύσης ($\text{kg/m}^2\text{s}$) για κάποια συγκεκριμένη φωτιά που έχει συμβεί στο παρελθόν. Επίσης πειραματικά δεδομένα δεν υπάρχουν, η μόνη προσπάθεια που αναφέρεται στην βιβλιογραφία για λήψη πειραματικών δεδομένων έγινε στην Ιαπωνία από τους Koseki et al. (*Koseki et al., 2000*) όπου επιχείρησαν να πάρουν μετρήσεις για φωτιά λίμνης διαμέτρου 80 m αλλά δυστυχώς η προσπάθειά τους ήταν άκαρπη εξαιτίας των άσχημων καιρικών συνθηκών που επικρατούσαν τη μέρα του πειράματος.

Οι μόνες βιβλιογραφικές αναφορές προσομοίωσης φωτιάς σε δεξαμενή με ίδια διάμετρο προέρχονται από τους McGrattan και Baum (*Baum and McGrattan, 1998; McGrattan and Baum, 1999*) όπου εφάρμοσαν μία μεθοδολογία για την αριθμητική προσομοίωση ακτινοβολίας για τον προσδιορισμό της σε γειτονικές δεξαμενές. Για την αριθμητική προσομοίωση γίνεται χρήση του μοντέλου μεγάλων δινών (LES) για την τύρβη με τροποποιημένη την εξίσωση Smagorinsky.

Τέλος πάλι με την ίδια μέθοδο οι McGrattan et al. (*McGrattan et al., 1997*) έχουν προσομοιώσει την κίνηση πλουμίου με πολύ καλά αποτελέσματα. Παρόλα αυτά οι McGrattan και Baum παίρνουν αυθαίρετα για τη μελέτη τους περίπτωση έκλυσης θερμότητας ίση με 1000 KW/m^2 για συνολική ισχύ πηγής 5.3 GW. Επίσης στην έρευνά τους γίνεται αναφορά ότι ένα ποσοστό της τάξης του 35 % της ισχύος μετατρέπεται σε θερμική ακτινοβολία. Στη βιβλιογραφία γενικότερα συναντάμε διάφορες τιμές αλλά ο μέσος όρος κυμαίνεται μεταξύ του 30-35 %.

Ακολουθώντας το παράδειγμα τους γίνεται επιλογή τριών περιπτώσεων έκλυσης θερμότητας με τιμές ίσες με 1000 KW/m^2 , 700 KW/m^2 και 300 KW/m^2 με αφαίρεση του 30 %, εκλύεται ποσό θερμότητας μέσω των καυσαερίων ίσο με το 70 % του συνολικού που μετατρέπεται σε θερμική ακτινοβολία.

Για την παραμετρική μελέτη του φαινομένου θα χρησιμοποιηθούν πηγές με εκλύομενη ισχύ στα καυσαέρια ίση με 700 KW/m^2 , 500 KW/m^2 και 200 KW/m^2 αντίστοιχα. Τέλος ο ρυθμός καύσης λαμβάνεται ίσος με ίσος με $0,027 \text{ kg/m}^2\text{s}$ έπειτα από προσαρμογή στην ενδιάμεση τιμή από τις τιμές $0,015 \text{ kg/m}^2\text{s}$ (*Πετρόλα, 1997*) και $0,060 \text{ kg/m}^2\text{s}$ του HSE.

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 από το έδαφος και επομένως παρουσιάζονται μεγάλες συγκεντρώσεις στην περιοχή γύρω από το σημείο της φωτιάς 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.

$$u = u_{\delta} \left(\frac{h}{\delta} \right)^a \quad (8-3)$$

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

a: ο εκθέτης ο οποίος λαμβάνεται στη συγκεκριμένη περίπτωση ίσος με 0,19

Οι τιμές του εκθέτη επιλέγονται αναλόγως με τις συνθήκες ατμόσφαιρας που επικρατούν.

8.2 Πεδίο ροής και υπολογιστικό πλέγμα

Όπως αναφέρθηκε και από την περιγραφή του φυσικού προβλήματος το πεδίο ροής είναι τρισδιάστατο με διαστάσεις αντίστοιχα:

Πίνακας 8-1: Διαστάσεις του πεδίου ροής του χώρου προσομοίωσης.

Διάσταση	Μήκος (Z)	Πλάτος (X)	Ύψος (Y)
Τιμή (m)	12771	1500	1800

Ωστόσο η ταχύτητα του ανέμου ταυτίζεται με την διεύθυνση του Z του υπολογιστικού πεδίου. Έτσι προκύπτει ένα επίπεδο συμμετρίας παράλληλο στη διεύθυνση Z και όπου διέρχεται από τη μέση της πηγής, αυτό δίνει την δυνατότητα να περιοριστεί η ανάλυση στο μισό πεδίο ροής. Επομένως το υπολογιστικό πεδίο είναι το μισό και έτσι επιτυγχάνεται μείωση του υπολογιστικού χρόνου κατά το μισό. Δηλαδή το πλάτος του υπολογιστικού πεδίου θα γίνει ουσιαστικά 750 m.

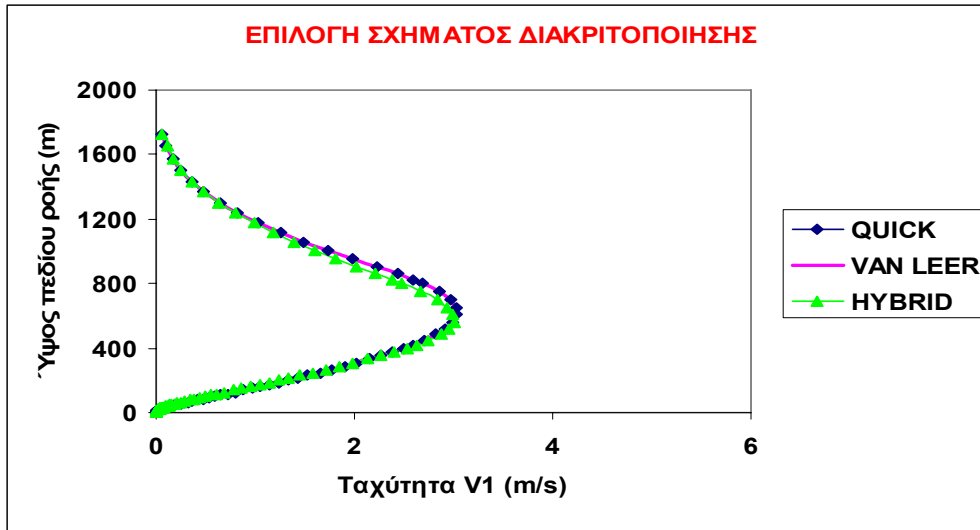
Η επιλογή του σχήματος διακριτοποίησης όπως αναφέρθηκε και στο **Κεφάλαιο 7** έγινε με κριτήριο την καλύτερη σύγκλιση και την μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων. Έτσι έγιναν αριθμητικές προσομοιώσεις πάνω σε πλέγμα με διαστάσεις (**38×86×118**) στον υπολογιστικό κώδικα **PHOENICS** όπου και δοκιμάστηκαν τα εξής σχήματα διακριτοποίησης: **Υβριδικό, Van Leer και QUICK (Διάγραμμα 8-1)**. Από τις δοκιμές αριθμητικής προσομοίωσης συνάγεται ότι παρόλο που το **QUICK** είναι υπολογιστικά ασταθές σε σχέση με τα άλλα δύο σχήματα έδωσε καλύτερα αποτελέσματα σύγκλισης, αλλά δαπανώντας περισσότερο υπολογιστικό χρόνο μέχρι να συγκλίνει (**Πίνακας 8-2**).

Πίνακα 8-2: Σύγκριση σχημάτων διακριτοποίησης.

Πλέγμα	Σχήμα Διακριτοποίησης	Επαναλήψεις	Υπολογιστικός χρόνος
38×86×118	QUICK	10000	34 h
38×86×118	Van Leer	10000	32 h
38×86×118	Υβριδικό	10000	26 h

Επίσης υπήρχε αρκετή δυσκολία στο να συγκλίνει η αριθμητική προσομοίωση με το σχήμα **QUICK** που οφείλεται στην υπολογιστική αστάθεια του σχήματος. Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με σωστή ρύθμιση τόσο της γραμμικής υποχαλάρωσης όσο και της υποχαλάρωση ψευδούς χρονικού βήματος.

Τέλος την μεγαλύτερη υπολογιστική σταθερότητα ως σχήμα παρουσίασε το **Van Leer** αλλά χωρίς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων του **QUICK**.



Διάγραμμα 8-1: Σχέση ύψους πεδίου ροής και ταχύτητας V1 σε απόσταση 5376 m από την αρχή του πεδίου.

8.3 Μελέτη ανεξαρτησίας της λύσης από το πλέγμα

Ένα σημαντικό στάδιο της αριθμητικής προσομοίωσης είναι η σωστή επιλογή του βασικού πλέγματος όπου με βάση αυτό θα γίνει και η περαιτέρω παραμετρική μελέτη του φαινομένου. Η σωστή επιλογή του κατάλληλου πλέγματος είναι αυτή που καθορίζει την ακριβή επίλυση και την ελαχιστοποίηση του απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου.

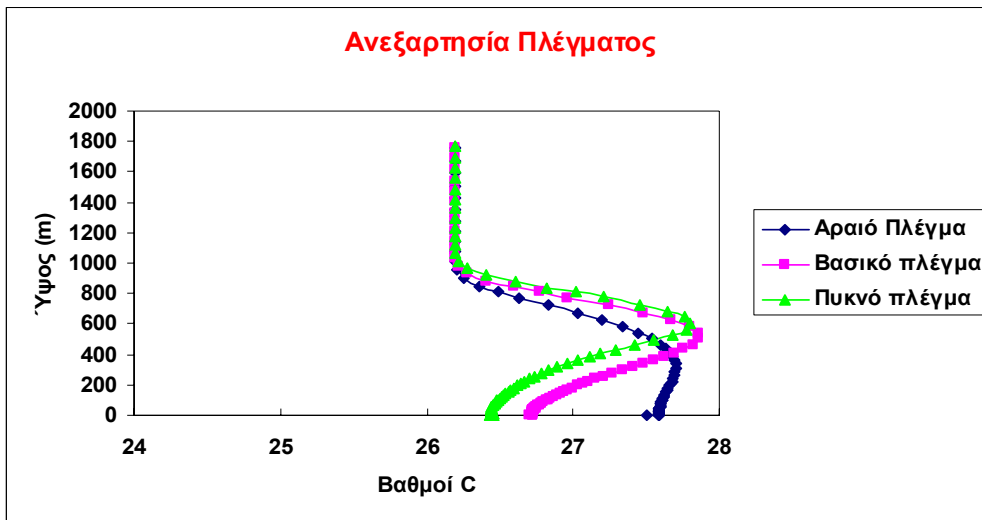
Με τον όρο ανεξαρτησία της λύσης από το πλέγμα εννοείται η πύκνωση εκείνων των περιοχών του πλέγματος οι οποίες εμφανίζουν τη μεγαλύτερη κλίση των μετρούμενων μεγεθών. Κάθε φορά πυκνώνεται μόνο μια περιοχή και ελέγχεται εάν η προκύπτουσα λύση ταυτίζεται με την λύση του αραιότερου πλέγματος. Εάν οι δύο λύσεις είναι ίδιες τότε επιλέγεται το πιο αραιό πλέγμα, εάν όχι τότε επιλέγεται το πιο πυκνό. Η διαδικασία της ανεξαρτησίας πλέγματος σταματά όταν για οποιαδήποτε πύκνωση οποιασδήποτε περιοχής (από αυτές που έχουν επιλεγεί για την ανεξαρτησία) τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ταυτίζονται.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση έγινε χρήση τριών πλεγμάτων διαφορετικών διαστάσεων προκειμένου να εξεταστεί η ανεξαρτησία λύσης από το πλέγμα. Αρχικά έγινε επιλογή ενός *αραιού πλέγματος* ($31 \times 75 \times 103$), εν συνεχεία ενός πυκνότερου με διαδοχική πύκνωση στις υποπεριοχές του πεδίου όπου υπάρχουν έντονες κλίσεις, το

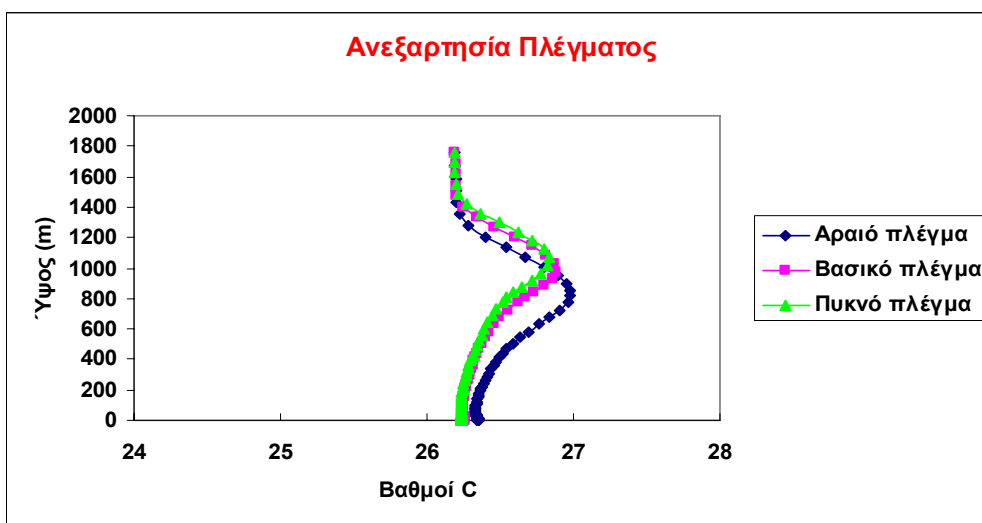
βασικό πλέγμα (38×86×118). Τέλος εξετάστηκε και ένα πλέγμα ακόμα πιο **πυκνό (43×98×128)** προκειμένου να συγκριθούν τα αποτελέσματα.

Για την σύγκριση των αποτελεσμάτων κατασκευάστηκαν διαγράμματα θερμοκρασίας που ελήφθησαν από διαφορετικά σημεία απόστασης από την πηγή (**Διαγράμματα 8-2; 8-3; 8-4; 8-5**).

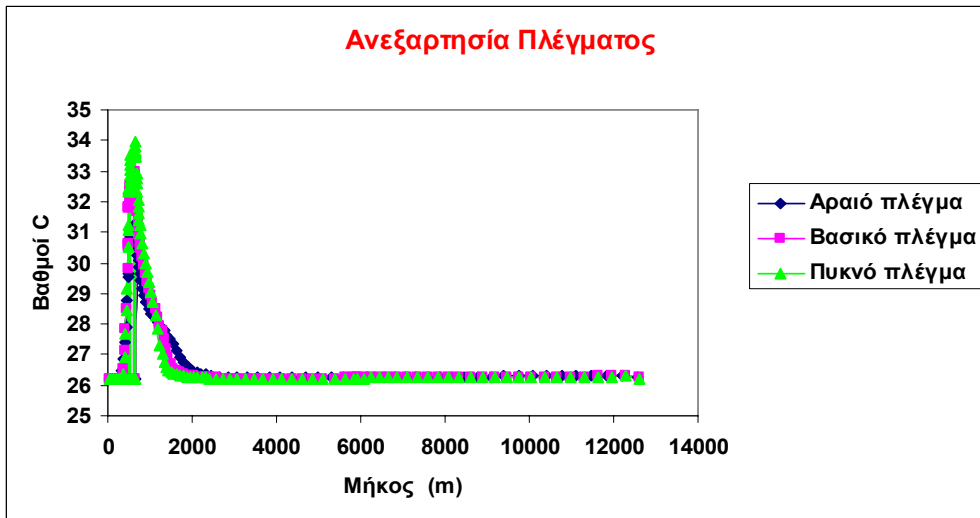
Ως εκ τούτου, από τη μελέτη των παρακάτω διαγραμμάτων θερμοκρασίας όπως προκύπτει παρατηρείται ότι η γραφική παράσταση του βασικού πλέγματος και του πυκνού σχεδόν ταυτίζονται και στις τέσσερις περιπτώσεις σύγκρισης.



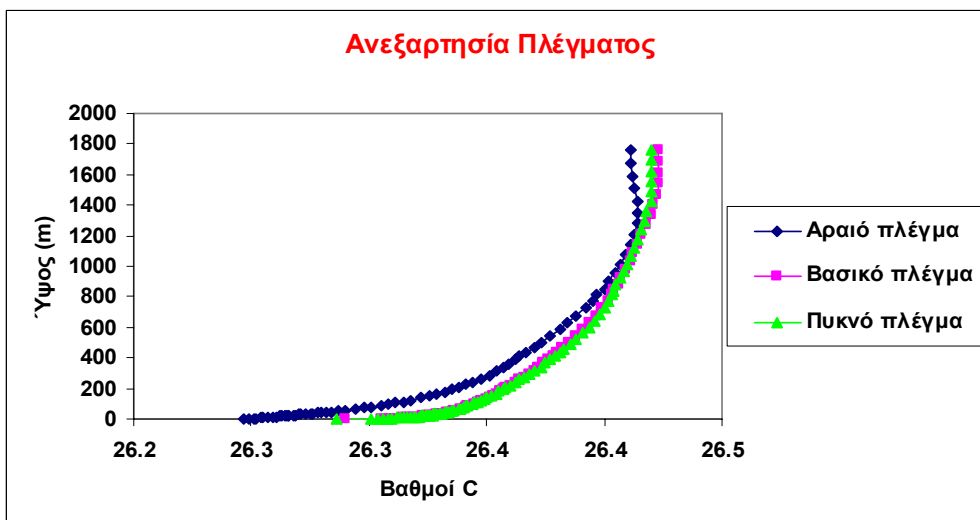
Διάγραμμα 8-2: Κατανομή θερμοκρασίας με το ύψος σε απόσταση 892.5 m από το κέντρο της πηγής.



Διάγραμμα 8-3: Κατανομή θερμοκρασίας με το ύψος σε απόσταση 1742.5 m από το κέντρο της πηγής.



Διάγραμμα 8-4: Κατανομή θερμοκρασίας με την οριζόντια απόσταση από την αρχή του πεδίου σε ύψος 1 m από το έδαφος.



Διάγραμμα 8-5: Κατανομή θερμοκρασίας με το ύψος σε απόσταση (1742.5) από το κέντρο της πηγής.

Το βασικό πλέγμα που επιλέχθηκε μετά την ανεξαρτησία πλέγματος, για την προσομοίωση του υπολογιστικού πεδίου είναι ανομοιόμορφο καρτεσιανό πλέγμα όπου ανάλογα με την περιοχή είχε και διαφορετική πυκνωση. Η μεταβολή της πυκνότητας του πλέγματος σε κάθε υποπεριοχή (region) στο **PHOENICS** γίνεται με τη μεταβολή ενός εκθέτη.

Στους παρακάτω Πίνακες (*Πίνακας 8-3; 8-4; 8-5*) αναφέρονται για κάθε περιοχή σε κάθε διεύθυνση του υπολογιστικού πεδίου, το μήκος περιοχής, ο αριθμός κελιών και η τιμή του εκθέτη.

Πίνακας 8-3: Χαρακτηριστικά υπολογιστικού πεδίου στον άξονα Z.

Υπολογιστικό πεδίο στον άξονα Z											
Περιοχές (Regions)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Μήκος περιοχής (m)	500	0.5	25	85	25	0.5	100	500	1000	3500	7000
Αριθμός κελιών	15	1	7	10	7	1	8	11	14	17	27
Εκθέτης	- 1.6	1.0	1.4	1.0	- 1.4	1.0	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3

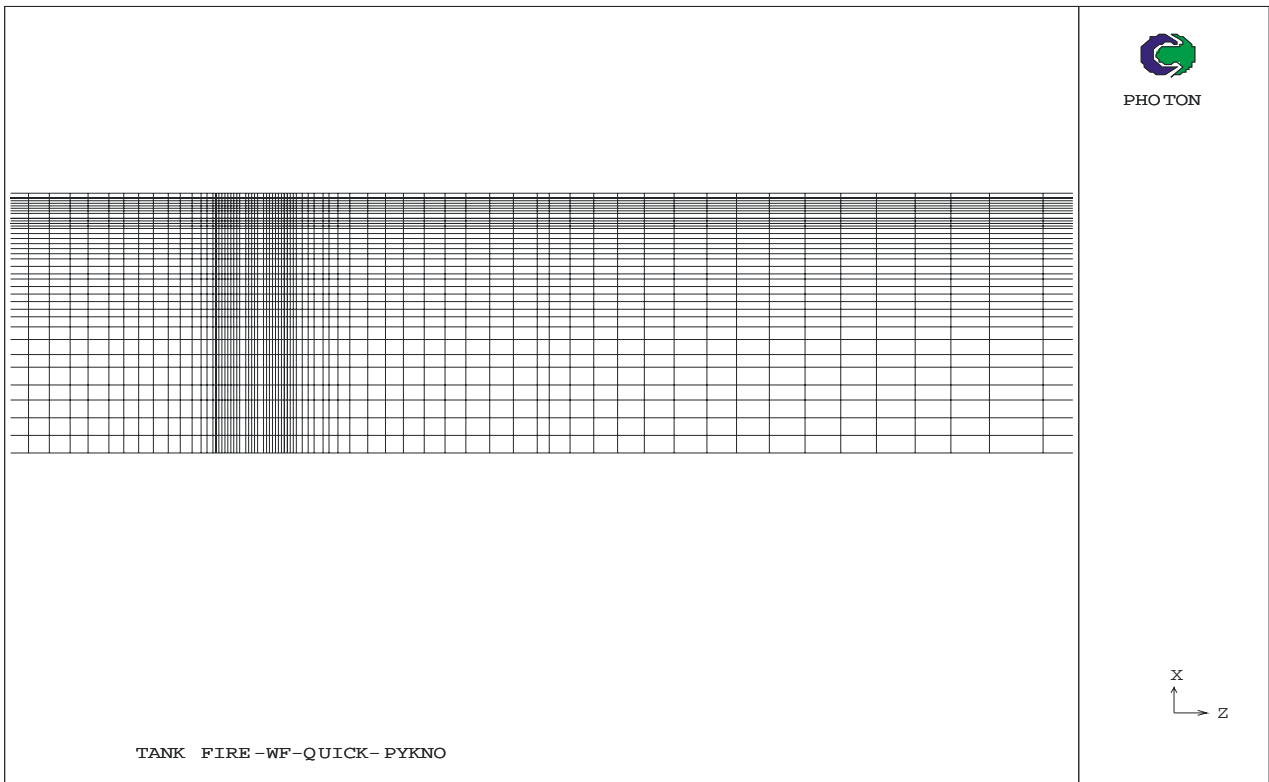
Πίνακας 8-4: Χαρακτηριστικά υπολογιστικού πεδίου στον άξονα X.

Υπολογιστικό πεδίο στον άξονα X										
Περιοχές (Regions)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Μήκος περιοχής (m)	457	250	0.5	25	85	25	0.5	250	457	
Αριθμός κελιών	10	15	1	7	10	7	1	15	10	
Εκθέτης	- 1.3	- 1.4	1.0	1.4	1.0	1.4	1.0	- 1.4	- 1.3	

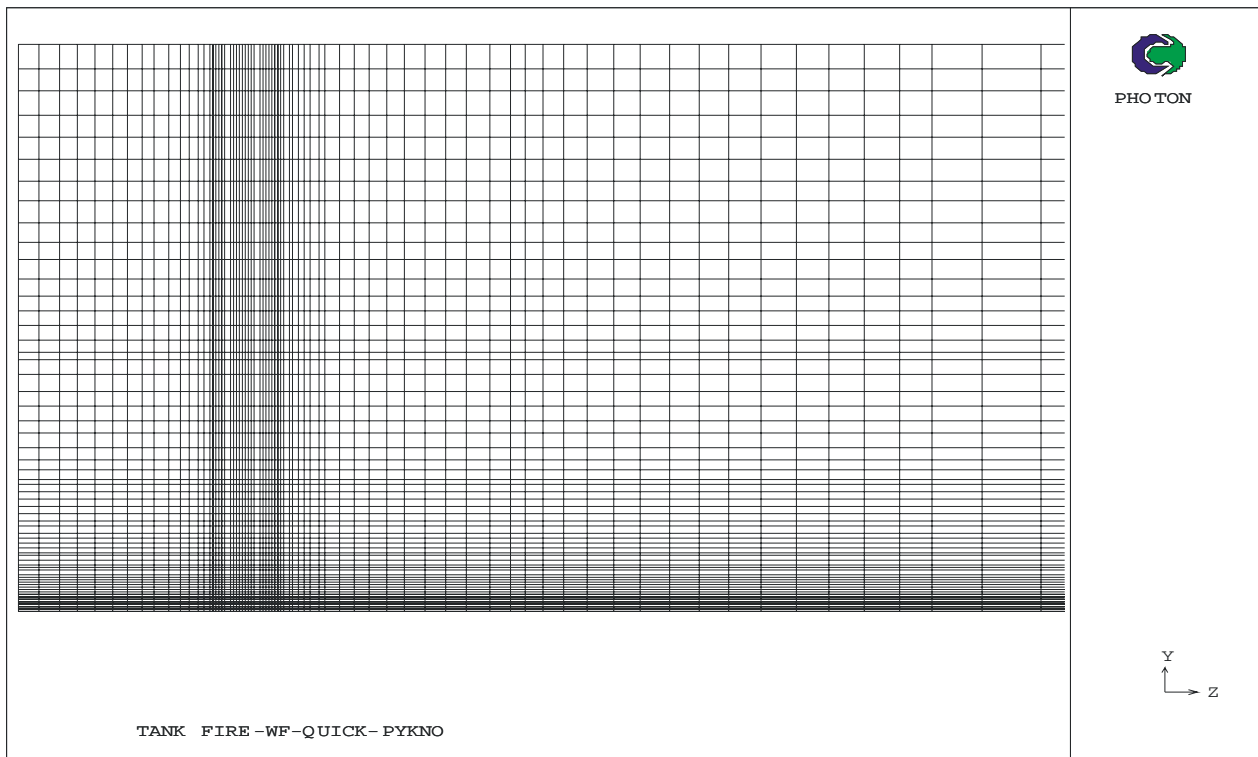
Πίνακας 8-5: Χαρακτηριστικά υπολογιστικού πεδίου στον άξονα Y.

Υπολογιστικό πεδίο στον άξονα Y										
Περιοχές (Regions)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Μήκος περιοχής (m)	4	7	4	10	25	50	100	200	400	800
Αριθμός κελιών	6	6	6	7	7	8	10	12	12	12
Εκθέτης	1.3	1.2	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3

Στις παρακάτω εικόνες απεικονίζεται το βασικό υπολογιστικό πλέγμα που επιλέχτηκε για την αριθμητική προσομοίωση του φυσικού προβλήματος (*Εικόνες 8-2; 8-3*)



Εικόνα 8-2: Απεικόνιση μιας περιοχής του βασικού πλέγματος κατά τη διεύθυνση X-Z του πεδίου ροής.

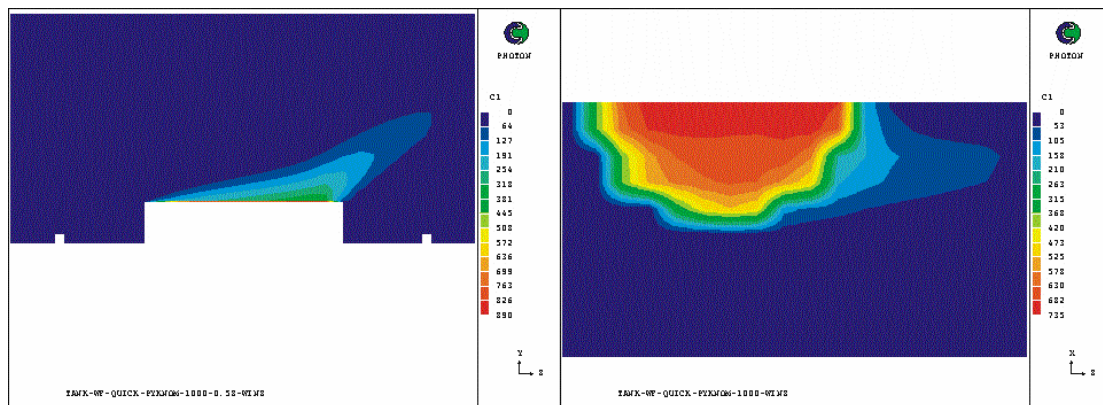


Εικόνα 8-3: Απεικόνιση μιας περιοχής του βασικού πλέγματος κατά τη διεύθυνση Y-Z του πεδίου ροής.



ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο **Κεφάλαιο 9** γίνεται η παραμετρική ανάλυση του φαινομένου. Αρχικά επιλέγονται οι περιπτώσεις που θα μελετηθούν προκειμένου να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για την εξιχνίαση του φαινομένου. Ύστερα παρουσιάζονται οι επιπτώσεις από τον καπνό και το SO_2 σύμφωνα με τα γενικευμένα διαγράμματα συγκεντρώσεων που έχουν εξαχθεί από τη παραμετρική ανάλυση. Τέλος γίνεται προσπάθεια αξιολόγησης του μοντέλου της αριθμητικής προσομοίωσης διότι δεν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα.



Εικόνες 9-1, 9-2: Αριστερά απεικονίζονται οι ισοψείς καμπύλες και δεξιά του όρου πηγής (μισός εξαιτίας συμμετρίας).

9. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

9.1 Εισαγωγή

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας εκτός από την αριθμητική προσομοίωση του πλουμίου που παράγεται από τη φωτιά στη δεξαμενή, εστιάζεται και στην εκτίμηση των επιπτώσεων που προέρχονται από τη διασπορά του παραγόμενου καπνού και εν συνεχεία της συμπαρασυρόμενης ποσότητας SO₂ που προέρχονται από την καύση.

Η εκτίμηση θα πραγματοποιηθεί σύμφωνα με τα γενικευμένα διαγράμματα της συγκέντρωσης στο επίπεδο του εδάφους που ελήφθησαν από την αριθμητική προσομοίωση του πεδίου ροής, έτσι προσδιορίζεται η συγκέντρωση των ρύπων για κάθε σενάριο ατυχήματος σε σχέση με την απόσταση από το σημείο του ατυχήματος.

Επίσης δίνεται μεγάλη σημασία στην πρόβλεψη του ύψους του πλουμίου καθώς και στις επιδράσεις που έχει η αλλαγή της ταχύτητας στην συγκέντρωση των ρύπων. Ενώ εξίσου σημαντικής σημασίας αποτελεί και η επίδραση του ρυθμού έκλυσης ισχύος από την πηγή.

9.2 Παραμετρικές εφαρμογές

Η επιλογή των παραμετρικών εφαρμογών γίνεται με γνώμονα την καλύτερη μελέτη του φαινομένου. Ως εκ τούτου επιλέγεται η μελέτη έξι παραμετρικών εφαρμογών. Αυτές περιγράφονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 9-1: Παραμετρικές εφαρμογές.

Ρυθμός έκλυσης ισχύος από την πηγή (MW/m ²)	Ταχύτητα (m/s)	
0.20	5	8
0.50	5	8
0.70	5	8

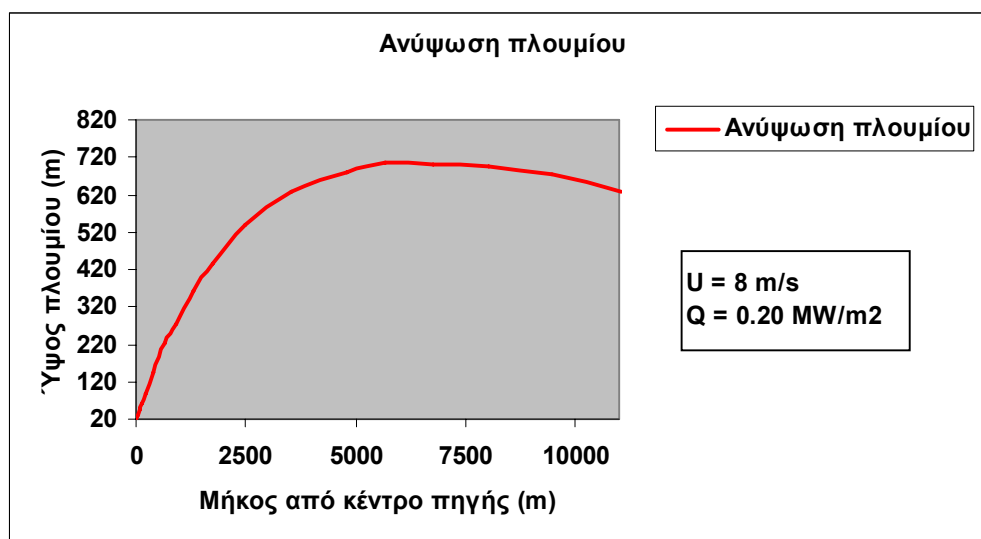
Επίσης είναι σημαντικό να τονιστεί ότι για τις περιπτώσεις όπου η ταχύτητα λαμβάνει την τιμή 5 m/s το οριακό στρώμα (BL) παίρνει την τιμή 800 m ενώ όταν η ταχύτητα γίνεται 8 m/s τότε το οριακό στρώμα (BL) λαμβάνει την τιμή 1000 m.

Όπως συνάγεται από τον παραπάνω **Πίνακα 9-1** για κάθε περίπτωση θα γίνει μελέτη για την ανύψωση του πλουμίου, το προφίλ των ταχυτήτων για διαφορετικές αποστάσεις από την πηγή καθώς και για τις συγκεντρώσεις των ρύπων (καπνός, SO₂).

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα για κάθε μία περίπτωση εκτός από τις συγκεντρώσεις των ρύπων που θα αναλυθούν σε επόμενες ενότητες.

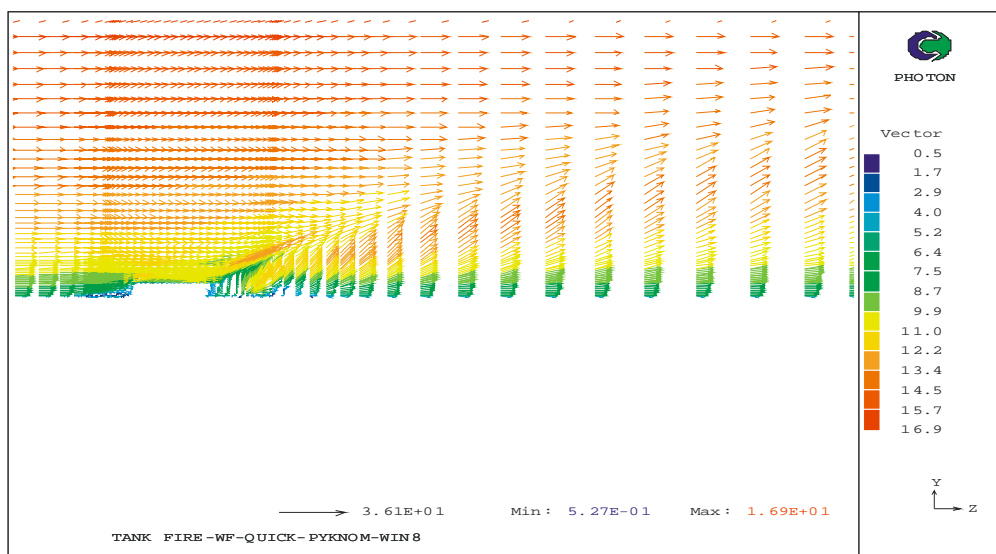
9.2.1 Περίπτωση (1) – $Q=0.20 \text{ MW/m}^2$ και $U= 8 \text{ m/s}$

Η ανύψωση του πλουμίου για διάφορες αποστάσεις από το κέντρο της πηγής δίνεται στο **Διάγραμμα 9-1**. Όπου καλύπτει απόσταση 4,2 m από την πηγή μέχρι τα 11034,5 m και το μέγιστο ύψος του πλουμίου προσεγγίζεται στα **706 m**.



Διάγραμμα 9-1: Ύψος πλουμίου σε συνάρτηση με το μήκος από το κέντρο της πηγής.

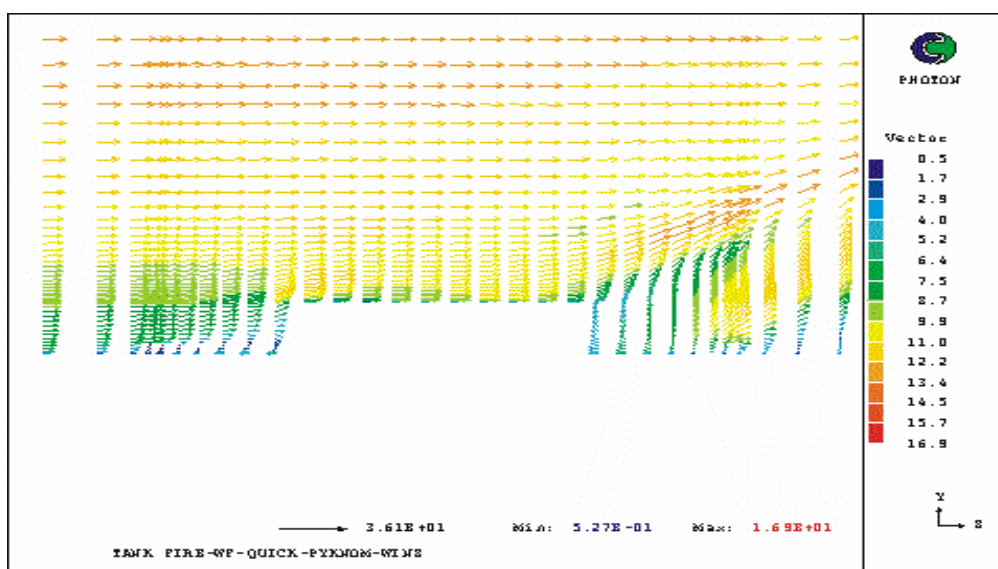
Επειδή οι αδρανειακές δυνάμεις του ανέμου είναι μικρότερες σε σχέση με τις ανωστικές που προκαλούνται από τη θερμότητα των καυσαερίων, έτσι το πλούμιο ανεβαίνει κατακόρυφα, ενώ μετά από κάποιο ύψος οι αδρανειακές δυνάμεις υπερτερούν των ανωστικών και το πλούμιο ακολουθεί την κατεύθυνση του ανέμου **Εικόνες 9-3; 9-4**.



Εικόνα 9-3: Ανύσματα της ταχύτητας κατά μήκος της πηγής.

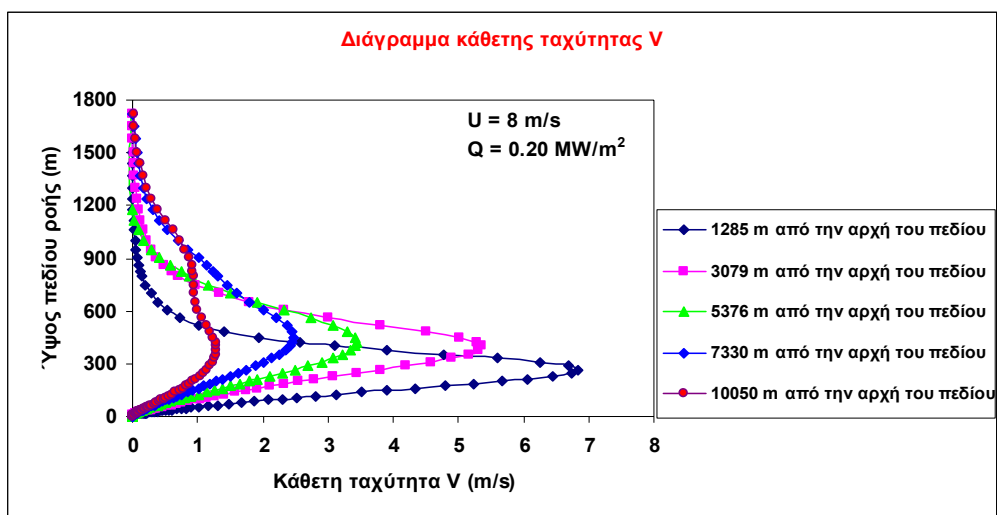
Από την παραπάνω **Εικόνα 9-3** συνάγεται ότι υπάρχει σχηματισμός ανακυκλοφορίας τόσο αριστερά όσο και δεξιά από τη δεξαμενή, η διαφορά όμως εδώ έγκειται στο ότι η δεξιά ανακυκλοφορία είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με την αριστερή. Σε αυτό συμβάλει και το φράγμα της δεξαμενής (bund) όπου μπλοκάρει κάποιο τμήμα του πλουμίου εξαιτίας της μεγάλης ταχύτητας του ανέμου.

Αυτό φαίνεται καλύτερα στην παρακάτω **Εικόνα 9-4** όπου απεικονίζονται τα ανύσματα της ταχύτητας στη δεξαμενή και φαίνονται καλύτερα οι ανακυκλοφορίες.

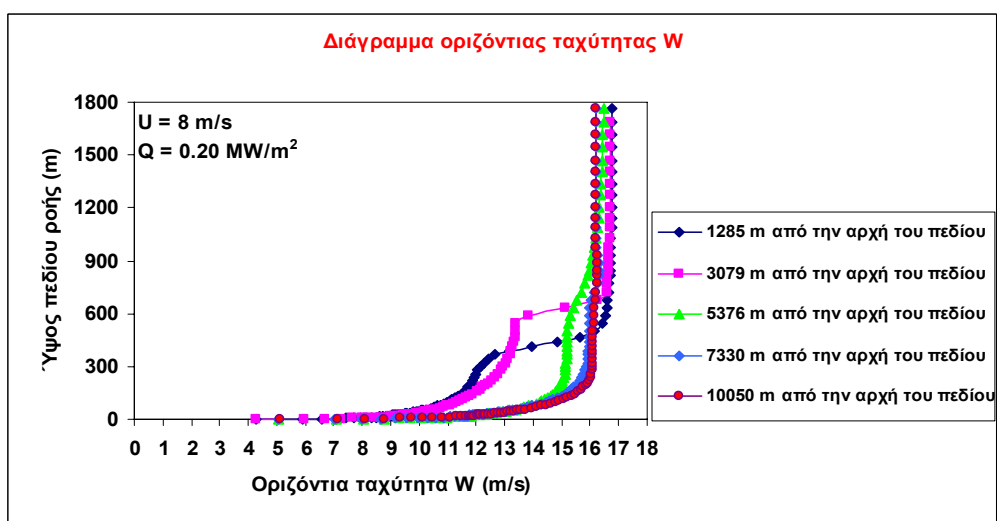


Εικόνα 9-4: Η κατανομή των διανυσμάτων της ταχύτητας στη δεξαμενή.

Εν συνεχεία στα παρακάτω **Διαγράμματα 9-2; 9-3** παρουσιάζονται οι ταχύτητες V και W σε συνάρτηση με το ύψος του πεδίου ροής.



Διάγραμμα 9-2: Κάθετη ταχύτητα V σε συνάρτηση με το ύψος του πεδίου ροής σε διάφορες αποστάσεις από την αρχή του πεδίου.

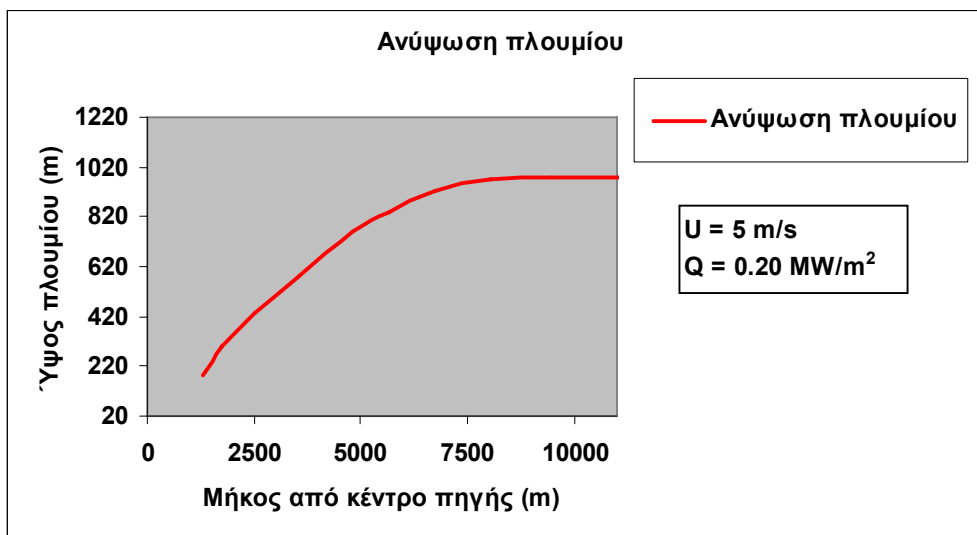


Διάγραμμα 9-3: Οριζόντια ταχύτητα W σε συνάρτηση με το ύψος του πεδίου ροής σε διάφορες αποστάσεις από την αρχή του πεδίου.

9.2.2 Περίπτωση (2) – $Q=0.20 \text{ MW/m}^2$ και $U= 5 \text{ m/s}$

Διατηρώντας τις βασικές παραμέτρους του προβλήματος σταθερές και εισάγοντας για τον ρυθμό έκλυσης της ισχύος της πηγής $Q = 0.20 \text{ MW/m}^2$ και ταχύτητα $U= 5 \text{ m/s}$ θα έχουμε τα εξής.

Η ανύψωση του πλουμίου για διαφορετικές αποστάσεις από το κέντρο της πηγής περιγράφεται στο παρακάτω *Διάγραμμα 9-4*. Πιο συγκεκριμένα οι αποστάσεις που καλύπτονται στο *Διάγραμμα 9-4* ξεκινούν από τα 1289,5 m από την πηγή μέχρι τα 11034,5 m και το μέγιστο ύψος του πλουμίου προσεγγίζει τα **978,016 m**.

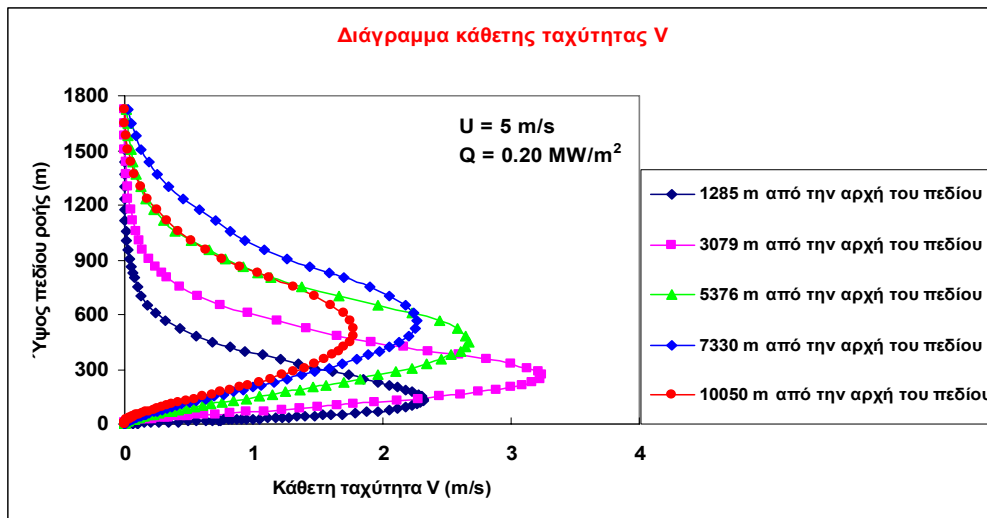


Διάγραμμα 9-4: Ύψος πλουμίου σε συνάρτηση με το μήκος του πεδίου ροής.

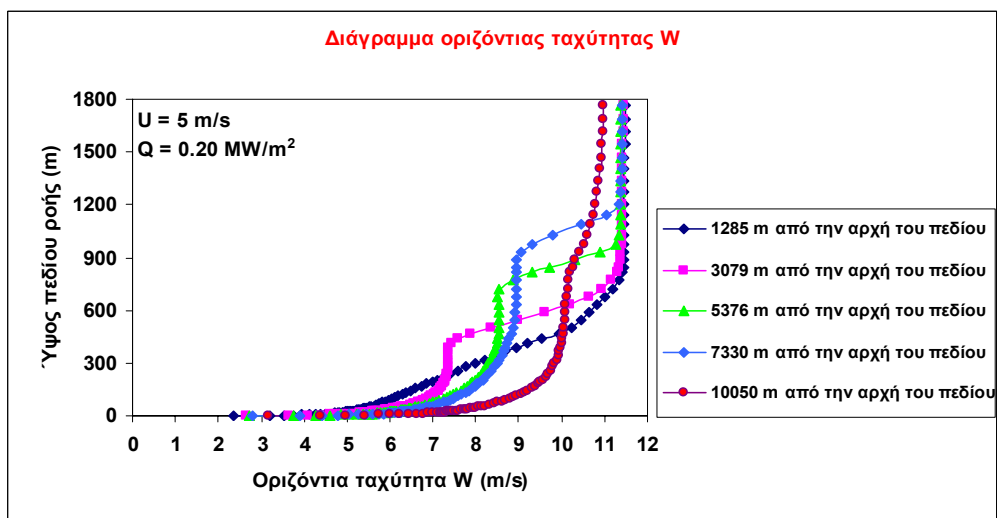
Συγκρίνοντας το ύψος του πλουμίου από τα *Διαγράμματα 9-1; 9-4*, συνάγεται ότι το ύψος του πλουμίου στη περίπτωση με ταχύτητα ανέμου 5 m/s είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τη περίπτωση όπου η ταχύτητα είναι 8 m/s. Η διαφορά μεταξύ των δύο περιπτώσεων έγκειται στις διαφορές που σχηματίζονται μεταξύ των αδρανειακών και των ανωστικών δυνάμεων που αναπτύσσονται

Επίσης η ανάπτυξη ανακυκλοφοριών δεξιά και αριστερά της δεξαμενής είναι μικρότερες σε σχέση με την περίπτωση όπου η ταχύτητα είναι 8 m/s. Η ανακυκλοφορία παίζει τον ρόλο του ανατροφοδότη με τον απαραίτητο αέρα για την τέλεση της καύσης

Στα παρακάτω *Διαγράμματα 9-5, 9-6* παρουσιάζεται η κατανομή της κάθετης V και της οριζόντιας ταχύτητας W αντίστοιχα σε συνάρτηση με το ύψος του πεδίου ροής. Όπου σε σύγκριση πάλι μεταξύ των περιπτώσεων (1) και (2) η κάθετη ταχύτητα στην περίπτωση (1) είναι μικρότερη σε σχέση με τη (2) ενώ αντίθετα η οριζόντια ταχύτητα είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση (1) ενώ στην (2) είναι μικρότερη.



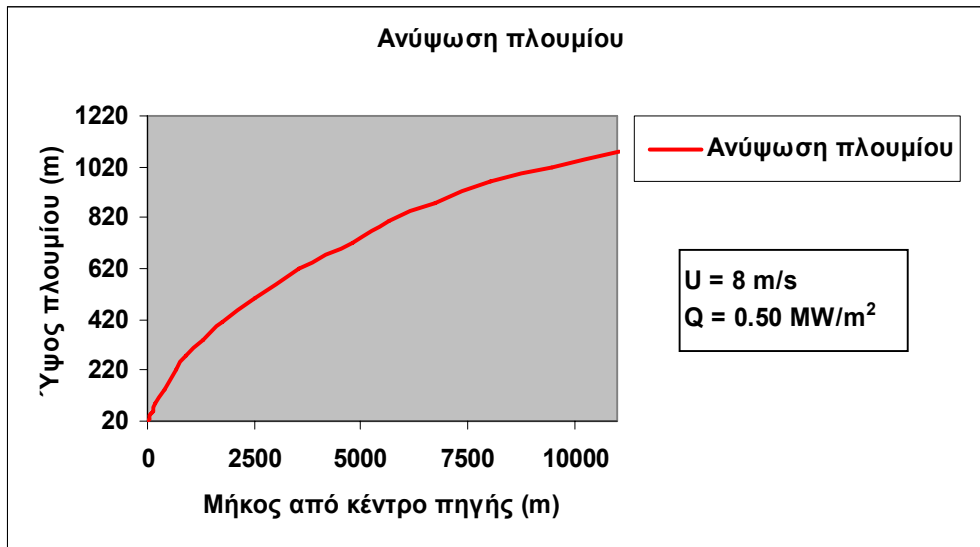
Διάγραμμα 9-5: Κάθετη ταχύτητα V σε συνάρτηση με το ύψος του πεδίου ροής σε διάφορες αποστάσεις από την αρχή του πεδίου.



Διάγραμμα 9-6: Οριζόντια ταχύτητα W σε συνάρτηση με το ύψος του πεδίου ροής σε διάφορες αποστάσεις από την αρχή του πεδίου.

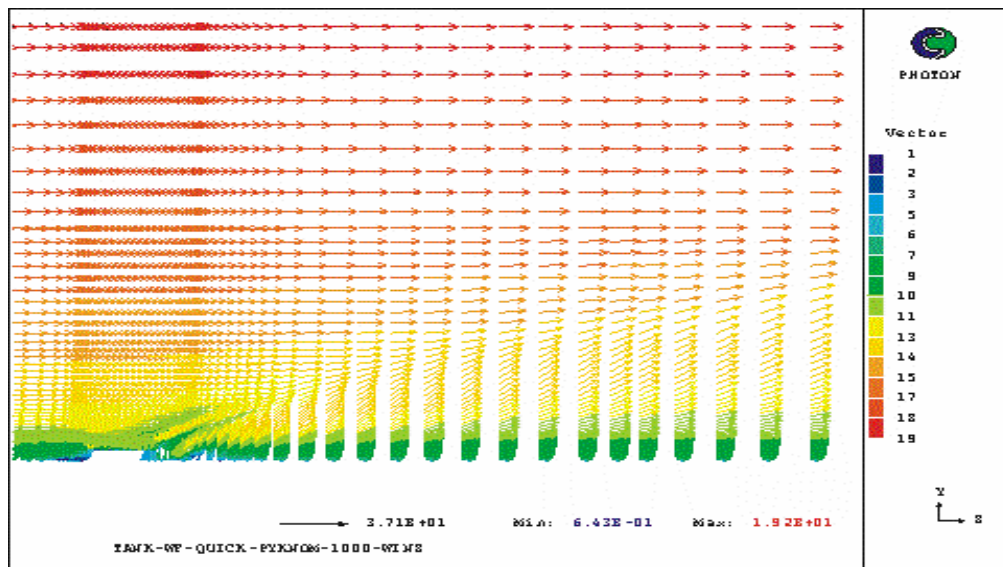
9.2.3 Περίπτωση (3) – $Q=0.50 \text{ MW/m}^2$ και $U=8 \text{ m/s}$

Ομοίως το *Διάγραμμα 9-7* απεικονίζει την ανύψωση του πλουμίου παρουσιάζοντας μέγιστη τιμή για το πλούμιο στα **1050 m** από το κέντρο της πηγής μέχρι τα 11034,5 m του πεδίου ροής. Το ύψος του πλουμίου είναι μεγαλύτερο σε σύγκριση με την περίπτωση (1) και οφείλεται στην αύξηση της ισχύς της πηγής.

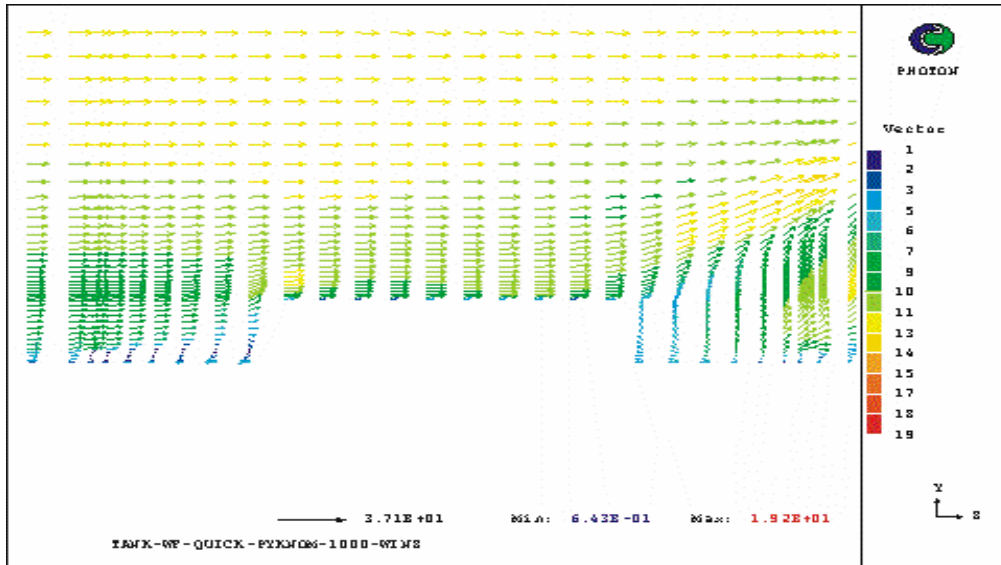


Διάγραμμα 9-7: Ύψος πλουμίου σε συνάρτηση με το μήκος από το κέντρο της πηγής.

Από την κατανομή των διανυσμάτων της ταχύτητας στην παρακάτω **Εικόνα 9-5** έχουμε:

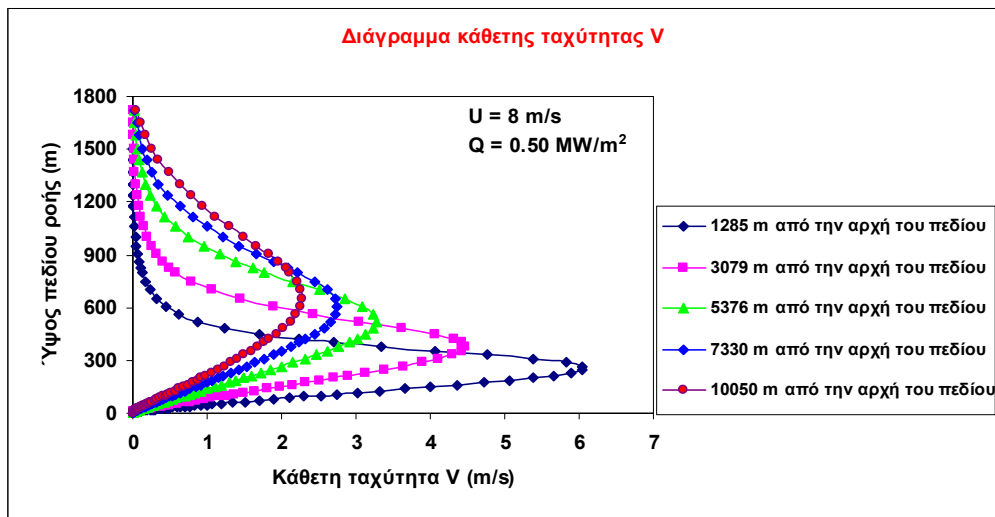


Παρατηρείται ότι δημιουργούνται έντονες ανακυκλοφορίες και ειδικότερα στη δεξιά πλευρά της δεξαμενής όπου ταυτίζεται και η κατεύθυνση του ανέμου. Το ίδιο ισχύει και για τις πλευρές των φραγμάτων της δεξαμενής (bunds) **Εικόνα 9-6**.

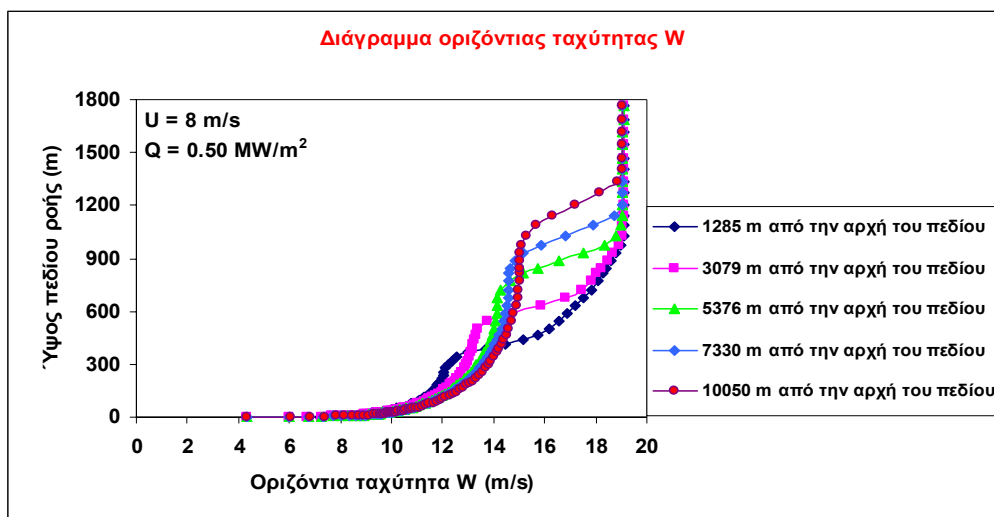


Εικόνα 9-6: Η κατανομή των διανυσμάτων της ταχύτητας στη δεξαμενή.

Οι απεικονίσεις των ταχυτήτων V , W περιγράφονται στα παρακάτω *Διαγράμματα 9-8, 9-9*. Όπου υπάρχουν διαφορές στις τιμές σε σχέση με την αντίστοιχη περίπτωση (1). Πιο συγκεκριμένα η κάθετη ταχύτητα V στην (1) είναι μεγαλύτερη και αυτό οφείλεται διότι η έκλυση της ισχύς από την πηγή στην περίπτωση (1) είναι μικρότερη σε σχέση με την περίπτωση (3). Ενώ η οριζόντια ταχύτητα W στην (1) είναι μικρότερη σε σχέση με την περίπτωση (3) για τον ίδιο λόγο.



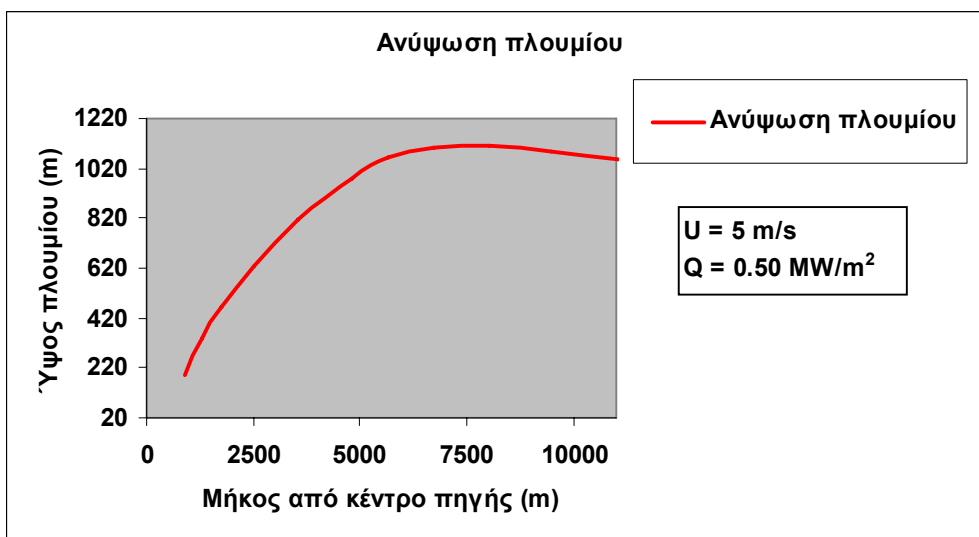
Διάγραμμα 9-8: Κάθετη ταχύτητα V σε συνάρτηση με το ύψος του πεδίου ροής σε διάφορες αποστάσεις από την αρχή του πεδίου.



Διάγραμμα 9-9: Οριζόντια ταχύτητα W σε συνάρτηση με το ύψος του πεδίου ροής σε διάφορες αποστάσεις από την αρχή του πεδίου.

9.2.4 Περίπτωση (4) – $Q=0.50 \text{ MW/m}^2$ και $U=5 \text{ m/s}$

Ομοίως με τα παραπάνω η γραφική παράσταση που περιγράφει την ανύψωση του πλουμίου δίνει μέγιστο ύψος **1110 m** για εύρος απόστασης από το κέντρο της πηγής ίσο με 914 m έως 11034,5 m (Διάγραμμα 9-10).

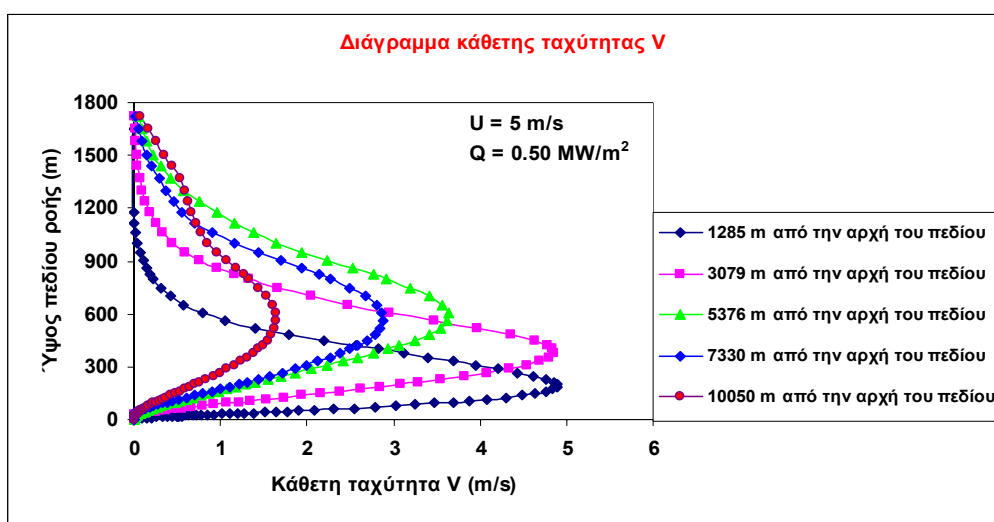


Διάγραμμα 9-10: Ύψος πλουμίου σε συνάρτηση με το μήκος του πεδίου ροής.

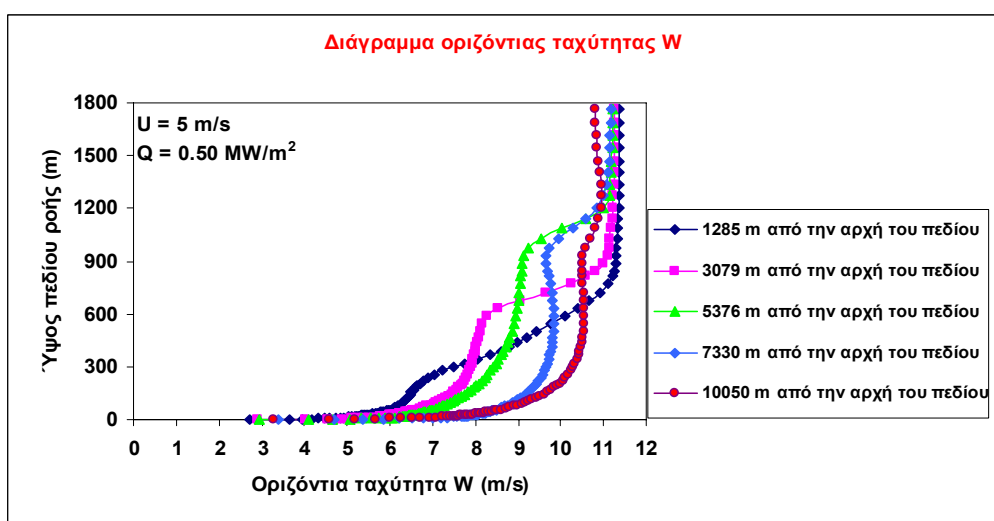
Στη προκειμένη περίπτωση (4) έχουμε αύξηση του ρυθμού έκλυσης ισχύος της δεξαμενής σε σχέση με τις προηγούμενες με αποτέλεσμα οι ανωστικές δυνάμεις να είναι μεγαλύτερες και το πλούμιο να ανεβαίνει σε μεγαλύτερο ύψος σε σχέση με τις

παραπάνω περιπτώσεις (1, 2, 3, 4) της ίδιας ταχύτητας. Επίσης οι ανακυκλοφορίες είναι μεγαλύτερες σε σχέση με την αντίστοιχη περίπτωση (2) όπου οφείλονται στην διαφορά θερμοκρασίας και στις ανωστικές δυνάμεις που ασκούν πιέσεις στις περιοχές αριστερά και δεξιά από τη δεξαμενή.

Και αντίστοιχα τα *Διαγράμματα 9-11; 9-12* των ταχυτήτων V , W παρουσιάζονται παρακάτω.



Διάγραμμα 9-11: Κάθετη ταχύτητα V σε συνάρτηση με το ύψος του πεδίου ροής σε διάφορες αποστάσεις από την αρχή του πεδίου.

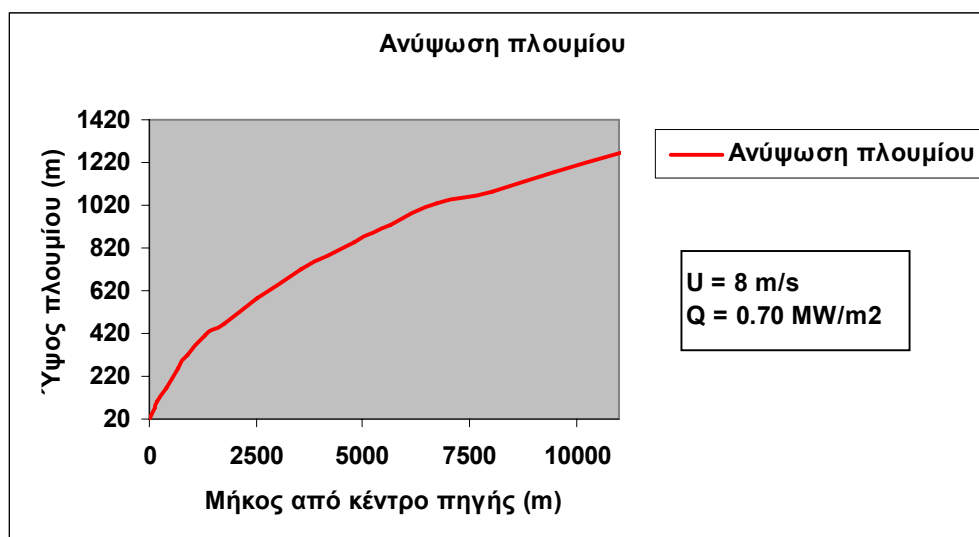


Διάγραμμα 9-12: Οριζόντια ταχύτητα W σε συνάρτηση με το ύψος του πεδίου ροής σε διάφορες αποστάσεις από την αρχή του πεδίου.

Από τα διαγράμματα ταχυτήτων παρατηρείται σε σχέση με την περίπτωση (2) ότι η κάθετη ταχύτητα V είναι μεγαλύτερη. Η διαφορά οφείλεται στη μεγαλύτερη ισχύ της πηγής. Ενώ η οριζόντια ταχύτητα W παραμένει περίπου στα ίδια επίπεδα

9.2.5 Περίπτωση (5) – $Q=0.70 \text{ MW/m}^2$ και $U=8 \text{ m/s}$

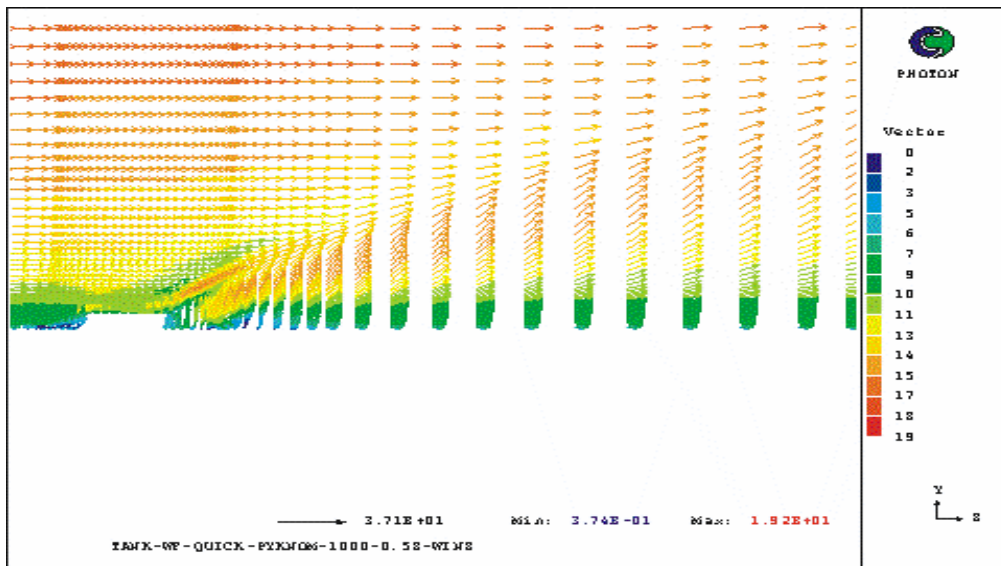
Εν συνεχεία για αύξηση της ισχύος της πηγής για $Q = 0.70 \text{ MW/m}^2$ και $U = 8 \text{ m/s}$ το ύψος του πλουμίου φτάνει στα **1267 m** από το κέντρο της πηγής μέχρι τα 11034,5 m του πεδίου ροής (*Διάγραμμα 9-13*). Η ανύψωση του πλουμίου σε σχέση με τις περιπτώσεις (1, 3) είναι μεγαλύτερη και οφείλεται στο ότι η ισχύς της πηγής στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι μεγαλύτερη.



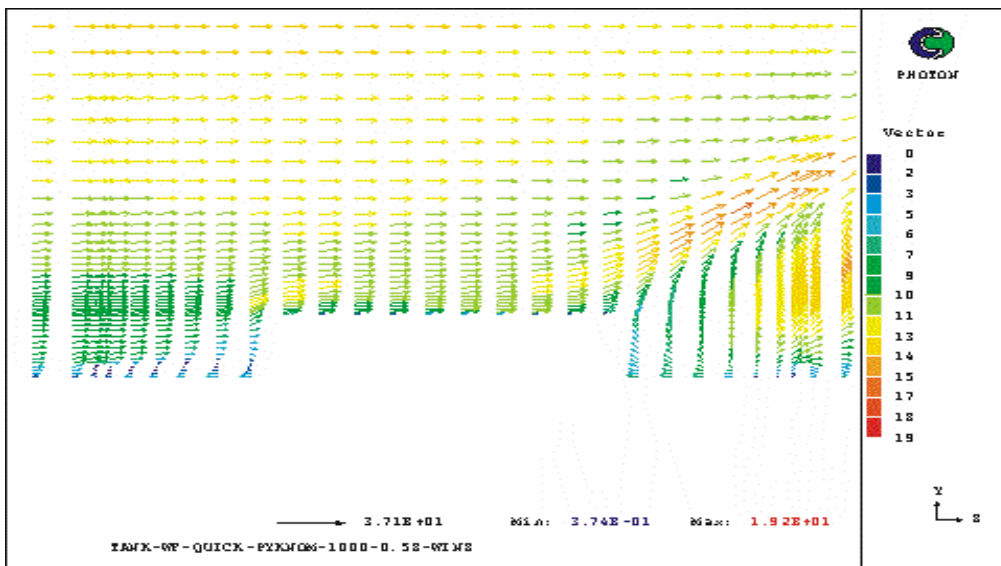
Διάγραμμα 9-13: Ύψος πλουμίου σε συνάρτηση με το μήκος του πεδίου από το κέντρο της πηγής.

Επιπλέον από την κατανομή των διανυσμάτων της ταχύτητας κατά μήκος του πεδίου ροής (*Εικόνα 9-7*) έχουμε τα εξής. Η γωνία του πλουμίου σε σχέση με τις περιπτώσεις (1, 3) είναι μεγαλύτερη εξαιτίας της μεγαλύτερης έκλυσης ισχύος της πηγής. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνεται με σύγκριση των *Εικόνων 9-3; 9-4; 9-5*.

Επιπρόσθετα οι ανακυκλοφορίες που δημιουργούνται και ειδικότερα στην δεξιά πλευρά της δεξαμενής αλλά και στο δεξιό φράγμα (bund) της είναι πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με τις περιπτώσεις (1,3).

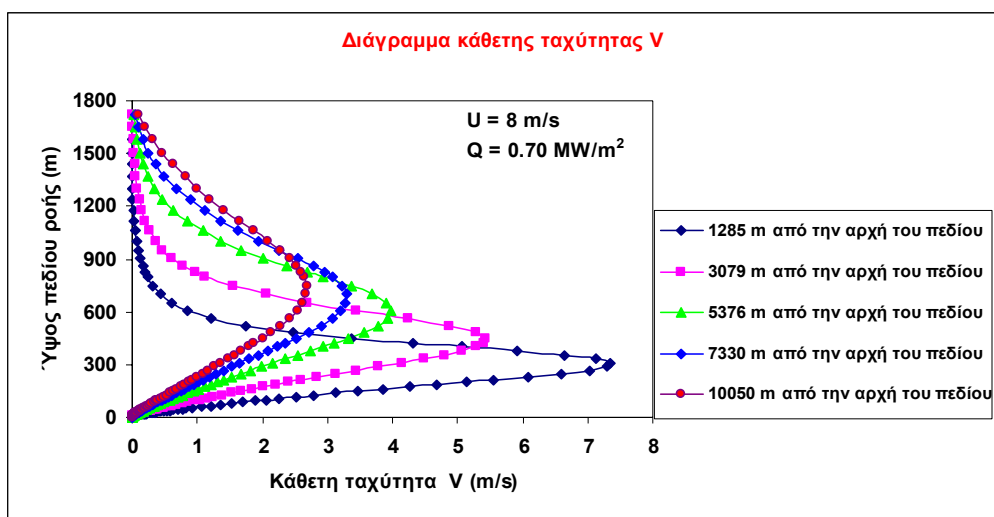


Εικόνα 9-7 Ανύσματα της ταχύτητας κατά μήκος της πηγής.

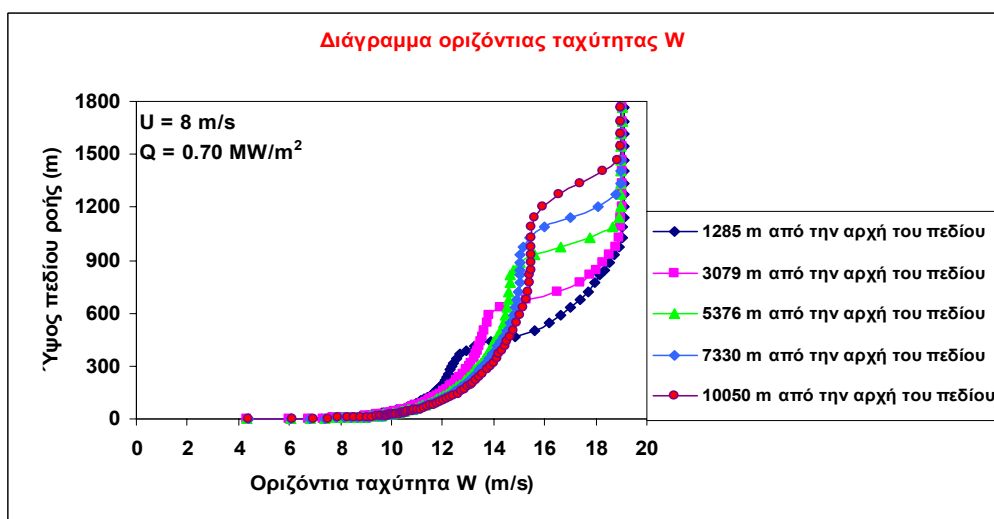


Εικόνα 9-8: Η κατανομή των διανυσμάτων της ταχύτητας στη δεξαμενή.

Εν συνεχεία οι γραφικές απεικονίσεις της κάθετης και οριζόντιας ταχύτητας παρουσιάζονται παρακάτω (Διαγράμματα 9-14; 9-15). Από τα διαγράμματα προκύπτει ότι η κάθετη ταχύτητα V είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τις περιπτώσεις (1, 3) εξαιτίας του μεγέθους της ισχύς της δεξαμενής. Ομοίως και για την οριζόντια ταχύτητα W .



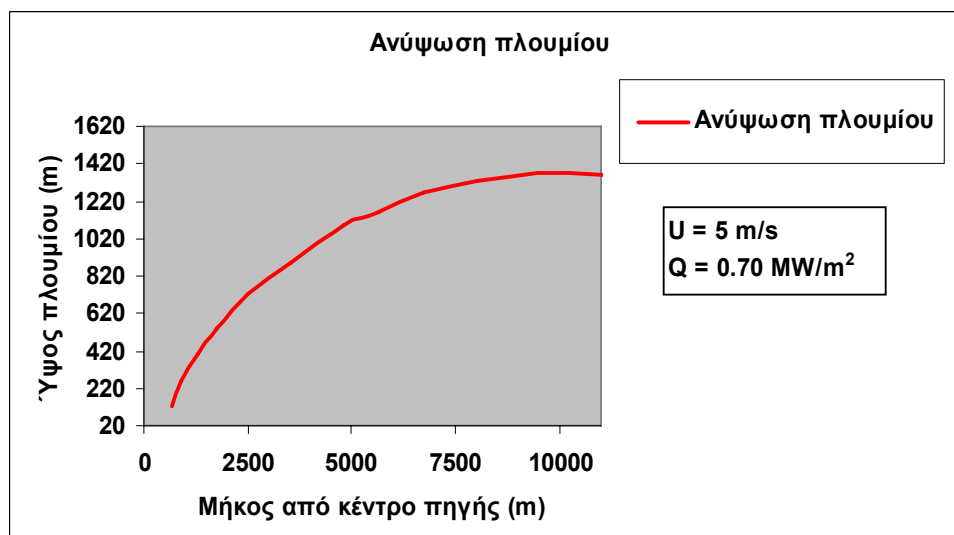
Διάγραμμα 9-14: Κάθετη ταχύτητα V σε συνάρτηση με το ύψος του πεδίου ροής σε διάφορες αποστάσεις από την αρχή του πεδίου.



Διάγραμμα 9-15: Οριζόντια ταχύτητα W σε συνάρτηση με το ύψος του πεδίου ροής σε διάφορες αποστάσεις από την αρχή του πεδίου.

9.2.6 Περίπτωση (6) – $Q=0.70 \text{ MW/m}^2$ και $U=5 \text{ m/s}$

Ομοίως με τα προηγούμενα η γραφική απεικόνιση της ανύψωσης του πλούμιου στο *Διάγραμμα 9-16* υποδεικνύει μέγιστο ύψος για το πλούμιο στα **1360 m** για την απόσταση 656,5 έως 11034,5 m του πεδίου ροής. Το ύψος του πλούμιου στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι το μεγαλύτερο γιατί αναπτύσσονται οι μεγαλύτερες ανωστικές δυνάμεις σε σχέση με τις παραπάνω περιπτώσεις.

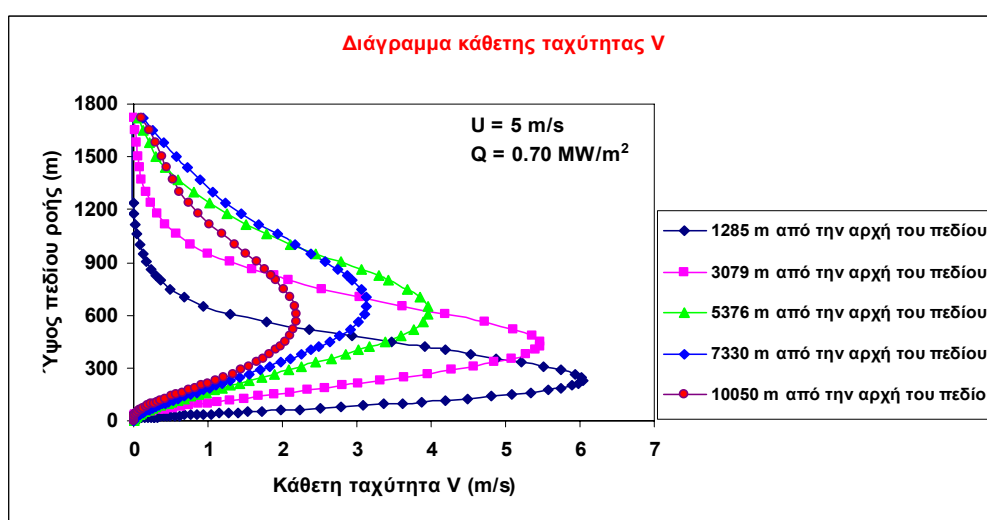


Διάγραμμα 9-16: Ύψος πλουμίου σε συνάρτηση με το μήκος του πεδίου ροής.

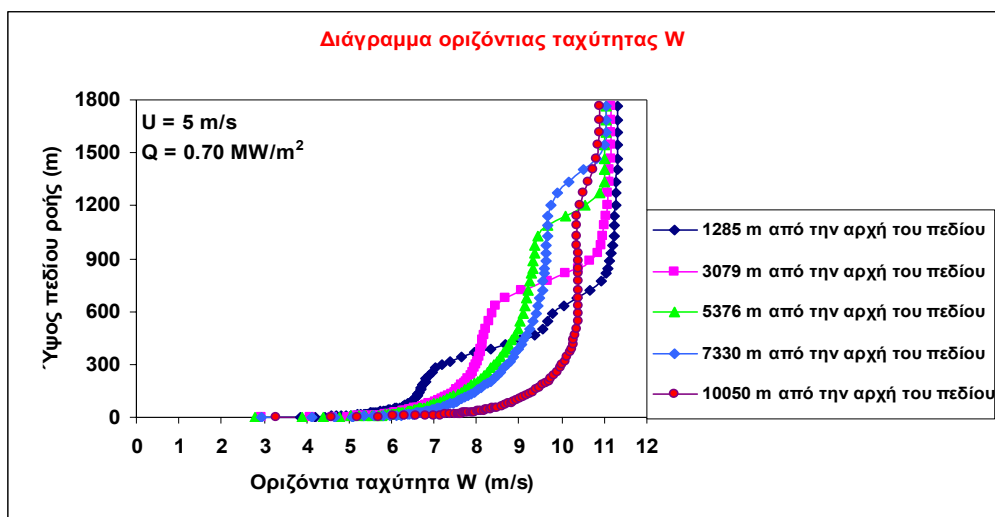
Επιπρόσθετα οι ανακυκλοφορίες που δημιουργούνται είναι μεγαλύτερες συγκριτικά με τις περιπτώσεις (2,4) και αυτό οφείλεται στην διαφορά θερμοκρασίας και στην πίεση που αναπτύσσεται από τις μέγιστες ανωστικές δυνάμεις που επικρατούν.

Έπειτα παρουσιάζονται η γραφική απεικόνιση των ταχυτήτων V , W (Διαγράμματα 9-17; 9-18). Από τα διαγράμματα προκύπτουν τα εξής.

Η κάθετη ταχύτητα V στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις διότι αναπτύσσονται οι μεγαλύτερες ανωστικές δυνάμεις.



Διάγραμμα 9-17: Κάθετη ταχύτητα V σε συνάρτηση με το ύψος του πεδίου ροής σε διάφορες αποστάσεις από την αρχή του πεδίου.



Διάγραμμα 9-18: Οριζόντια ταχύτητα W σε συνάρτηση με το ύψος του πεδίου ροής σε διάφορες αποστάσεις από την αρχή του πεδίου.

9.3 Επιπτώσεις από τον καπνό

9.3.1 Εισαγωγή

Ο καπνός αποτελεί τη φυσική ορατή συνέχεια της φωτιάς. Ο καπνός οφείλει την ύπαρξη του σε καύση (με φλόγα ή και χωρίς φλόγα). Δεδομένου ότι, από πρακτικής πλευράς, όλες σχεδόν οι μορφές των σωμάτων που προσφέρονται για καύση, περιέχουν άνθρακα και υδρογόνο και στις πυρκαγιές ένα μέρος του άνθρακα εμφανίζεται ως αιθάλη, μπορεί να λεχθεί ότι ο καπνός με μια απλή θεώρηση αποτελείται από αέρια, ατμούς και αιθάλη που οφείλονται σε διεργασία καύσης.

Μεταβλητές που επηρεάζουν τον καπνό, είναι η φύση των καιγόμενων υλικών, η ποσότητά τους που καίγεται, η επάρκεια ατμοσφαιρικού αέρα (συγκεκριμένα οξυγόνου), η μορφή και οι διαστάσεις του χώρου στον οποίο συντελείται η καύση, οι πιθανές ειδικές συνθήκες πίεσεως και πνοής ανέμου, η χρονική φάση της καύσης κ.α.

Ο καπνός που προκύπτει από μια φωτιά, παρουσιάζει σημαντικές διαφορές όχι μόνο από περίπτωση σε περίπτωση, αλλά και από χρονική στιγμή σε χρονική στιγμή. Το πλούσιο των καυσαερίων, που σχηματίζεται πάνω από μια εστία φωτιάς αποτελείται:

1. Από θερμά αέρια και ατμούς που προέρχονται από το καύσιμο
2. Άκαυστο υλικό που προέρχεται από πυρόλυση του καυσίμου

3. Ποσότητα ατμοσφαιρικού αέρα, που θερμάνθηκε από τη φωτιά και εισήλθε στην περιοχή του «πλουμίου».

Επειδή τα συστατικά αυτά του «πλουμίου» έχουν πυκνότητα μικρότερη από την αντίστοιχη του περιβάλλοντα ατμοσφαιρικού αέρα (λόγω υψηλότερης θερμοκρασίας), σχηματίζουν ένα ανοδικό ρεύμα και αν συναντήσουν οριζόντιο εμπόδιο (π.χ οροφή) συσσωρεύονται.

Το μεγαλύτερο ποσοστό όγκου σε μία ποσότητα καπνού, αποτελεί ο προσαγόμενος ατμοσφαιρικός αέρας.

Η ταχύτητα παραγωγής καπνού, είναι ανάλογη της προσαγωγής ατμοσφαιρικού αέρα και εξαρτάται ακόμη από την περίμετρο της φωτιάς, την ποσότητα της εκλύομενης θερμότητας και το ύψος της «καθαρής», από καπνό, περιοχής.

Η μορφή του καπνού μπορεί να θυμίζει «σωρό» (τοπική συγκέντρωση), «πυροτεχνήματα» (μεγάλη διασπορά), η εκπομπή «τσιγάρου» (κυματοειδής πορεία). Το χρώμα εξάλλου του καπνού μπορεί να κυμανθεί, από βαθύ «μέλαν νέφος» (πυρκαγιές σε αποθήκες πλαστικών), μέχρι και λευκό. Η διαφοροποίηση αυτή στο χρώμα οφείλεται κυρίως στο ποσοστό αιθάλης που περιέχει.

Ο καπνός, όμως συναρτάται και με ένα πλήθος άλλες μεταβλητές, που σχετίζονται με την πυρκαγιά, όπως ενοχλητικές οσμές, ερεθισμοί, αισθήματα πνιγηρότητας, αναπνευστική δηλητηρίαση κ.α.

Ειδικότερα:

- Οι οσμές οφείλονται στο υγρό περίβλημα των μικροσκοπικών σωματιδίων που συνιστούν τον καπνό, προϊόντα αλληλεπιδράσεων λόγω της υψηλής θερμοκρασίας στη καιγόμενη ύλη, που διαφοροποιούνται με τις αυξομειώσεις της ταχύτητας και των ειδικών συνθηκών καύσεως.
- Η ερεθιστική επίδραση του καπνού (στους οφθαλμούς, το δέρμα κ.λ.π.) σχετίζεται άμεσα με την αύξηση της συγκέντρωσης των συστατικών του καπνού.
- Η πνιγηρότητα που προκαλείται από το καπνό, είναι αποτέλεσμα της μειωμένης περιεκτικότητας σε οξυγόνο.

- Οι δηλητηριάσεις από καπνό σχετίζονται με περιπτώσεις ατελών καύσεων (αυξημένη περιεκτικότητα μονοξειδίου του άνθρακα), τη σύσταση του καιγόμενου σώματος (αν π.χ. το καιγόμενο σώμα περιέχει θείο ο καπνός περιέχει διοξείδιο του θείου) κ.α.. Αξίζει ιδιαίτερης προσοχής η παρατήρηση, ότι οι δηλητηριώδεις επιδράσεις του καπνού είναι ιδιαίτερα επικίνδυνες σε κλειστούς χώρους.
- Δυσμενείς επιπτώσεις από τον καπνό (όχι αναγκαστικά άμεσα δηλητηριώδεις) μπορούν να προκύψουν, από εναπόθεση αιθάλης στους πνεύμονες, ή από αυξημένη περιεκτικότητα σε διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο αν και δεν είναι δηλητηριώδες μπορεί να προκαλέσει ασφυξία, επειδή εκτοπίζει οξυγόνο και μειώνει την ποσοστιαία συμμετοχή του στο μίγμα της αναπνοής.
- Ο καπνός, όπως και το σύνολο των αερίων της καύσης, βρίσκονται συχνά σε πολύ υψηλά θερμοκρασιακά επίπεδα (κοντά σε φωτιά). Η άμεση επομένως προσβολή θερμού καπνού στο δέρμα, μπορεί να προκαλέσει σοβαρά εγκαύματα όσον αφορά τους ανθρώπους, αλλά και επικίνδυνες μετατοπίσεις αερίων ρευμάτων προς γειτονικούς χώρους, που μπορούν να επεκτείνουν την πυρκαγιά ή να εξασφαλίσουν συνεχή ροή νωπού αέρα στις εστίες της πυρκαγιάς, με άμεσο αποτέλεσμα τη συντήρηση ή την ενίσχυσή της.

Προκειμένου να υπολογιστεί ο ρυθμός έκλυσης καπνού από τη φωτιά χρειάζονται τρία απαραίτητα στοιχεία.

1. Ο συντελεστής εκπομπής του καπνού εκτιμήθηκε από τη βιβλιογραφία σύμφωνα με τις υποθέσεις του McGrattan (*McGrattan et al., 1999*) και η τιμή του είναι 0,094 kg ανά kg καυσίμου.
2. Ο ρυθμός καύσης εκτιμήθηκε ίσος με 0,027 kg/m²s έπειτα από προσαρμογή στην ενδιάμεση τιμή από τις τιμές 0,015 (*Πετρόλα, 1997*) και 0,060 του HSE.

Από τα διαγράμματα συγκέντρωσης στο επίπεδο του εδάφους που προέκυψαν από την αριθμητική προσομοίωση μπορεί να προσδιοριστεί η κατανομή της συγκέντρωσης των ρύπων σε σχέση με την απόσταση.

Οι οριακές τιμές για τον καπνό είναι:

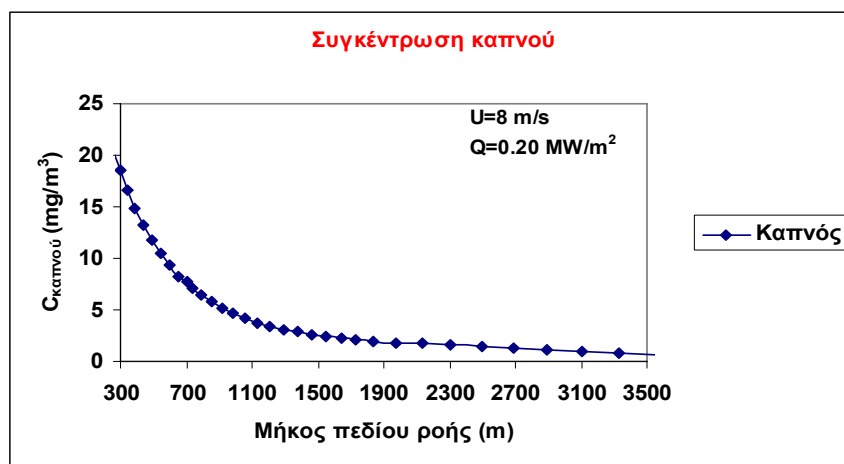
- Όρια έκτακτων μέτρων ΥΠΕΧΩΔΕ $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (μέση ημερήσια συγκέντρωση).
- Προτεινόμενο όριο για IDLH $16000 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Παρακάτω στις παραμετρικές εφαρμογές για τις επιπτώσεις του καπνού θα παρουσιαστούν μόνο οι περιπτώσεις (1), (3) και (5). Αυτό γίνεται για δύο λόγους ο ένας είναι η οικονομία χώρου διότι η παρούσα εργασία έχει το ρόλο Διπλωματικής εργασίας και ο δεύτερος είναι γιατί λαμβάνεται το χειρότερο σενάριο πάντα προς εξέταση σε τέτοιου είδους ατυχήματα. Στην προκειμένη περίπτωση η χειρότερη περίπτωση είναι η μικρότερη πηγή έκλυσης ισχύος με τη μεγαλύτερη ταχύτητα ανέμου. Αυτή η περίπτωση είναι η (1) αλλά για σύγκριση παρουσιάζονται και οι αντίστοιχες περιπτώσεις (3) και (5) που έχουν ίδια ταχύτητα ανέμου αλλά διαφορετική πηγή έκλυση ισχύος.

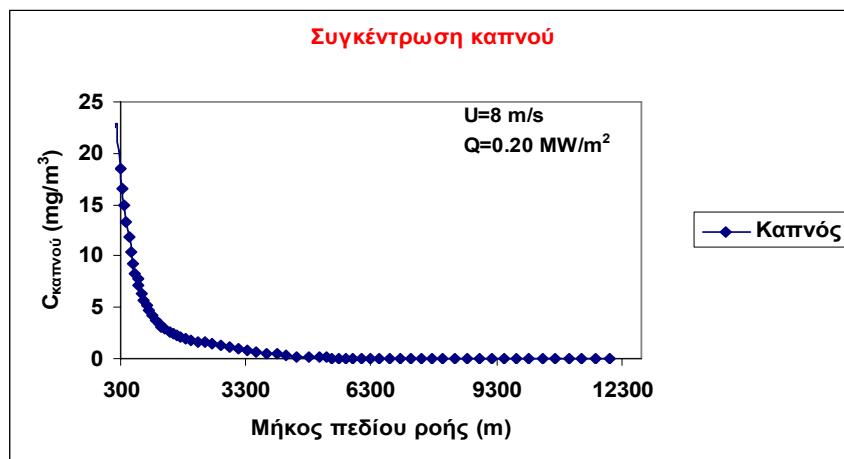
9.3.2 Παραμετρικές εφαρμογές

9.3.2.1. Περίπτωση (1) – $Q=0.20 \text{ MW}/\text{m}^2$ και $U= 8 \text{ m/s}$

Για την περίπτωση (1) προκύπτουν τα παρακάτω *Διαγράμματα 9-19, 9-20* για μικρή απόσταση από την πηγή και για μεγάλες αποστάσεις από την πηγή αντίστοιχα.



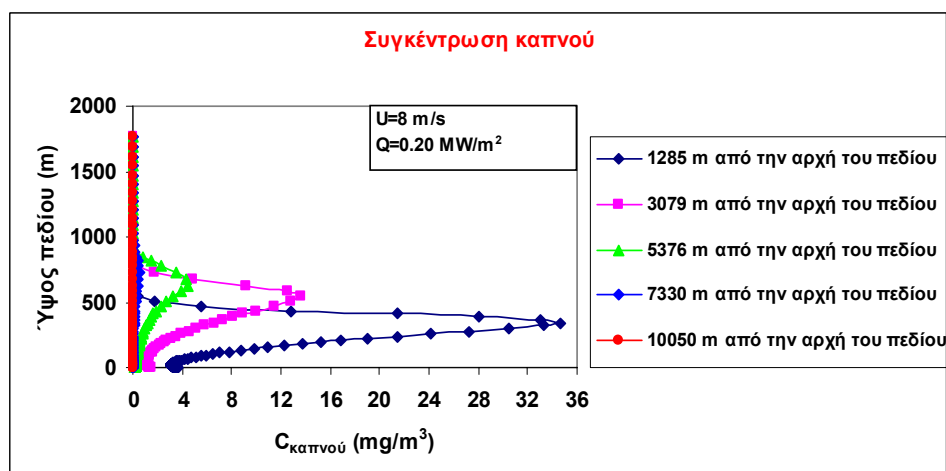
Διάγραμμα 9-19: Συγκέντρωση καπνού σε ύψος 1 m από το έδαφος σε συνάρτηση με την απόσταση του πεδίου κοντά από το κέντρο της πηγής



Διάγραμμα 9-20: Συγκέντρωση καπνού σε ύψος 1 m από το έδαφος σε συνάρτηση με την απόσταση του πεδίου μακριά από το κέντρο της πηγής.

Η συγκέντρωση του καπνού είναι σε αρκετά υψηλές τιμές κοντά στην περιοχή της πηγής και αρχίζει να μειώνεται σταδιακά σε τιμές της τάξης του 1 mg/m^3 σε απόσταση 3500 m από το κέντρο της πηγής. Εν συνεχεία η συγκέντρωση του καπνού μειώνεται σε τιμές της τάξης κάτω του $0,5 \text{ mg/m}^3$ μέχρι το σημείο όπου τείνει να μηδενιστεί. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι τα όρια συγκέντρωσης του καπνού για απόσταση μέχρι 1000 m είναι ιδιαίτερα υψηλές και μάλιστα τάξης μεγαλύτερης των 5 mg/m^3 .

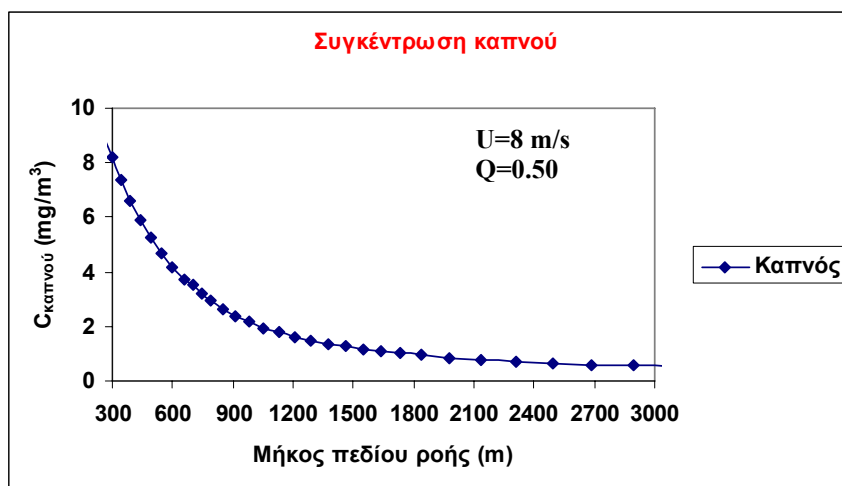
Από το παραπάνω *Διάγραμμα 9-21* προκύπτει ότι σε χαμηλά ύψη του πεδίου ροής και σε κοντινές αποστάσεις κατά μήκος του πεδίου ροής οι συγκεντρώσεις του καπνού είναι ιδιαίτερα μεγάλες. Ενώ αντίθετα όσο αυξάνει το ύψος και μεγαλώνουν οι αποστάσεις κατά μήκος του πεδίου οι συγκεντρώσεις μειώνονται.



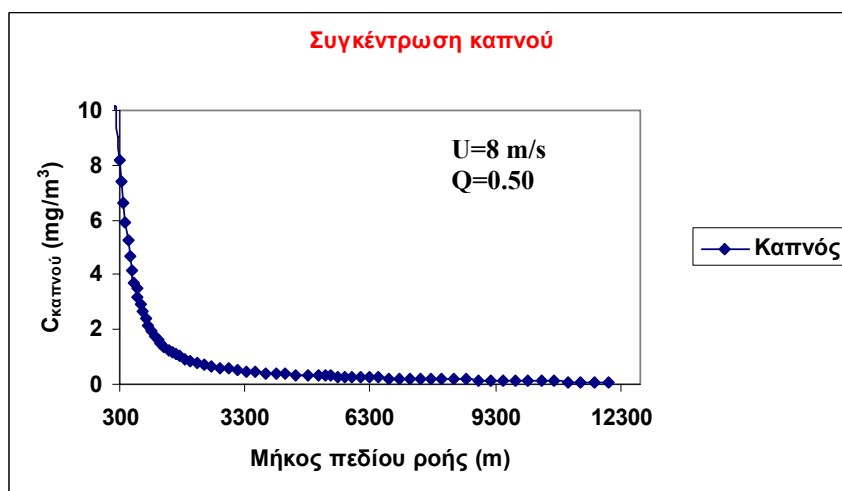
Διάγραμμα 9-21: Συγκέντρωση καπνού σε συνάρτηση με το ύψος του πεδίου σε διάφορες αποστάσεις από την αρχή του πεδίου.

9.3.2.2. Περίπτωση (3) – $Q=0.50 \text{ MW/m}^2$ και $U=8 \text{ m/s}$

Ομοίως και εδώ τα διαγράμματα που προκύπτουν από τη μελέτη του φαινομένου είναι τα (Διαγράμματα 9-22; 9-23). Όπως και στα προηγούμενα παρατηρούμε μεγάλες συγκεντρώσεις για τον καπνό της τάξης των 2 mg/m^3 για αποστάσεις από την πηγή μέχρι και τα 1200 m. Εν συνεχεία οι συγκεντρώσεις μειώνονται ακόμα περισσότερο μέχρι να φτάσουν στο σημείο να μηδενιστούν περίπου στα 12200 m. Επιπλέον με την αύξηση της έκλυσης της ισχύος της πηγής οι συγκεντρώσεις του καπνού μειώθηκαν κάτι που ήταν αναμενόμενο.

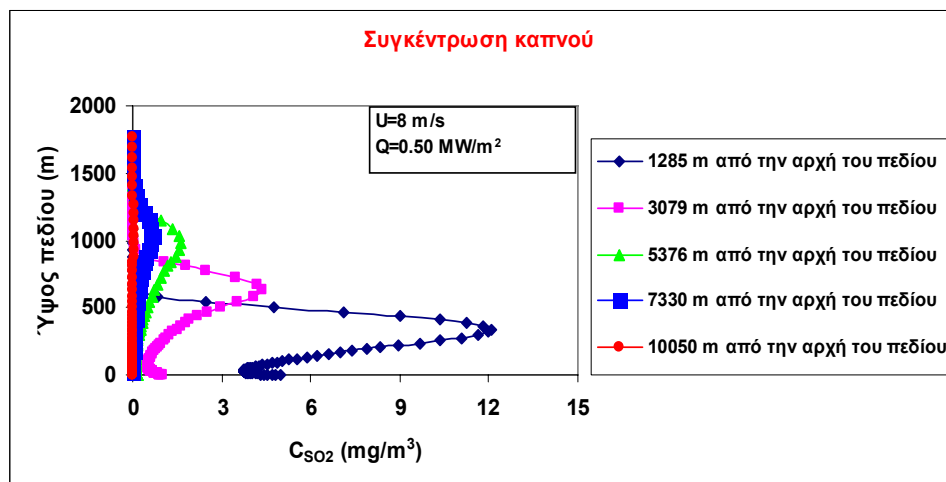


Διάγραμμα 9-22: Συγκέντρωση καπνού σε ύψος 1 m από το έδαφος σε συνάρτηση με την απόσταση του πεδίου κοντά από το κέντρο της πηγής.



Διάγραμμα 9-23: Συγκέντρωση καπνού σε ύψος 1 m από το έδαφος σε συνάρτηση με την απόσταση του πεδίου μακριά από το κέντρο της πηγής.

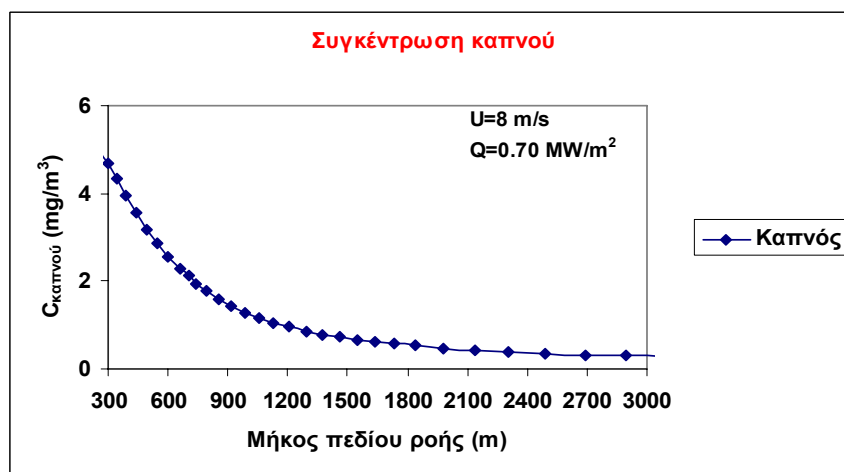
Έπειτα το *Διάγραμμα 9-24* αποδεικνύει ότι υπάρχουν μεγάλες συγκεντρώσεις καπνού για μικρά ύψη και κοντινές περιοχές στη πηγή. Επίσης επιβεβαιώνεται ότι οι τιμές της συγκέντρωσης του καπνού είναι μικρότερες σε σχέση με την περίπτωση (2).



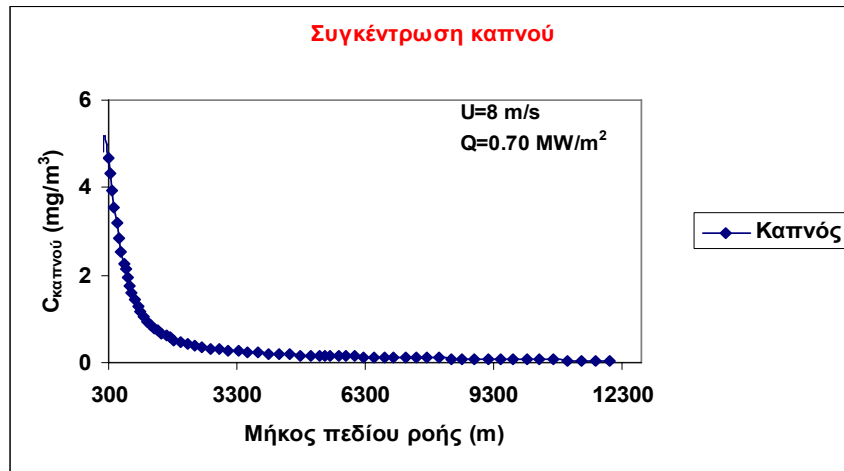
Διάγραμμα 9-24: Συγκέντρωση καπνού σε συνάρτηση με το ύψος του πεδίου σε διάφορες αποστάσεις από την αρχή του πεδίου.

9.3.2.3. Περίπτωση (5) – $Q=0.70 \text{ MW/m}^2$ και $U=8 \text{ m/s}$

Από τα παρακάτω *Διαγράμματα 9-25, 9-26* θα έχουμε αντίστοιχα. Οι συγκεντρώσεις του καπνού για κοντά στη πηγή δηλαδή για απόσταση από 300 μέχρι τα 600 m κυμαίνονται μεταξύ 4 έως 2 mg/m^3 . Οι συγκεντρώσεις του καπνού στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι πολύ πιο χαμηλές τόσο με τις αντίστοιχες της περίπτωσης (3) όσο και της περίπτωσης (1) και αυτό οφείλεται στο ότι η έκλυση ισχύος της πηγής είναι μεγαλύτερη.

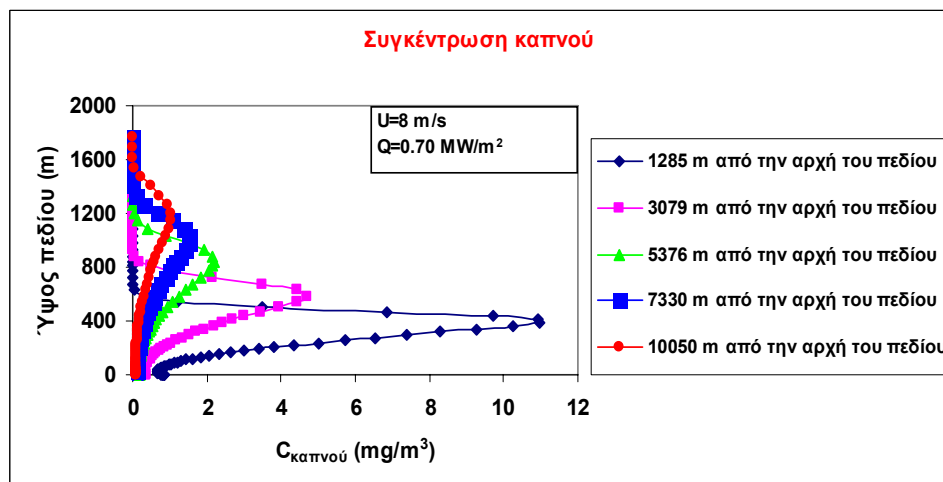


Διάγραμμα 9-25: Συγκέντρωση καπνού σε ύψος 1 m από το έδαφος σε συνάρτηση με την απόσταση του πεδίου κοντά από το κέντρο της πηγής.



Διάγραμμα 9-26: Συγκέντρωση καπνού σε ύψος 1 m από το έδαφος σε συνάρτηση με την απόσταση του πεδίου μακριά από το κέντρο της πηγής.

Το *Διάγραμμα 9-27* απεικονίζει γραφικά το ύψος με την συγκέντρωση του καπνού σε διάφορες αποστάσεις από το πεδίο ροής. Οι συγκεντρώσεις του καπνού είναι μεγάλες για ύψη που κυμαίνονται από 400 έως 600 m και για κοντινές αποστάσεις μέχρι και τα 5376 m. Οι τιμές των συγκεντρώσεων κυμαίνονται από 11 έως 2 mg/m³.



Διάγραμμα 9-27: Συγκέντρωση καπνού σε συνάρτηση με το ύψος του πεδίου σε διάφορες αποστάσεις από την αρχή του πεδίου.

9.4 Επιπτώσεις από το SO₂

9.4.1 Εισαγωγή

Το διοξείδιο του θείου ανήκει στην οικογένεια των σουλφιδίων, αέρια των οποίων κύριο χαρακτηριστικό είναι ότι είναι διαλυτά στο νερό. Το θείο είναι συστατικό όλων των ακατέργαστων ορυκτών και του αργού πετρελαίου. Κατά την επεξεργασία των παραπάνω παράγονται τα σουλφίδια. Έτσι εντοπίζονται κατά την καύση καυσίμων που περιέχουν θείο, όπως ο άνθρακας και το πετρέλαιο, κατά τη διαδικασία εξαγωγής άνθρακα από τα ορυκτά, κατά την εξαγωγή βενζίνης από το πετρέλαιο καθώς και κατά την καύση καυσίμων σε διάφορα μηχανοκίνητα.

Στην ατμόσφαιρα το διοξείδιο του θείου αντιδρά και σχηματίζει σουλφίδια και διάφορα παράγωγα επικίνδυνα για τη δημόσια υγεία. Εξαιτίας της διαλυτότητας του στο νερό σε συνδυασμό με την υγρασία της ατμόσφαιρας παράγει τοξικά παράγωγα. Οι επιπτώσεις του διοξειδίου του θείου και γενικότερα των σουλφιδίων είναι παρόμοιες με τις επιπτώσεις των οξειδίων του αζώτου. Δημιουργούν άμεσα αναπνευστικά προβλήματα στον πληθυσμό τις ημέρες που βρίσκονται σε υψηλά επίπεδα, συνεισφέρουν στη δημιουργία τοξικής βροχής και αιωρούμενων σωματιδίων. Το διοξείδιο του θείου μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις μέσω του ανέμου και εναποτίθεται σε περιοχές μακριά από την εστία παραγωγής του.

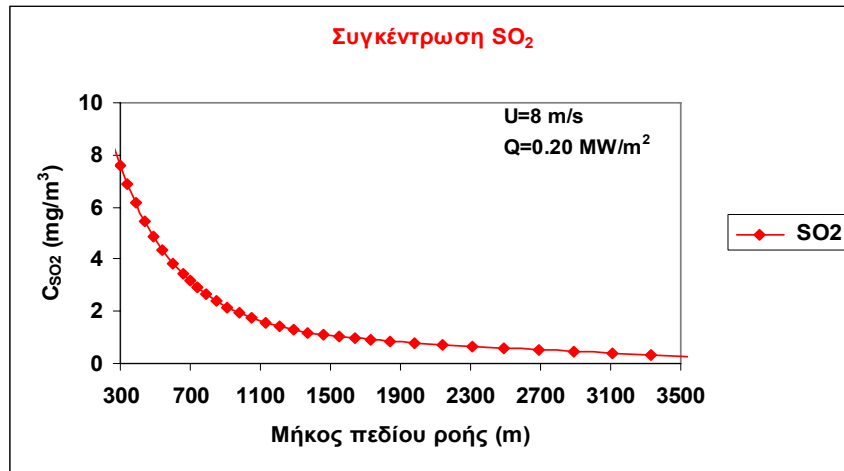
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα συγκέντρωσης του SO₂ για τις περιπτώσεις (1), (3) και (5). Τα όρια για το IDLH_{SO2} = 26.5 mg/m³.

9.4.2 Παραμετρικές εφαρμογές

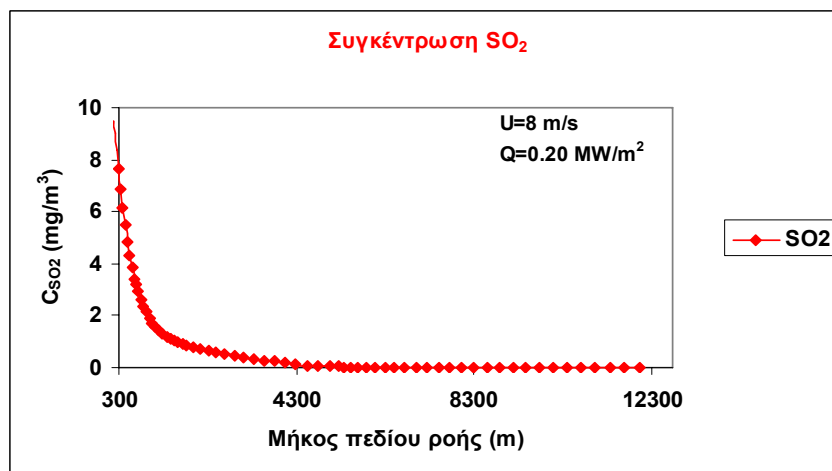
9.4.2.1. Περίπτωση (1) – Q=0.20 MW/m² και U= 8 m/s

Τα διαγράμματα που απεικονίζουν τις συγκεντρώσεις του SO₂ είναι τα παρακάτω (*Διαγράμματα 9-28; 9-29*). Από τα διαγράμματα οι συγκεντρώσεις κοντά στην πηγή είναι μεγάλες. Για απόσταση μέχρι και 1000 m περίπου οι συγκεντρώσεις του SO₂ παίρνουν τιμές από 8 έως 2 mg/m³. Έπειτα οι τιμές της συγκέντρωσης του SO₂ μειώνονται συνεχώς για απόσταση μέχρι το τέλος του μήκους του πεδίου ροής. Στο τρίτο *Διάγραμμα 9-30* δίνεται η συνάρτηση του ύψους με την συγκέντρωση του SO₂

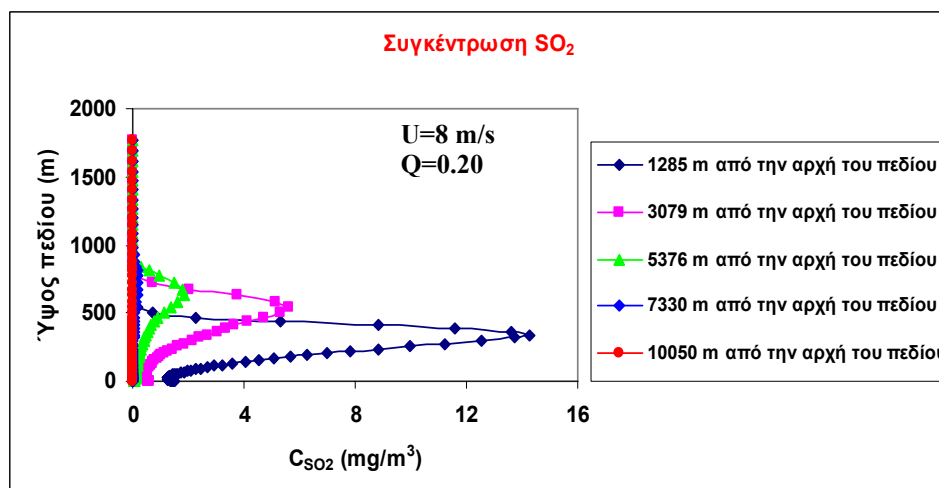
για κάποιες αποστάσεις από την αρχή του πεδίου. Οι συγκεντρώσεις αυξάνονται σε μικρό ύψος και σε κοντινές αποστάσεις από την πηγή.



Διάγραμμα 9-28: Συγκέντρωση SO_2 σε ύψος 1 m από το έδαφος σε συνάρτηση με την απόσταση του πεδίου κοντά από το κέντρο της πηγής.



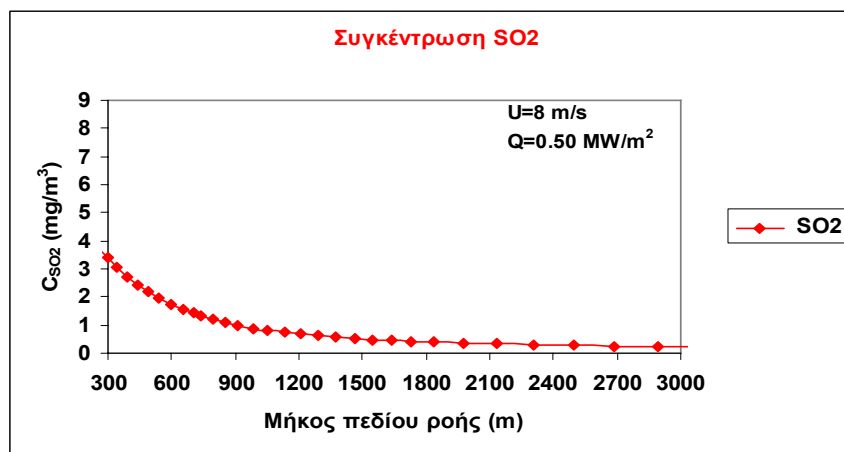
Διάγραμμα 9-29: Συγκέντρωση SO_2 σε ύψος 1 m από το έδαφος σε συνάρτηση με την απόσταση του πεδίου μακριά από το κέντρο της πηγής.



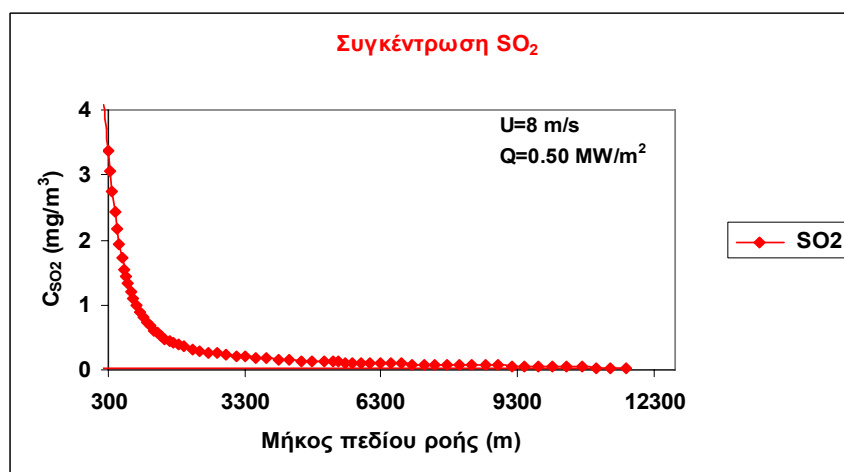
Διάγραμμα 9-30: Συγκέντρωση SO_2 σε συνάρτηση με το ύψος του πεδίου σε διάφορες αποστάσεις από την αρχή του πεδίου.

9.4.2.2. Περίπτωση (3) – $Q=0.50 \text{ MW/m}^2$ και $U=8 \text{ m/s}$

Ομοίως με τα παραπάνω, από τα *Διαγράμματα 9-31, 9-32* παρατηρείται ότι οι συγκεντρώσεις στο μεν πρώτο διάγραμμα είναι μικρότερες σε σύγκριση με το αντίστοιχο διάγραμμα στην περίπτωση (1) και αυτό οφείλεται στην αύξηση έκλυσης της ισχύος της πηγής.

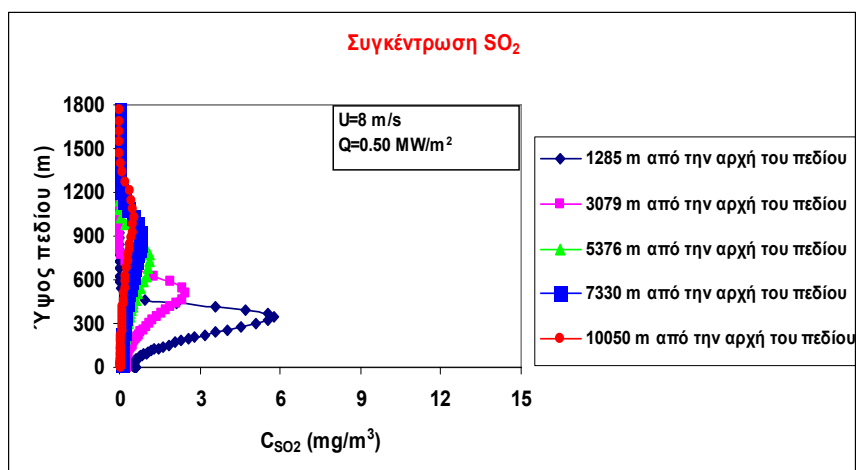


Διάγραμμα 9-31: Συγκέντρωση SO_2 σε ύψος 1 m από το έδαφος σε συνάρτηση με την απόσταση του πεδίου κοντά από το κέντρο της πηγής.



Διάγραμμα 9-32: Συγκέντρωση SO_2 σε ύψος 1 m από το έδαφος σε συνάρτηση με την απόσταση του πεδίου μακριά από το κέντρο της πηγής.

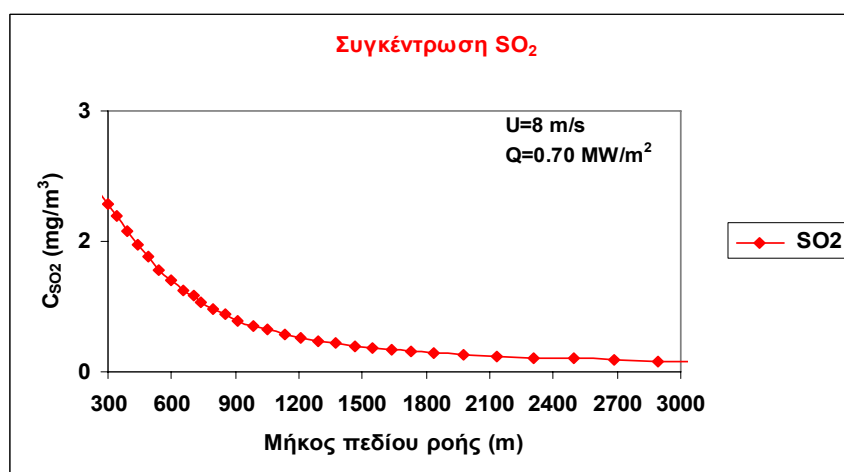
Από το *Διάγραμμα 9-33* συνάγεται ότι οι συγκεντρώσεις είναι μικρότερες σε σχέση με την περίπτωση (1) αφού και εδώ υπάρχει αύξηση της ισχύος της πηγής.



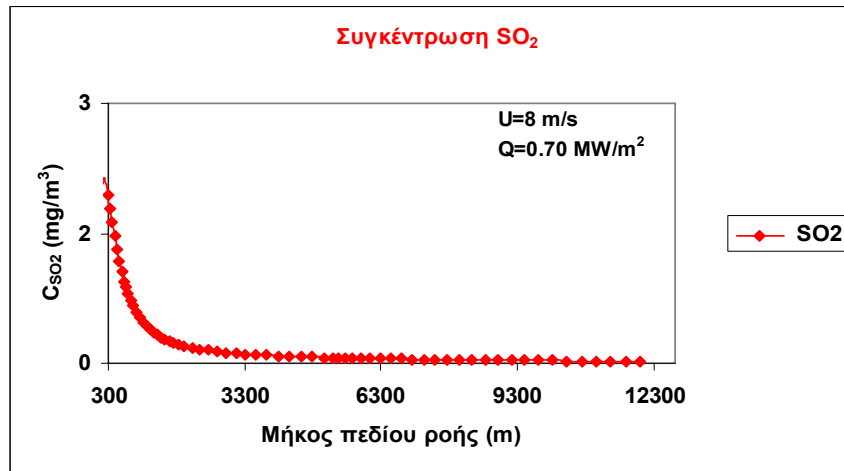
Διάγραμμα 9-33: Συγκέντρωση SO_2 σε συνάρτηση με το ύψος του πεδίου σε διάφορες αποστάσεις από την αρχή του πεδίου.

9.4.2.3. Περίπτωση (5) – $Q=0.70 \text{ MW/m}^2$ και $U= 8 \text{ m/s}$

Ομοίως και εδώ από τα *Διαγράμματα 9-34, 9-35* έχουμε μείωση των συγκεντρώσεων σε σχέση με τα αντίστοιχα διαγράμματα των περιπτώσεων (1, 3). Το οποίο είναι αναμενόμενο διότι έχουμε αύξηση της ισχύος της δεξαμενής με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι ανωστικές δυνάμεις και να μειώνονται οι αδρανειακές. Έτσι το πλούμιο ανεβαίνει λίγο ψηλότερα σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις αλλά ταυτόχρονα μειώνονται και οι συγκεντρώσεις των ρύπων.

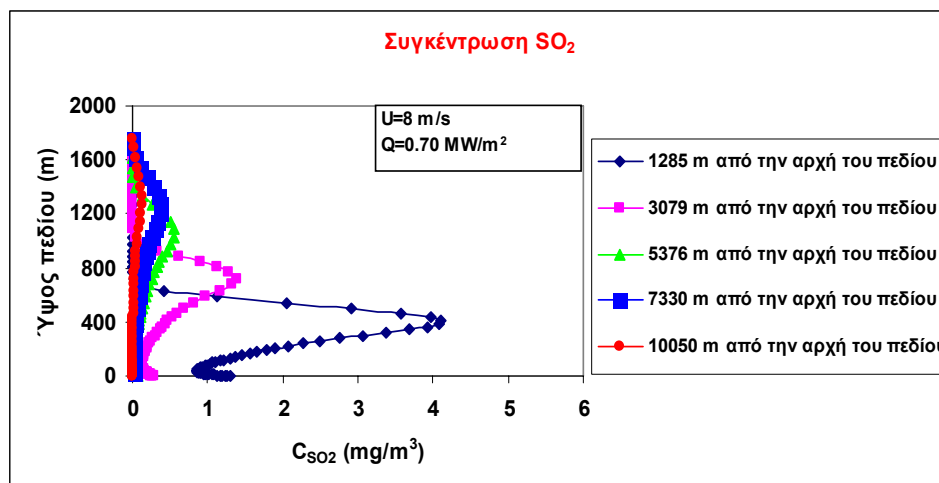


Διάγραμμα 9-34: Συγκέντρωση SO_2 σε ύψος 1 m από το έδαφος σε συνάρτηση με την απόσταση του πεδίου κοντά από το κέντρο της πηγής.



Διάγραμμα 9-35: Συγκέντρωση SO_2 σε ύψος 1 m από το έδαφος σε συνάρτηση με την απόσταση του πεδίου μακριά από το κέντρο της πηγής.

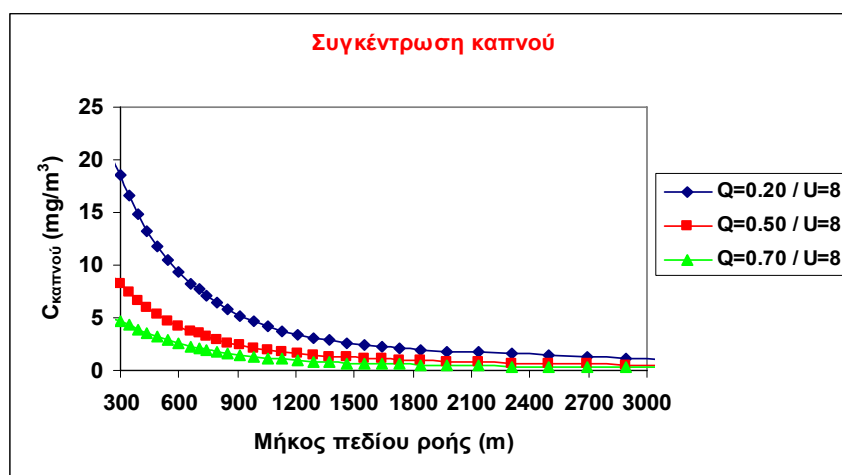
Τέλος το *Διάγραμμα 9-36* καθορίζει τη συγκέντρωση του SO_2 σε συνάρτηση με το ύψος του πεδίου ροής και εδώ εμφανίζονται μικρότερες τιμές συγκεντρώσεων σε σχέση με τις αντίστοιχες παραπάνω περιπτώσεις.



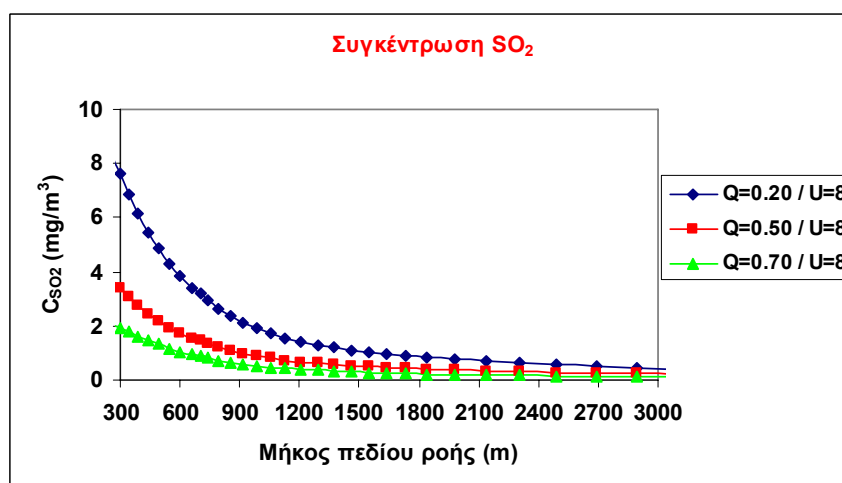
Διάγραμμα 9-36: Συγκέντρωση SO_2 σε συνάρτηση με το ύψος του πεδίου σε διάφορες αποστάσεις από την αρχή του πεδίου.

9.5 Σύγκριση παραμετρικών

Στη παρούσα ενότητα παρουσιάζονται διαγράμματα που έχουν συγκριτικά δεδομένα με το σύνολο των παραμετρικών και μερικές απεικονίσεις ισουψών καμπύλων πάνω από τη δεξαμενή. Από τα *Διαγράμματα 9-37, 9-38* παρατηρείται ότι οι τιμές της συγκέντρωσης του καπνού παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη τιμή για τη πηγή με τη μικρότερη έκλυση ισχύος και το αντίστροφο οι μικρότερες συγκεντρώσεις εμφανίζονται στην πηγή με τη μεγαλύτερη έκλυση ισχύος. Το ίδιο συμπεραίνεται και στη περίπτωση που ο ρύπος είναι το SO_2 όπως παρουσιάζεται στο *Διάγραμμα 9-38*.

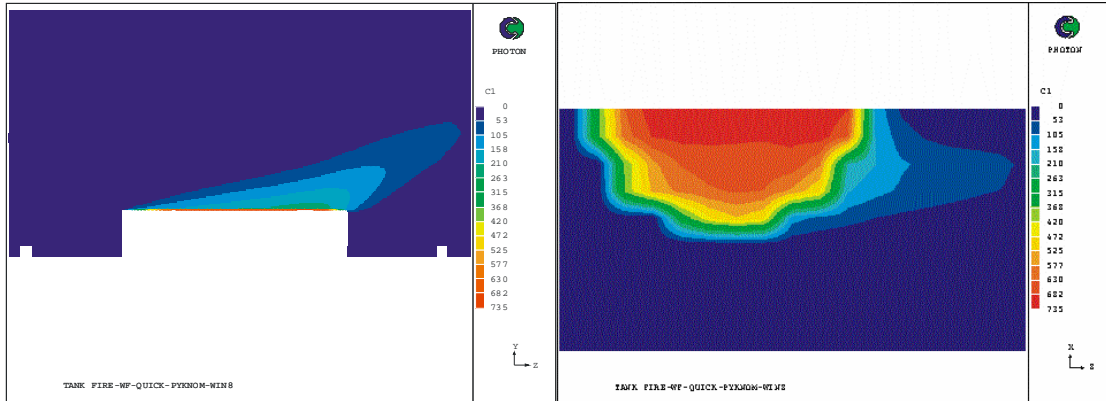


Διάγραμμα 9-37: Συγκέντρωση καπνού για κοντινή απόσταση από το κέντρο της πηγής με ταχύτητα 8 m/s αλλά για διαφορετικές πηγές.

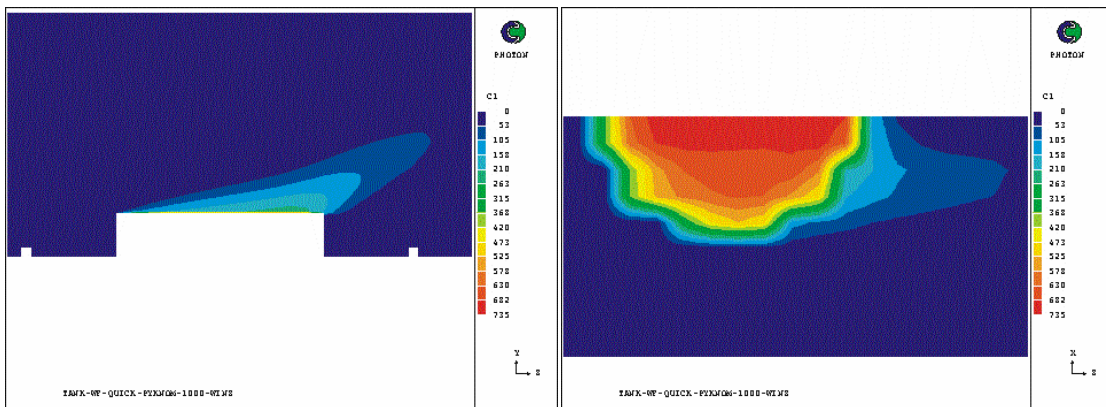


Διάγραμμα 9-38: Συγκέντρωση καπνού για κοντινή απόσταση από το κέντρο της πηγής με ταχύτητα 8 m/s αλλά για διαφορετικές πηγές.

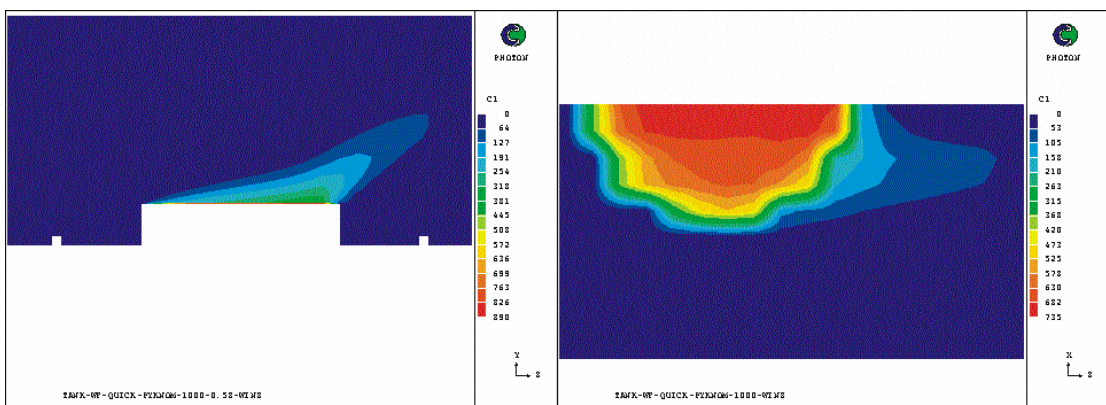
Εν συνεχεία απεικονίζονται οι ισοϋψείς καμπύλες για την συγκέντρωση του καπνού και του όρου πηγής.



Εικόνες 9-9, 9-10: Αριστερά απεικονίζονται οι ισοϋψείς καμπύλες και δεξιά του όρου πηγής (μυσός εξαιτίας συμμετρίας) για την πηγή $Q=0.20 \text{ MW/m}^2$ και $U=8 \text{ m/s}$.



Εικόνες 9-11, 9-12: Αριστερά απεικονίζονται οι ισοϋψείς καμπύλες και δεξιά του όρου πηγής (μυσός εξαιτίας συμμετρίας) για την πηγή $Q=0.50 \text{ MW/m}^2$ και $U=8 \text{ m/s}$.



Εικόνες 9-13, 9-14: Αριστερά απεικονίζονται οι ισοϋψείς καμπύλες και δεξιά του όρου πηγής (μυσός εξαιτίας συμμετρίας) για την πηγή $Q=0.70 \text{ MW/m}^2$ και $U=8 \text{ m/s}$.

9.6 Αξιολόγηση μεθόδου και αποτελεσμάτων

Η αξιολόγηση και η επαλήθευση του μοντέλου αριθμητικής προσομοίωσης έγινε με μακροσκοπικά στοιχεία που υιοθετήθηκαν από την έρευνα του Carter (*Carter, 1989*) για φωτιές λίμνης μέχρι διαμέτρου 20 m. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για σύγκριση ήταν τα εξής διαγράμματα: Το διάγραμμα συγκέντρωση SO₂ σε συνάρτηση με την οριζόντια απόσταση από την πηγή για διαφορετικές τιμές ανέμου και το διάγραμμα ανύψωσης πλουμίου σε συνάρτηση με την οριζόντια απόσταση από την πηγή.

Παρόλο ότι τα στοιχεία δεν ανταποκρίνονται για φωτιές λίμνης 85 m χρησιμοποιούνται διότι είναι τα μοναδικά που υπάρχουν. Δυστυχώς στη διεθνή βιβλιογραφία δεν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα για φωτιά λίμνης 85 m έτσι ώστε να μπορέσει να γίνει μια σύγκριση του μοντέλου με ρεαλιστικά δεδομένα.

Τα διαγράμματα που κατασκευάστηκαν από την παραμετρική ανάλυση ταυτίζονται ως προς το είδος της γραφικής παράστασης. Έτσι συμπεραίνεται ότι η αριθμητική προσομοίωση είναι επιτυχής και ότι έχει κάποιο βαθμό ρεαλισμού.

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι έγινε προσπάθεια στην παρούσα εργασία να υιοθετηθούν οι τροποποιημένοι τύποι του Mills και Moore (*Fisher et al., 2001*) αλλά οι συγκεκριμένοι τύποι είναι για φωτιές λίμνης μέχρι 70 MW πράγμα που είναι άτοπο σε σχέση με την ισχύ της πηγής που εξετάζεται. Ως εκ τούτου δεν ήταν δυνατό τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας να συγκριθούν με αυτά του Mills και Moore.

10

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο **Κεφάλαιο 10** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη διεξοδική παραμετρική ανάλυση που έγινε στο Κεφάλαιο 9. Τα συμπεράσματα αναφέρονται στις συγκεντρώσεις των ρύπων, στην ανύψωση του πλουμίου καθώς και στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που μπορούν να προκαλέσουν οι ρύποι στο οικοσύστημα μια περιοχής



Εικόνα 10-1: Απεικόνιση φωτιάς και ανωστικού πλουμίου.

10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μετά την εξέταση των έξι παραμετρικών περιπτώσεων για τη μελέτη του φαινομένου και τη συζήτηση των αποτελεσμάτων έχουν προκύψει κάποια πολύ σημαντικά συμπεράσματα:

1. Η αξιοπιστία του μοντέλου και τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει είναι σύμφωνα με μακροσκοπικά στοιχεία που έχουν βρεθεί από την βιβλιογραφία (*Carter, 1989*). Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι δεν υπάρχουν πειραματικά στοιχεία προκειμένου να μπορέσει να γίνει επαλήθευση του μοντέλου. Επίσης δεδομένα από μικρής κλίμακας φωτιάς δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για φωτιές μεγάλης κλίμακας και αυτό γιατί η συμπεριφορά του φαινομένου ποικίλει κάθε φορά που αλλάζει η κλίμακα του. Επιπλέον υπάρχουν πολλά κενά στη γνώση μας για τις μεγάλες φωτιές λίμνης, συμπεριλαμβάνοντας την επίδραση του μεγέθους της φωτιάς, του σχήματος της φλόγας, του ρυθμού έκλυσης θερμότητας της επιφάνειας, κ.α. Όλα τα παραπάνω αποτελούν απαραίτητες γνώσεις για την ανάπτυξη ενός καλού μαθηματικού μοντέλου για την πρόβλεψη των χαρακτηριστικών μεγάλης κλίμακας φωτιάς λίμνης (*Chatris et al., 2001*).

2. Από την μελέτη των αποτελεσμάτων όλων των περιπτώσεων συνάγεται ότι η μέγιστη τιμή ανύψωσης του πλουμίου έφτασε στα 1360 m στην παραμετρική περίπτωση (6) όπου υπήρχε ταχύτητα 5 m/s και εκλυόμενη ισχύς δεξαμενής 0,70 MW/m². Στον παρακάτω *Πίνακα 10-1* παρουσιάζονται τα ύψη του πλουμίου για κάθε περίπτωση.

Πίνακας 10-1: Συνολικά παραμετρικά για την ανύψωση πλουμίου σε κάθε περίπτωση.

Περιπτώσεις	Οριακό στρώμα (BL)	Εκλυόμενη ισχύς δεξαμενής (MW/m ²)	Ταχύτητα U (m/s)	Πλούμιο (m)
(1)	1000 m	0.20	8	706
(2)	800 m	0.20	5	978
(3)	1000 m	0.50	8	1050
(4)	800 m	0.50	5	1110
(5)	1000 m	0.70	8	1267
(6)	800 m	0.70	5	1360

3. Από την παραμετρική ανάλυση συνεπάγεται ότι το χειρότερο σενάριο από αυτά που μελετήθηκαν είναι η περίπτωση (1) και αυτό συνάγεται από την

εμφάνιση των μεγαλύτερων συγκεντρώσεων τόσο σε καπνό όσο και σε SO₂ στα διαγράμματα κατανομής των ρύπων για κοντινές αποστάσεις αλλά και για μακρινές από το κέντρο της πηγής και σε ύψος 1m από το έδαφος. Παρακάτω στους **Πίνακες 10-2, 10-3** συνοψίζονται τα αποτελέσματα για τις μέγιστες τιμές ρύπων για τα σενάρια (1), (5) και (3).

Πίνακας 10-2: Συνολικά παραμετρικά μέγιστων συγκεντρώσεων καπνού και SO₂ σε κοντινές αποστάσεις και σε ύψος 1m από το έδαφος.

Περιπτώσεις	Οριακό στρώμα (BL)	Εκλυόμενη ισχύς δεξαμενής (MW/m ²)	Ταχύτητα U (m/s)	Καπνός (mg/m ³)	SO ₂ (mg/m ³)
(1)	1000 m	0.20	8	18,5	8
(3)	1000 m	0.50	8	8,20	3,5
(5)	1000 m	0.70	8	4,7	2,2

Πίνακας 10-3: Συνολικά παραμετρικά μέγιστων συγκεντρώσεων καπνού και SO₂ σε συνάρτηση με το ύψος του πεδίου ροής.

Περιπτώσεις	Οριακό στρώμα (BL)	Εκλυόμενη ισχύς δεξαμενής (MW/m ²)	Ταχύτητα U (m/s)	Καπνός (mg/m ³)	SO ₂ (mg/m ³)
(1)	1000 m	0.20	8	34,6	14,3
(3)	1000 m	0.50	8	12,1	5,78
(5)	1000 m	0.70	8	11	4,10

4. Για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν διακρίνονται δύο ζώνες επιπτώσεων. Η πρώτη είναι κοντά στη δεξαμενή, δηλαδή στο σημείο του ατυχήματος και η δεύτερη ζώνη εξετάζει τις συγκεντρώσεις των ρύπων μακριά από το σημείο του ατυχήματος. Στην πρώτη ζώνη οι συγκεντρώσεις που εξετάστηκαν είναι εξαιρετικά υψηλές κυρίως όμως για τον καπνό οι οποίες ξεπερνάνε το όριο IDLH_{καπνού} (16 mg/m³) ενώ οι συγκεντρώσεις για το SO₂ είναι και αυτές υψηλές αλλά δεν ξεπερνούν το όριο του IDLH_{SO₂} (26.5 mg/m³). Για υπενθύμιση αναφέρεται ότι για τον ορισμό του IDLH μπορεί να ανατρέξει ο αναγνώστης στο **Κεφάλαιο 2** της παρούσας εργασίας. Τέλος είναι σημαντικό να ειπωθεί ότι δεν υπάρχουν ζώνες θανάτου από τις συγκεντρώσεις τόσο του καπνού όσο και του SO₂.

5. Η διασπορά των ρύπων σε ένα τέτοιου είδους ατύχημα εξαρτάται από τις μετεωρολογικές συνθήκες και τα χαρακτηριστικά της φωτιάς. Οι σοβαρότερες

επιπτώσεις προκύπτουν για ισχυρό άνεμο και μικρής έντασης φωτιάς, οπότε και το πλούμιο «παγιδεύεται» σε μικρό ύψος από την επιφάνεια του εδάφους με συνέπεια την παρουσία μεγάλων συγκεντρώσεων σε μεγάλη απόσταση από την εστία της φωτιάς. Αντίθετα στην περίπτωση μικρής έντασης ανέμου και μεγάλης ισχύος φωτιάς, το πλούμιο του καπνού διασπείρεται σε μεγαλύτερη έκταση και μειώνεται η ένταση του φαινόμενου.

6. Συνήθως φωτιές σε δεξαμενές καυσίμων με μεγάλη διάμετρο πολύ δύσκολα σβήνουν. Αυτό συνεπάγεται ότι η φωτιά θα καίει για αρκετές ημέρες μέχρι να καεί όλο το καύσιμο που περιέχει η δεξαμενή. Αυτό σημαίνει ότι οι συγκεντρώσεις των ρύπων μπορούν να φτάσουν πολύ μακριά χωρίς βέβαια να έχει άμεσα αντίκτυπο στην υγεία του ανθρώπου. Η συγκεκριμένη κατάσταση επιβαρύνει κυρίως το οικοσύστημα της γειτονικής περιοχής που προκλήθηκε το ατύχημα. Οι επιπτώσεις που προκαλεί ο καπνός στα οικοσυστήματα δεν έχει καθοριστεί με σαφήνεια και γενικά υπάρχει μια αμφιβολία για το τι μπορεί να προκαλέσει. Σημαντική συμβολή στη διερεύνηση αυτού του θέματος έγινε την περίοδο του πολέμου στο Περσικό κόλπο. Όπου μεγάλα ονόματα της επιστημονικής κοινότητας παρατηρούσαν και μετρούσαν τοξικούς ρύπους από φωτιές σε πετρελαιοπηγές όπου έκαιγαν για μήνες. Πολλά από τα αποτελέσματά τους δημοσιεύτηκαν στα πιο έγκριτα επιστημονικά περιοδικά που υπάρχουν στον κόσμο (*Nature, Science*). Ενδεικτικά αναφέρεται στο έγκριτο επιστημονικό περιοδικό *Nature* ότι στην περίπτωση του Κουβέιτ οι μεγάλες συγκεντρώσεις καπνού προκάλεσαν μείωση στο φως της ημέρας καθώς και μείωση της θερμοκρασίας μέχρι και 10°C σε απόσταση 200 Km από την πηγή. Επίσης περιπτώσεις όξινης βροχής, μαύρου χιονιού και φωτοχημικής ομίχλης εμφανίστηκαν σε αποστάσεις μεταξύ 1000 Km και 2000 Km από το Κουβέιτ (*Browning, 1991*). Περιπτώσεις μαύρου χιονιού έχουν αναφερθεί και στο ατύχημα της Jet Oil στο Καλοχώρι της Θεσσαλονίκης το 1986 σε μακρινές ορεινές περιοχές. Παράλληλα μία άλλη ομάδα ερευνητών χρησιμοποιώντας ένα μαθηματικό μοντέλο παρουσίασε για την περιοχή του Κουβέιτ μια μείωση στη θερμοκρασία του επιφανειακού αέρα κατά ~ 4 °C (*Bakan, 1991*). Τέλος σημαντική ήταν και η συνεισφορά του Small (*Small, 1991*) όπου με εφαρμογή μοντέλων και αρκετών παραδοχών κατάφερε να υπολογίσει την παραγωγή

καπνού και να αποσαφηνίσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκαλεί στην περιοχή του Περσικού κόλπου γενικότερα.

11

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

Στο Κεφάλαιο 11 γίνεται αναφορά σε θέματα και σημεία που χρήζουν μια πιο αναλυτική και λεπτομερή προσέγγιση για μελλοντική μελέτη όπου βέβαια δεν είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν στα πλαίσια μιας διπλωματικής εργασίας. Οι μελλοντικές εργασίες στηρίζονται στην καλύτερη και πιο ολοκληρωμένη μελέτη του φαινομένου καθώς και στη χρήση άλλων μοντέλων τύρβης με καλύτερα αποτελέσματα.



Εικόνες 11-1, 11-2: Οι παραπάνω εικόνες απεικονίζουν τις εγκαταστάσεις του διυλιστηρίου Turgas στην Τουρκία όπου ξέσπασε φωτιά στις δεξαμενές αποθήκευσης καυσίμων από σεισμό.

11. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

Η εκπόνηση της συγκεκριμένης Διπλωματικής εργασίας είχε σαν κύριο στόχο την προσομοίωση διασποράς τοξικών ρύπων και την εκτίμηση επιπτώσεων στο περιβάλλον από πυρκαγιές σε δεξαμενές καυσίμων. Παρόλο τη διάθεση και θέληση του συγγραφέα τα στενά χρονικά όρια τα οποία θέτει μια Διπλωματική εργασία δεν επιτρέπουν την ολοκληρωμένη μελέτη του φαινομένου.

Ως εκ τούτου δίνεται το έναυσμα για επέκταση της παρούσας εργασίας σε μελλοντική έρευνα πάνω σε θέματα και σημεία που χρήζουν περαιτέρω ανάλυση, μερικά από αυτά προτείνονται παρακάτω:

- Στη παρούσα εργασία έγινε μελέτη του φαινομένου για συνθήκες αδιαβατικής ατμόσφαιρας. Για την συνολική εικόνα του φαινομένου θα ήταν καλύτερο να μελετηθούν και οι περιπτώσεις ευσταθούς και ασταθούς ατμόσφαιρας. Ως εκ τούτου θα είναι πλέον σαφές το πεδίο συγκεντρώσεων για κάθε πιθανή ατμοσφαιρική κατάσταση.
- Εξαιτίας έλλειψης στοιχείων και δυσκολίας αντιμετώπισης του προβλήματος έγιναν αρκετές παραδοχές. Ως εκ τούτου προτείνεται καλύτερη εισαγωγή περιβαλλοντικών δεδομένων που επικρατούσαν στη χρονική εξέλιξη του ατυχήματος και ακριβή αριθμό των ποσοτήτων καύσης των χημικών ουσιών.
- Επιπλέον για την προσομοίωση της διασποράς των ρύπων έγινε η παραδοχή ότι η γεωμετρία του πεδίου ροής είναι αρκετά απλή. Έτσι η προσομοίωση θα μπορούσε να γίνει με πολύπλοκη μορφολογία εδάφους και να συνεκτιμηθεί η επίδραση των γειτονικών κτηρίων στην ανάπτυξη του φαινομένου.
- Επιπρόσθετα η μελέτη του φαινομένου έγινε για την περίπτωση μιας δεξαμενής. Συνήθως στην περίπτωση τέτοιου είδους ατυχημάτων η πυρκαγιά ξεσπά σε πολύ περισσότερο αριθμό δεξαμενών εξαιτίας της μικρής απόστασης που υπάρχει μεταξύ τους. Έτσι είναι αναγκαία η προσομοίωση να γίνει για το σύνολο των δεξαμενών που λαμβάνουν μέρος στο ατύχημα (*tankfarm*).

Ωστόσο η αντιμετώπιση του φαινομένου γίνεται πολύ πιο σύνθετη και απαιτείται πολύ μεγάλη υπολογιστική δύναμη για το αριθμητικό πεδίο ροής της προσομοίωσης.

- Στην συγκεκριμένη προσομοίωση έγινε χρήση του μοντέλου τύρβης **RNG derived k-ε**. Η χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου σε σχέση με το απλό **k-ε** επιλέχτηκε εξαιτίας των καλύτερων αποτελεσμάτων που δίνει για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων. Εξάλλου τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας όσο και άλλων παρόμοιων βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με δεδομένα της βιβλιογραφίας γεγονός που καθιστά το μοντέλο αξιόπιστο. Ωστόσο η χρήση άλλων μοντέλων όπως του **k-ω**, των μεγάλων δινών (**LES**) και των πολύ μεγάλων δινών (**VLES**) επιβάλλεται αφού είναι εξίσου πολύ γνωστά και σε αρκετές περιπτώσεις με καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με το **RNG derived k-ε**. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η χρήση των παραπάνω μοντέλων δεν έγινε όχι μόνο εξαιτίας της μεγάλης υπολογιστικής δύναμης που απαιτείται αλλά και για τον χρόνο όπου σε μια διπλωματική εργασία δεν είναι δυνατό να είναι αρκετός.
- Τέλος το φαινόμενο της φωτιάς λίμνης (**pool fire**) που παίζει καθοριστικό παράγοντα στην ακρίβεια και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων χρήζει περαιτέρω μελέτη και συγκεκριμένα στις θερμοκρασίες καύσης των καυσαερίων, στην ταχύτητα εξόδου των καυσαερίων από τον όρο πηγής (κορυφή δεξαμενής) καθώς και στον ρυθμό καύσης των καυσαερίων. Ειδικότερα η περίπτωση φωτιάς λίμνης μεγάλης διαμέτρου όπως στην προκειμένη περίπτωση μελέτης αποτελεί πρόκληση για την επιστημονική κοινότητα, διότι δεν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα που να μπορούν να καθορίσουν αξιολογικά συμπεράσματα.

12

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Στο Κεφάλαιο 12 παρουσιάζονται όλες οι βιβλιογραφικές αναφορές που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της Διπλωματικής Εργασίας. Αυτές διακρίνονται σε βιβλία, περιοδικά, επιστημονικά άρθρα, τεχνικές αναφορές και εκθέσεις και φυσικά διευθύνσεις από το Ίντερνετ.



Εικόνα 12-1: Ανύψωση πλουμίου από το ατύχημα στις δεξαμενές του Buncefield, U.K

12. 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, K., 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. L., (1986). Fire plumes and ceiling jets. Fire Safety J., 11, pp: 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., Barnes, R., T., H., Bennetts, D., A., Maryon, R. H., Mason, P., J., McKenna, D., Mitchell, J. F. B., Senior, C. A., Slingo, A., and Smith, F., B., (1991). Environmental effects from burning oil wells in Kuwait. Nature, Vol. 351, pp: 363-367.
13. CAFE, Working Group on Particulate Matter, (2004). Second Position Paper on Particulate Matter.

(http://europa.eu.int/comm/environment/air/cafe/pdf/working_groups/2nd_position_paper_pm.pdf)

14. Caretto, L. 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. II, pp: 60.
15. Carter, D. A., (1989). Methods for estimating the dispersion of toxic combustion products from large fires. Chem. Eng. Res. Des., Vol. 67, pp: 348-352.
16. Chang, J., Lin Cheng-Chung, (2006). A study of storage tank accidents, Journal of Loss Prevention in the process industries, 19, pp: 51-59.
17. 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.
18. Chatris, J., M., Quintela, J., Folch, J., Planas, E., Arnaldos, J. and Casal, J., (2001). Experimental Study of Burning Rate in Hydrocarbon Pool Fires, Combustion and Flame, 126, pp: 1373-1383.
19. Chouhan, T. R., (2005). The unfolding of Bhopal disaster, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 18, pp: 205-208.
20. Cox, G., Chitty, R., (1985). Some sources dependent effects of unbounded fires. Combustion Flame, 60, pp: 219-232.
21. Crauford, N. L., Liew, S. K., Moss, J. B., (1985). Experimental and numerical simulation of a buoyant fire. Combustion Flame, 61, pp: 55.
22. De Leeuw, F., Berge, E., Gronskei, K. and Tombrou, M., (1995). Review on requirements for models and model application, Report MA3-1, European Topic Centre on Air Quality.
23. Delichatsios, M. A., (1995). Air entrainment into buoyant jet flames and pool fires. SFPE Handbook, 2nd ed., National Fire Protection Association.
24. Delichatsios, M.A., (1987). Air entrainment into buoyant jet flames and pool fires. Combustion Flame, 70, pp: 33-46.
25. Federal Emergency Management Agency (FEMA), United States Fire Administration, National Fire Data Centre, Technical Report Series, (1998). “Phillips Petroleum Chemical Plant Explosion and Fire Pasadena, Texas, October 1989”.

26. 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.
27. Freitas, J. C., (1995). Perspective: Selected Benchmarks From Commercial CFD Codes, *Journal of Fluids Engineering*, February 23.
28. 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.
29. Gifford, F. A., (1976). Turbulent Diffusion – Typing Schemes: A review, *Nucl. Saf.* 7(1): 71.
30. 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.
31. Hamins, A., Konishi, K., Borthwick, P., Kashiwagi, T., (1996). Global properties of gaseous pool fires. 26th Symposium on Combustion, Napoli, Italy, pp: 1429-1436.
32. Hanjalic, K., (2004). Closure Models for Incompressible Turbulent Flows, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
33. 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).
34. Hara, T., Yokoi, M., Kato, S., (2000). Study on thermal plumes in free space by means of numerical simulation based on standard $k\sim\epsilon$ model, *J. Archit. Plann. Environ. Eng.*, 530, pp: 39-46.
35. 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 $k\sim\epsilon$ model. Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, , pp: 683-684.
36. Hasemi, Y., Tokunaga, T., (1984). Flame geometry effects on the buoyant plumes from turbulent diffusion flames. *Fire Science Technology*, 4, pp: 15-26.
37. 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.
38. HAZ –MAT Response team, Leak and Spill Guide, (1984). Fire Protection Publications, Oklahoma State University.

39. Heskestad, G., (1983). Luminous heights of turbulent diffusion flames. *Fire Safety J.*, 5, pp: 103-108.
40. Heskestad, G., (1995). Fire plumes. *SFPE Handbook*, 2nd ed., National Fire Protection Association.
41. Hinze O. J., (1959). *Turbulence*, McGraw – Hill, New York.
42. 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.
43. Houston, D. E. L., (1971). New approaches to the safety problem, *Major Loss Prevention*, 210, pp: 45-52.
44. HSE, Buncefield MIIB, (2006a). The Buncefield Investigation, Progress Report 1, HSE & EA, (www.buncefieldinvestigation.gov.uk).
45. HSE, Buncefield MIIB, (2006b). The Buncefield Investigation, Progress Report 2, HSE &EA, (www.buncefieldinvestigation.gov.uk).
46. HSE, Buncefield MIIB, (2006c). The Buncefield Investigation, Progress Report 3, HSE &EA, (www.buncefieldinvestigation.gov.uk).
47. Huser, A., Nilsen, P.J., Skåtum, H., (1997). Application of k- ϵ model to the stable ABL: Pollution in complex terrain. *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 67&68, pp:425-436
48. IEC 61508, (2003). Functional Safety of electronical/electronic/programmable electronic safety-related systems, Bureau Central de lu Commission Electrotechnique International, Geneve.
49. Ishikawa, K. & Lu, D. J., (1985). *What is total quality control?* Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall Inc (trans).
50. Issa, R. I., (1986). Solution of the Implicitly Discretised Fluid Flow Equations by Operator-Splitting, *J. Comput. Phys.*, Vol. 62, pp: 40-65.
51. Jackson, J. D., (1995). Osborne Reynolds: scientist, engineer and pioneer, *Proc. R. Soc. Lond. A*, 451, pp: 49-86.
52. 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.
53. Kaplan, S., (1981). On the quantitative definition of risk, *Risk Analysis*, Vol. 1(1), pp: 11-27.

54. Karman Von T and Taylor G. I., (1938). Some remarks on the statistical theory of turbulence, Proc. 5th Int. Congr. Appl. Mech., Cambridge, MA, 347.
55. Kato, S., Murakami, S., Ohira, N., (1996). CFD analysis of thermal plume by means of $k\sim\epsilon$ model. Summaries of Technical Papers of Annual Meeting. Architectural Institute of Japan, September, pp: 517-518.
56. 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.
57. Kletz, T. A., (1988). Piper Alpha: latest chapter in a long history. The Chemical Engineer, 4(July), 277.
58. Kobayashi, T., (1997). Atlas of Visualization III, CRC Press, Boca Raton, FL.
59. 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.
60. Kolmogorov, A. N., (1941b). On degeneration (decay) of isotropic turbulence in an incompressible viscous liquid, Dokl. Acad. Nauk. SSSR 31, pp: 538-540.
61. Kolmogorov, A. N., (1941c). Dissipation of energy in locally isotropic turbulence, Dokl. Acad. Nauk. SSSR 32, pp: 16-18.
62. Körvers, Patrick M.W., (2004). Accident precursors: proactive identification of safety risks in the chemical process industry, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven.
63. Koseki, H., Iwata, Yusaku, Natsume, Y., Takahashi, T., Nirano, T., (2000). Tomakomai Large Scale Crude Oil Fire Experiments. Fire Technology, Vol. 36, No. 1, pp: 24-38.
64. Kung, H., Stavrianidis, P., (1982). Buoyant plumes of large pool fires. 19th Symposium on Combustion.
65. Launder, B. E. and Spalding, D. B., (1972). Lectures in Mathematical models of turbulence, Academic Press, New York.
66. Launder, B. E. and Spalding, D. B., (1974). The Numerical Computation of Turbulent Flow, Comput. Methods Appl. Mech. Eng., Vol. 3, pp: 269-289.
67. Lees, P. Frank, (1996). Loss Prevention in the Process Industries, Hazard Identification, Assessment and Control, Vol. 1, 2, 3, 2nd Edition, Butterworth – Heinemann, Oxford.

68. 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.
69. 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.
70. Malin, M. R., (1983). Calculations of intermittency in self-preserving, free turbulent jets and wakes, *CFDU Rep. CFD/83/10*, CFDU, Imperial College, London.
71. March and Mclellan, (1990). Large property losses in the hydrocarbon-chemical Industries: A thirty-year review (17 ed.). New York, USA: M & M Protection Consultants.
72. March and Mclellan, (2002). The 100 largest losses 1972-2001: large properties in the hydrocarbon-chemical industries. New York, USA: M & M Protection Consultants.
73. Markatos, N. C. and Pericleous, K. A., (1984). *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 27, No. 5, pp: 755-772.
74. Markatos, N. C., (1985). The mathematical modelling of turbulent flows, *Appl. Math. Modelling*, Vol. 10, June.
75. 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.
76. McCaffrey, B., (1979). Purely buoyant diffusion flames – some experimental results. NBSIR 79-1910, National Bureau of Standards, Washington, 1979.
77. McCaffrey, B., (1995). Flame height. *SFPE Handbook*, 2nd ed., National Fire Protection Association.
78. McGrattan, K., B., (2003). Smoke Plume Trajectory Modeling, *Spill Science & Technology Bulletin*. Vol. 8, No. 4, pp: 367-372.
79. 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.
80. McGrattan, K., B., Trelles, J., Baum, R., H., (1999). Smoke Dispersion from Multiple Fire Plumes. *AIAA Journal*, Vol. 37, No. 12, pp: 1588-1601.

81. Methods for the determination of possible damage – Green Book, (1989). The Netherlands Organization of Applied Scientific Research TNO, CPR 16E, December.
82. 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.
83. Morton, BR, Taylor GI, Turner JS, (1997). Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources. Proc. Roy. Soc., 234A: 1-23.
84. Mudan, S., K., (1984). Thermal radiation hazards from hydrocarbon pool fires. Prog. Energ. Combust. Sci., Vol. 10, pp: 59-80.
85. Nam, S., Bill, R. G., (1993). Numerical simulation of thermal plumes. J. Fire Safety, 21, pp: 231-256.
86. North American Emergency Response Guidebook, (1996). Department of Transportation of USA, Canada and Mexico.
87. 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.
88. Ohira, N., Kato, S., Murakami, S., (1998). Study on modified $k\sim\epsilon$ model applicable to stable and unstable flows due to buoyancy. J. Archit Plann Environ. Eng., 503, pp: 33-38.
89. Pasma, H. J., Vrijling, J. K., (2003). Social Risk Assessment of Large Technical Systems, Human Factors and Ergonomics in Manufacturing, Vol. 13 (4), pp: 305-316.
90. Pasquill, F., (1961). The Estimation of the Dispersion of Windborne Material, Meteorol. Mag., 90: 33-49.
91. 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.
92. 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.
93. Patankar, S. V., (1979). A Calculation Procedure for Two-Dimensional Elliptic Situations, Num. Heat Transfer, Vol. 2.

94. Patankar, S. V., (1980). Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation, Taylor & Francis Group, New York.
95. Persson, H., Lonnermark, A., (2004). Tank fires. SP Swedish National Testing and Research Institute, SP Report 2004:14, Boras, Sweden.
96. Peyret, R., and Taylor, T., (1983). Computational Methods for Fluid Flow, Springer – Verlag, New York, 1983.
97. Quintiere, J. G., Grove, B., S., (1998). A unified analysis for fire plumes. 27th Symposium on Combustion, Boulder, CO, USA, pp: 2757-2766.
98. 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.
99. Richardson, F. L., (1922). Weather Prediction by Numerical Process, Cambridge University Press.
100. Risk criteria for land-use planning in the vicinity of major industrial hazards, (1989) Health & Safety Executive – HSE.
101. Schaaf van der, T. W., (1992). Near miss reporting in the chemical process industry, Ph. D thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven.
102. Shrivastava, P., (1995a). Democratic control of technological risks in developing countries, Ecological Economics, 14, pp: 195-205.
103. Shrivastava, P., (1995b). Ecocentric management in industrial ecosystems: Management paradigm for a risk society, 20 (1), pp: 118-137.
104. Sinai, Y. L., Owens, M. P., (1995). Validation of CFD modelling of unconfined pool fires with crosswind: flame geometry. Fire Safety J., 24, pp: 1-34.
105. Small, D., R., (1991). Environmental impact of fires in Kuwait. Nature, Vol. 350, pp: 11-12.
106. Smit M.J.H., (1993). Systems to forecast the dispersion of chemical clouds, Workshop about chemical risks, Florival, 25 & 26 February.
107. 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.
108. Spalding D. B., (1983). Chemical reaction in turbulent fluids, Physico Chemical Hydrodyn, 4 (4), 323-336.

109. 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.
110. Suchman, E. A., (1961). A conceptual analysis of the accident problem, *Social Problems*, 8(3), pp: 241-246.
111. Szepesi, D. J., (1989). *Compendium of Reggulatory Air Quality Simulation Models*, Akademiai Kiado, Budapest.
112. Tamanini, F., (1977). Reaction rates, air entrainment and radiation in turbulent fire plumes. *Combustion Flame*, 30, pp: 85-101.
113. *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.
114. 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.
115. Turner, D. B., (1967). *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates*, Public Health Service, Publication 999-AP-26. Robert A. Taft Sanitary Engineering Center, Cincinnati, Ohio.
116. Van Doormal, 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.
117. Van Leer, B. (1973). Towards the ultimate conservative difference scheme I. The quest of monotonicity, *Lecture Notes in Physics*, Vol 18, pp: 163-168
118. 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.
119. Van Leer, B. (1979). Towards the ultimate conservative difference scheme V. A second order sequel to Gadunov' s Method, *J. Comput. Phys.*, Vol. 32, pp: 101-136.
120. Versteeg, H. K., Malalasekera, W., (1995). *An introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, Longman Group Ltd, London.

- 121.** 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.
- 122.** Wells, G. L., Phang, C., Wardman, M., & Whetton, C., (1992). Incident scenarios: their identification and evaluation. *Process Safety Environment*, 70B, pp: 179.
- 123.** www.cham.co.uk : Η ηλεκτρονική διεύθυνση της εταιρεία CHAM Ltd του υπολογιστικού κώδικα ρευστοδυναμικής PHOENICS.
- 124.** Yakhot, V. and Orszag A. S., (1986). Renormalization Group Analysis of Turbulence. I. Basic Theory, *Journal of Scientific Computing*, Vol. 1, No. 1, pp: 3-51.
- 125.** 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.
- 126.** Yakhot, V., Orszag S. A., Thangam, S., Gatski, T. B. and Speziale C. G., (1992). Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique, *Phys. Fluids A* 4 (7), July, pp: 1510-1520.
- 127.** Yokoi, S., (1960). Study on the prevention of fire-spread caused by hot upward current. BRI Report, June.
- 128.** You, H. J., Faeth, G. M., (1982). Turbulent combustion: buoyant axisymmetric turbulent diffusion flames in still air. *Combust. Flame*, 44, pp: 261.
- 129.** Zukoski, E. E., Kubota, T., Cetegen B. M., (1980). Entrainment in fire plumes. *Fire Safety J.*, 81, 3, pp: 107-121.
- 130.** Zukoski, E., E., (1995). Properties of fire plumes. In: Cox, G., editor, *Combustion fundamentals of fire*. San Diego: Academic Press, pp: 34.
- 131.** 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.
- 132.** Γεωργιάδου, Εύη, (2001). Βιομηχανικά Ατυχήματα Μεγάλης Έκτασης, Μεθοδολογικός & Πληροφοριακός Οδηγός, 1^η Έκδοση, Ελληνικό Ινστιτούτο Υγιεινής και Ασφάλειας της Εργασίας, Αθήνα.
- 133.** Δαΐκου, Α., Δοντάς, Σ., (2003). Αγγλοελληνικό – Ελληνοαγγλικό Λεξιλόγιο Όρων Βιομηχανικής Υγιεινής & Ασφάλειας, ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε., Αθήνα.

- 134.** Δοντάς, Σ., (2001). Επικίνδυνες Χημικές Ουσίες και Βιομηχανικά Ατυχήματα Μεγάλης Έκτασης (BAME), ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε., Αθήνα.
- 135.** 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.
- 136.** Ε.Λ.Δ.Α. (1993). Μελέτη επικινδυνότητας για τις εγκαταστάσεις των Ε.Λ.Δ.Α στον Ασπρόπυργο και Μέγαρα Αττικής, 30 Ιουλίου.
- 137.** Θεióπουλος, Ι. Αναστάσιος, Πλοίαρχος Β' Ε.Ν, (1996). Προχωρημένη εκπαίδευση στην καταπολέμηση της πυρκαγιάς, Εκδόσεις Ναυτικών και Τεχνικών Βιβλίων Εμμανουήλ Ν. Σταυριδάκη, Πειραιάς.
- 138.** Κεφαλάς, Δ., (2004). Μελέτη επιπτώσεων ατυχήματος – Φωτιάς σε υπαίθρια αποθήκη φυτοφαρμάκων, Διπλωματική Εργασία, Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π, Αθήνα.
- 139.** Κουρνώτης Π. Ευστάθιος, (2001). Ανάλυση Επικινδυνότητας Βιομηχανικών Ατυχημάτων – Ανάπτυξη Υπολογιστικών Συστημάτων Διαχείρισης Κρίσεων, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα.
- 140.** Κωνσταντίνου, Μ., Νιβολιανίτου, Ζ., (2003). Στατιστική Ανάλυση «Μεγάλων Ατυχημάτων» Πετροχημικής Βιομηχανίας της Ευρωπαϊκής Βάσης Δεδομένων MARS για την χρονική περίοδο 1985 – 2000, Πρακτικά 4^{ου} Πανελληνίου Επιστημονικού Συνεδρίου Χημικής Μηχανικής, Πάτρα.
- 141.** Κώνστας, Π. Α., (1998). Εφαρμοσμένη Πυρασφάλεια, Αθήνα.
- 142.** Λεμονίδης Ι., (1994). Ειδικές Ομάδες Διάσωσης, Πυρκαϊές, Σεισμοί, Καταστροφές. Εκδόσεις University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
- 143.** 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.
- 144.** Λόης Ε., (1992). Σημειώσεις θεωρίας και τεχνικής της καύσης. Αθήνα, Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα.
- 145.** Μαρκάτος, Χ. Ν. (Ε.Μ.Π), Ζωγράφος, Κ. (Ο.Π.Α), Ζιώμας, Ι. (Α.Π.Θ), (1999). Σχεδιασμός Αντιμετώπισης Τεχνολογικών Ατυχημάτων Μεγάλης Έκτασης στο Θριάσιο Πεδίο, Αθήνα.

146. Μαρκάτος, Χ. Ν. και Ασημακόπουλος Δ., (1995). Υπολογιστική Ρευστοδυναμική, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
147. Μαρκάτος, Χ. Ν., (1988). Υπολογιστική Ρευστομηχανική, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
148. Μαρκάτος, Χ. Ν., (1998). Τυρβώδη Φαινόμενα Μεταφοράς και Μαθηματικά Πρότυπα Προσομοίωσής τους, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π, Αθήνα.
149. Μουσιόπουλος, Ν., (1997). Μοντέλα ποιότητας ατμόσφαιρας σε αστικές περιοχές, Κεφ. 1^ο στα «Μαθηματικά Μοντέλα Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης», Επιμέλεια Μουσιόπουλος Ν., Εκδόσεις Π. Ζήτη & Σία Ο.Ε, Θεσσαλονίκη.
150. Μπαρτζής, Γ. Ι., (1997). Μοντέλα ατμοσφαιρικής διασποράς για ρυθμιστικούς σκοπούς, Κεφ. 2^ο στα «Μαθηματικά Μοντέλα Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης», Επιμέλεια Μουσιόπουλος Ν., Εκδόσεις Π. Ζήτη & Σία Ο.Ε, Θεσσαλονίκη.
151. Μπεργελές, Γ. Χ., (1999). Υπολογιστική Ρευστοδυναμική, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
152. Παπαϊωάννου, Θ. Α., (2002). Μηχανική των Ρευστών, Τόμος ΙΙ, Β' έκδοση, Εκδόσεις Κοράλι, Αθήνα.
153. Πετρόλα, (1997). Μελέτη Ασφάλειας, Τόμος ΙΙ, Αθήνα.
154. Ρήγας, Φ., (2004). Αναγνώριση Κινδύνων. Στις Βιομηχανίες Διεργασιών με χρήση πολυμέσων (multimedia). Λογισμικό Hazard Spotting του ICHEME, ΕΜΠ, Αθήνα.
155. Σελλούντος, Β., Παπαϊωάννου, Γ., Πέρδιος, Στ., Χουσιανάκος, Κ., (1988). Πυρασφάλεια, Εφαρμογές πυροπροστασίας και στοιχεία πυρόσβεσης, Εκδόσεις Φοίβος, Αθήνα.
156. Στουρνάς Σ., Λόης Ε., Ζαννίκος Φ., (2002). Τεχνολογία Καυσίμων και Λιπαντικών. Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα.
157. 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 Ρευστοδυναμικής, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
158. Χαλουλάκου, Α., (2005). Σχεδιασμός Εγκαταστάσεων Αντιρρύπανσης, Επεξεργασία Αιωρούμενων Σωματιδίων και Αερίων Αποβλήτων. Σημειώσεις παραδόσεων, Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα.

- 159.** Χριστόλης, Μ., (1996). Αξιολόγηση Μελετών Ασφαλείας Εγκατάστασης Φυτοφαρμάκων – Μεθοδολογική Προσέγγιση, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – PASADENA (USA)

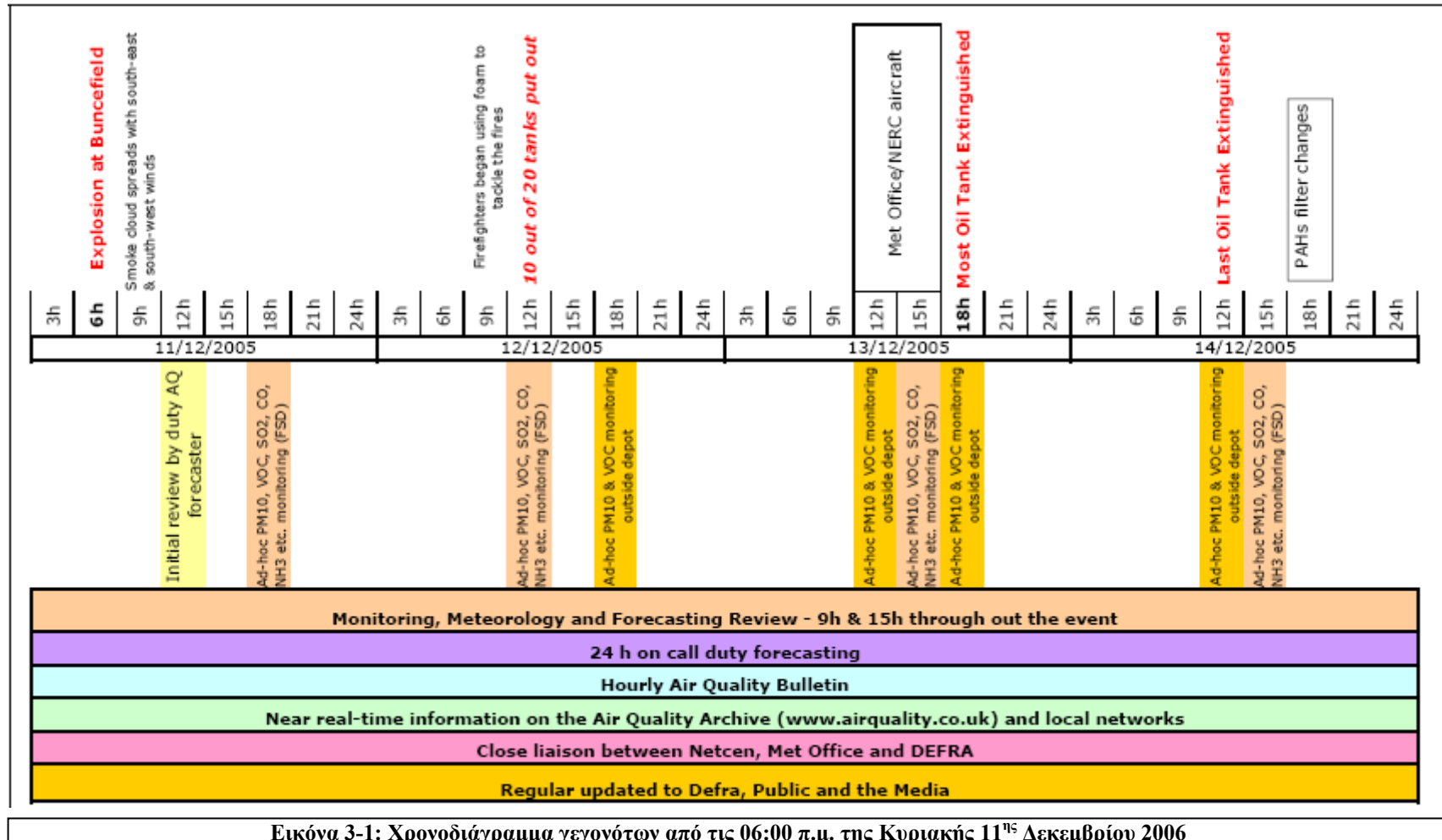


Εικόνα 2-1: Αέρια λήψη των εγκαταστάσεων της Phillips πριν από την έκρηξη (*FEMA technical report, 1998*).



Εικόνα 2-2: Αέρια λήψη των εγκαταστάσεων της εταιρείας Phillips μετά την έκρηξη (*FEMA technical report, 1998*).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - BUNCEFIELD OIL STORAGE DEPOTS (U.K)



Εικόνα 3-1: Χρονοδιάγραμμα γεγονότων από τις 06:00 π.μ. της Κυριακής 11^{ης} Δεκεμβρίου 2006

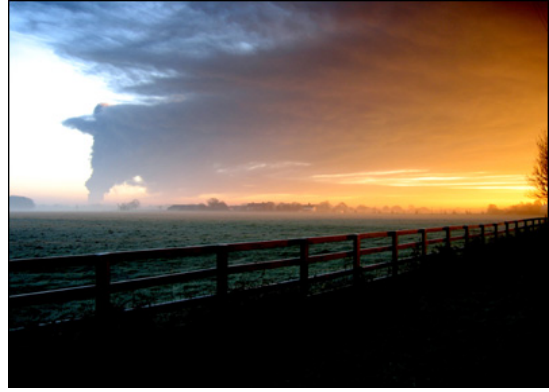


Εικόνα 3-2: Η φωτιά μέσα στις εγκαταστάσεις αποθήκευσης.

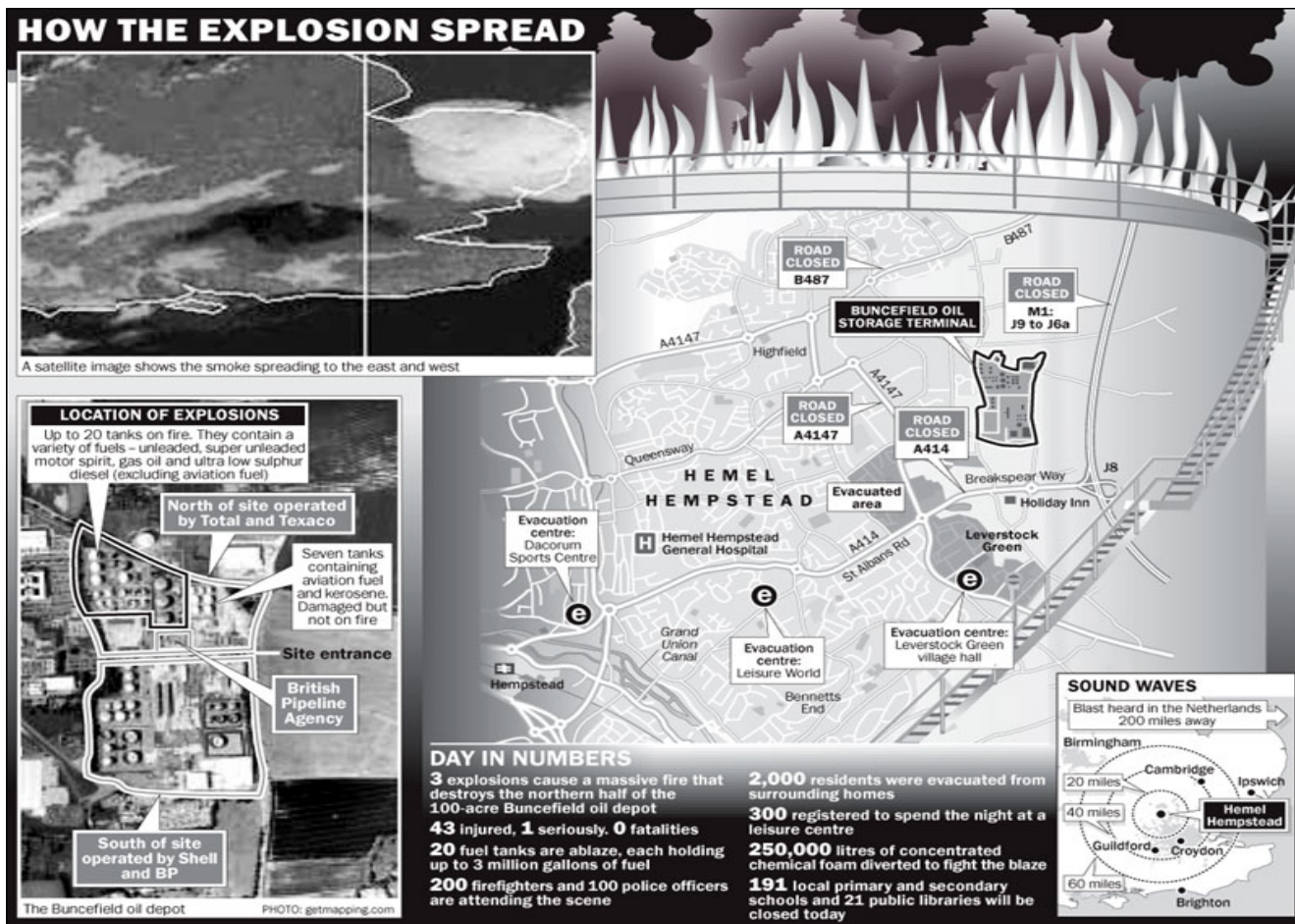


Εικόνα 3-3: Κατεστραμμένες δεξαμενές μετά την φωτιά.

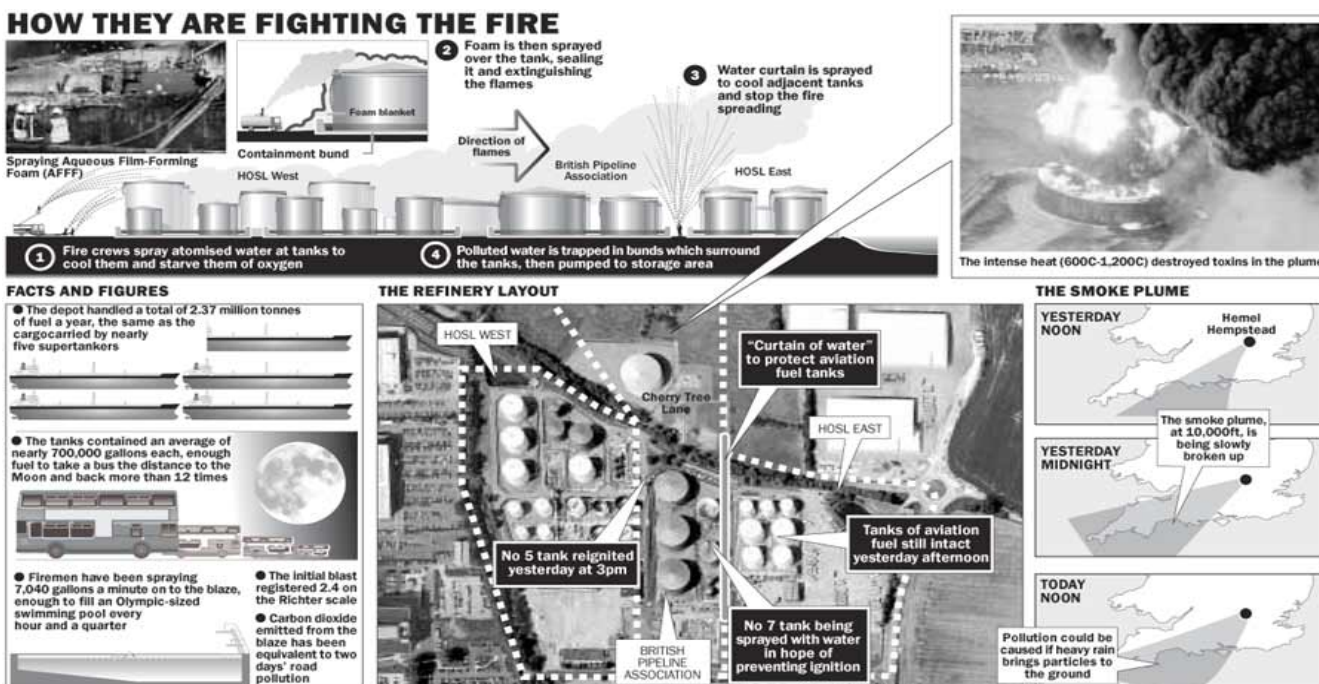
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι



Εικόνες 3-4, 3-5, 3-6, 3-7, 3-8, 3-9, 3-10, 3-11: Απεικονίσεις των πλουμιών, της φωτιάς και των καταστροφών του ατυχήματος. (Πηγή BBC, "The Guardian")



Εικόνα 3-12: Η εξάπλωση της φωτιάς στο χώρο των εγκαταστάσεων.



Εικόνα 3-13: Ο τρόπος αντιμετώπισης και κατάσβεσης της φωτιάς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – JET OIL (ΚΑΛΟΧΩΡΙ, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ)



Εικόνες 3-14, 3-15, 3-16, 3-17, 3-18, 3-19: Οι προσπάθειες κατάσβεσης των εστιών φωτιάς στις εγκαταστάσεις (Πηγή :Αρχηγείο Πυροσβεστικής Υπηρεσίας).

Μοντέλο k~ε

Παρακάτω απεικονίζονται οι εξισώσεις που αποτελούν το πλήρες μοντέλο **k~ε** (*Launder and Spalding, 1974*).

$$\mu_t = \rho l_m k^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II-1})$$

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho v_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = t_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_K} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (\text{II-2})$$

$$l_m = C_D^{-\frac{1}{4}} L_k \quad (\text{II-3})$$

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{II-4})$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho v_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} t_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (\text{II-5})$$

Πίνακας ΙΙ-1: Τιμές των σταθερών του μοντέλου **k~ε** (*Launder and Spalding, 1974*).

$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	C_μ	σ_K	σ_ε
1.44	1.92	0.09	1.0	1.3

Μοντέλο RNG derived k~ε

Παρακάτω απεικονίζονται οι εξισώσεις που αποτελούν το πλήρες μοντέλο **RNG derived k~ε** (*Yakhot and Orszag, 1986; Yakhot and Smith, 1992; Yakhot et al., 1992*).

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho v_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = t_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_K} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (\text{II-6})$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho v_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} t_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - \frac{c_\mu n^3 \left(1 - \frac{n}{n_o} \right)}{1 + \beta_1 n^3} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\text{II-7})$$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

$$n = S \frac{K}{\varepsilon} \quad (\text{II-8})$$

$$S = (2 S_{ij} S_{ij})^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II-9})$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{II-10})$$

$$n_o = \sqrt{\frac{C_{\varepsilon 2} - 1}{C_{\mu} (C_{\varepsilon 1} - 1)}} \quad (\text{II-11})$$

Οι τιμές των σταθερών του **RNG derived k-ε** θα είναι:

Πίνακας ΙΙ-2: Τιμές των σταθερών του μοντέλου RNG derived k ~ ε.

C_{μ}	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{\varepsilon 3}$	n_o	σ_k	σ_{ε}	β_1
0.09	1.42	1.68	$\tanh(v/v)$	4.38	0.719	0.719	0.012

Η μόνη σταθερά του μοντέλου που τροποποιείται και η τιμή της υπολογίζεται από δεδομένα τύρβης κοντά σε τοίχο είναι η β . Οι υπόλοιπες σταθερές ορίζονται από τη μέθοδο RNG (*Renormalization Group*) (*Yakhot and Orszag, 1986; Yakhot and Smith, 1992; Yakhot et al., 1992*).