



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

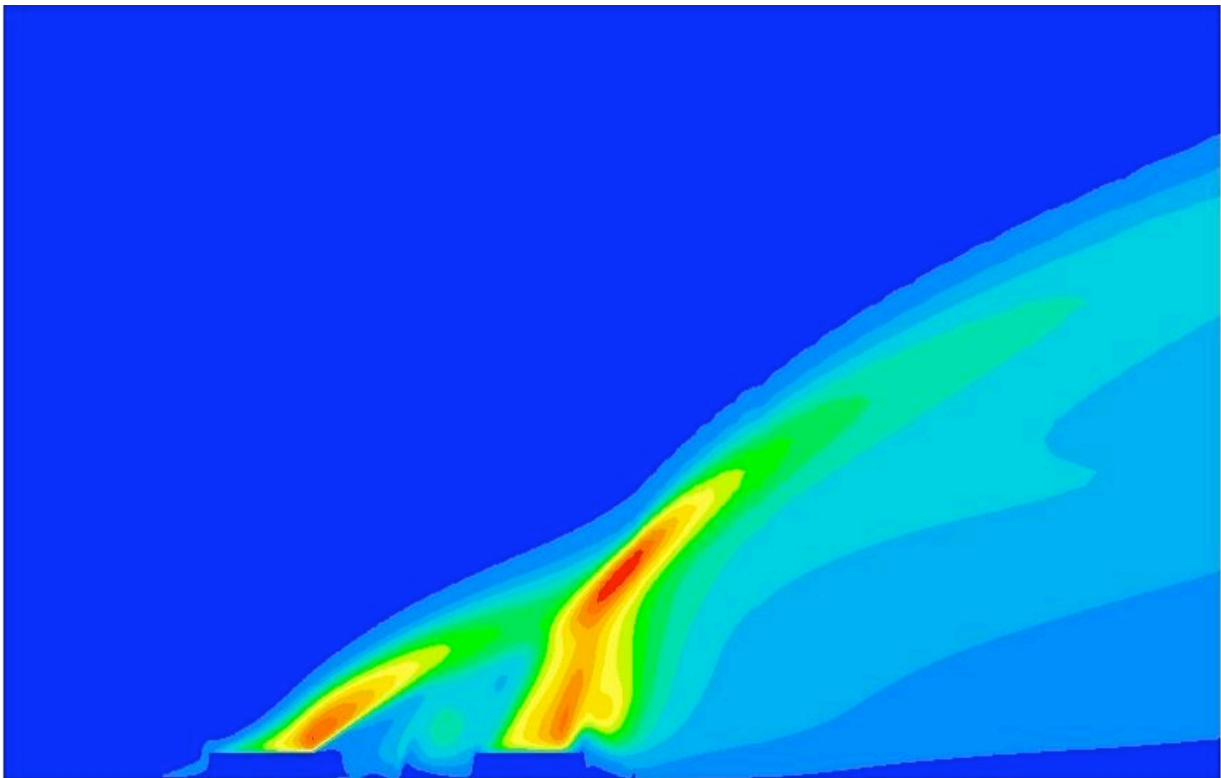
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**Τομέας II: Ανάλυσης, Σχεδιασμού και Ανάπτυξης
Διεργασιών και Συστημάτων**

«Μελέτη και παραμετρική ανάλυση διασποράς τοξικών ρύπων από πυρκαγιά σε δεξαμενές υγρών καυσίμων με χρήση μεθόδων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βασίλειου Ε. Σασιρμάζ



Επιβλέπων Καθηγητής

Α. Κοκόσης, Καθηγητής ΕΜΠ

Συνεπιβλέπων Καθηγητής

Ν.Χ Μαρκάτος, Ομότιμος καθηγητής ΕΜΠ, τέως Πρύτανης

Η φωτογραφία του εξώφυλλου απεικονίζει την κατανομή της κινητικής ενέργειας της τύρβης για την περίπτωση δύο δεξαμενών όπως προσομοιώθηκαν στον εμπορικό κώδικα υπολογιστικής ρευστομηχανικής PHOENICS.

Αντί προλόγου

Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι το αποτέλεσμα και το τελικό μέρος της εκπαιδευτικής μου πορείας στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Πέραν της προσωπικής προσπάθειας που καταβλήθηκε, στην διαμόρφωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας συνετέλεσαν και ορισμένοι άνθρωποι τους οποίους θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα.

Τον Νικόλαο-Χρήστο Μαρκάτο, ομότιμο καθηγητή της σχολής Χημικών Μηχανικών και τέως πρύτανη του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την τιμή που μου έκανε αναλαμβάνοντας ως συνεπιβλέπων καθηγητής την υποστήριξη και καθοδήγηση της διπλωματικής μου εργασίας. Η καθοδήγηση και υποστήριξη του ήταν καθοριστική, ιδιαίτερα σε ένα απαιτητικό επιστημονικό πεδίο όπως αυτό της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής.

Τον Καθηγητή Αντώνη Κοκόση με την τιμή που μου έκανε να αναλάβει ως επιβλέπων καθηγητής, την παρούσα διπλωματική εργασία και τον Αναπληρωτή Καθηγητή Χρήστο Κυρανούδη για την τιμή που μου έκανε να είναι μέλος της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής. Επιπλέον, θα ήθελα να τους ευχαριστήσω και για τις γνώσεις που μου μετέδωσαν μέσα από τα ιδιαίτερα ενδιαφέροντα μαθήματα τους. Τον ερευνητή – Πολιτικό Μηχανικό (Περιβαλλοντολόγο) Μιχαήλ Χριστόλη του οποίου οι συμβουλές, βοήθεια και στήριξη σε θέματα ρευστομηχανικής καθώς και του υπολογιστικού κώδικα ήταν πολύτιμη και πολλές φορές κρίσιμη για την επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας.

Θα ήθελα επιπλέον να ευχαριστήσω τον Δρ. Χημικό Μηχανικό Γιώργο Σταυρακάκη και Δρ. Χημικό Μηχανικό Πάνο Ζέρβα για την φιλία και τις επιστημονικές συμβουλές τους. Την ερευνήτρια στο Ε.ΚΕ.ΦΕ Δημόκριτος, Δρ. Χημικό Μηχανικό Ζωή Νιβολιανίτου για την βοήθεια και στήριξη της. Την Υποψήφια Διδάκτωρ της σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π, Δέσποινα Καραδήμου για την βοήθεια της σε τεχνικά και επιστημονικά θέματα καθώς και για τις φιλικές συμβουλές της. Επίσης, τον Δρ Ναυπηγό-Μηχανολόγο Μηχανικό Ε.Μ.Π, Χρήστο Κοντόβα για την υποστήριξη του, τόσο κατά την διάρκεια όσο και στο τελικό στάδιο συγγραφής της εργασίας.

Θερμότατες και ειλικρινείς ευχαριστίες στον Υποψήφιο Διδάκτωρ του τμήματος Χημικών Μηχανικών του Imperial College of London, απόφοιτο του τμήματος Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π, Χρήστο Δ. Αργυρόπουλο. Η αμέριστη εμπιστοσύνη, βοήθεια, καθοδήγηση και φιλία του που ήταν καθοριστικής σημασίας για την εξέλιξη και ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Η φοίτηση μου στο Ε.Μ.Π δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την στήριξη της οικογένειας και των φίλων μου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω και να αφιερώσω την διπλωματική μου εργασία στην μητέρα μου Αλεξάνδρα, τον πατέρα μου Εμμανουήλ, την αδερφή μου Άννα, και την θεία Ευαγγελία Κονταξή για την συμπαράσταση πριν και κατά την διάρκεια των σπουδών μου αλλά και για όλα όσα μου έχουν προσφέρει μέχρι τώρα.

Την γιαγιά μου, Άννα Μαλαθούνη από την Ίμβρο και τον παππού μου Βασίλειο Μπράχο από την Πρίγκηπο των Πριγκιπονήσων, οι οποίοι «έφυγαν» πρόσφατα από κοντά μας. Χωρίς την στήριξη και ενθάρρυνση τους, η φοίτηση και οι εξω-πανεπιστημιακές δραστηριότητες, τις οποίες πραγματοποίησα και με διαμόρφωσαν σε αυτά τα χρόνια δεν θα ήταν δυνατές.

Τέλος, δε θα μπορούσα να μην εκφράσω τις ευχαριστίες μου και το σεβασμό μου στον Παναγιώτατο Οικουμενικό Πατριάρχη κ.κ. Βαρθολομαίο αφού η όποια βιωματική μας σχέση κατά τα παιδικά μου χρόνια μετουσιώθηκε με τον καιρό σε εσωτερική παρόντρωση να ξεπερνώ τις αντικειμενικές δυσκολίες καθώς και το μέτριο των δυνατοτήτων μου, σε μια πορεία και προσπάθεια να δικαιώσω την εκ Κωνσταντινουπόλεως αλλά και Ίμβρου καταγωγή μου.

Αθήνα, Ιούλιος 2012

Βασίλειος Σασιρμάς

Περιεχόμενα

Λίστα Εικόνων	iii
Λίστα Σχημάτων	v
Λίστα Πινάκων	v
Λίστα Διαγραμμάτων	vi
Περίληψη	viii
Abstract	ix

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Οργάνωση διπλωματικής	1
1.2 Αντικείμενο μελέτης	2
1.3 Βιβλιογραφική επισκόπηση – σχετικές μελέτες	9

Κεφάλαιο 2: Δεξαμενές αποθήκευσης καυσίμων – ατυχήματα πυρκαγιάς σε χώρους αποθήκευσης καυσίμων

2.1 Εισαγωγή	15
2.2 Τύποι δεξαμενών	16
2.2.1 Δεξαμενές σταθερής οροφής	17
2.2.2 Δεξαμενές εξωτερικής πλωτής οροφής	18
2.2.3 Δεξαμενή εσωτερικής πλωτής οροφής	19
2.2.4 Δεξαμενή εξωτερικής πλωτής οροφής καλυμμένη με θόλο	20
2.2.5 Δεξαμενή πίεσης	21
2.3 Αιτίες και μέτρα πρόληψης ατυχημάτων σε ατμοσφαιρικές δεξαμενές αποθήκευσης υγρών καυσίμων	22
2.4 Ανάπτυξη πυρκαγιάς και ταξινόμησή της	24
2.5 Στατιστική ανάλυση ατυχημάτων πυρκαγιάς σε δεξαμενές αποθήκευσης υγρών καυσίμων	25

Κεφάλαιο 3: Σύσταση και δομή ατμόσφαιρας

3.1 Εισαγωγή	29
3.2 Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα	32
3.3 Στατική της ατμόσφαιρας	33
3.4 Κατηγορίες ευστάθειας της ατμόσφαιρας	37

Κεφάλαιο 4 Διασπορά πλουμίου και περιγραφή του φαινομένου

4.1 Εισαγωγή	41
4.2 Περιγραφή του φυσικού φαινομένου	41
4.3 Γεωμετρία προβλήματος – Γεωμετρία πεδίου ροής και δεξαμενών	44
4.3.1 Πεδίο ροής αριθμητικής προσομοίωσης	44
4.3.2 Γεωμετρία πεδίου ροής και δεξαμενών	45
4.3.3 Γεωμετρία όρου πηγής ρύπων – πυρκαγιάς	48

Κεφάλαιο 5: Μαθηματικό υπόβαθρο – μαθηματική προσομοίωση προβλήματος

5.1 Εισαγωγή	51
5.2 Ταξινόμηση διαφορικών εξισώσεων	51
5.3 Γενικευμένη εξίσωση μεταφοράς	55
5.4 Εξισώσεις επίλυσης του φυσικού προβλήματος	55
5.5 Συνοριακές συνθήκες προβλήματος	58
5.6 Μοντελοποίηση της τύρβης	62
5.6.1 Εισαγωγή	62
5.6.2 Συμβατικό μοντέλο δύο διαφορικών εξισώσεων $k\sim\epsilon$	64
5.6.3 Επανακανονικοποιημένο μοντέλο $k\sim\epsilon$ (RNG $k\sim\epsilon$)	68
5.7 Όροι πηγής, θερμότητας και μάζας	69
5.7.1 Υπολογισμός ρυθμού έκλυσης θερμότητας και ρυθμού καύσης καυσίμων	69
5.7.2 Συντελεστές εκπομπών τοξικών ρύπων	71
5.7.2.1 Αργό πετρέλαιο (crude oil)	71
5.7.2.2 Πετρέλαιο Ντήζελ (diesel oil)	72
5.7.2.2 Βενζίνη (Petrol/ Gasoline)	73

Κεφάλαιο 6 Αριθμητική μέθοδος επίλυσης

6.1 Απαιτούμενες ιδιότητες αριθμητικής μεθόδου	75
6.2 Μέθοδος πεπερασμένων όγκων (F.V.M.)	75
6.2.1 Γεωμετρικό πλέγμα μεθόδου – Όγκοι ελέγχου	76
6.2.2 Ολοκληρωτική μορφή εξίσωσης μεταφοράς	78
6.2.3 Διακριτοποίηση	79
6.3 Επίλυση του διακριτοποιημένου αλγεβρικού συστήματος	83
6.4 Αλγόριθμο επίλυσης	84
6.4.1 Αλγόριθμος επίλυσης	84

6.4.2 Σύγκλιση	85
6.4.3 Συντελεστές υποχαλάρωσης	86
6.4.4 Υπολογιστικές παράμετροι και χρόνοι προσομοίωσης	88

Κεφάλαιο 7 Αποτελέσματα – Συζήτηση αποτελεσμάτων

7.1 Εισαγωγή	89
7.2 Απεικόνιση του πεδίου ροής - πρώτη εκτίμηση	91
7.3 Διασπορά των τοξικών ρύπων	94
7.3.2 Τοξικοί ρύποι	94
7.3.3 Διασπορά τοξικών ρύπων στο επίπεδο του εδάφους κατά μήκος του πεδίου ροής	96
7.4 Προσδιορισμός ζωνών κινδύνου	100
7.5 Μέγιστα ύψη ανύψωσης πλουμίου	102
7.6 Τελικά συμπεράσματα	104

Παραρτήματα

I. Μέτρα πρόληψης πυρκαγιών σε δεξαμενές	105
II. Κατανομή της διασποράς των τοξικών ρύπων στο επίπεδο του εδάφους για δεξαμενές ομοίων διαμέτρων και ιδίου τύπου καυσίμου	113

Κεφάλαιο 8 Βιβλιογραφία

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1: Πανοραμική άποψη της εγκατάστασης του Buncefield Oil Storage Terminal	3
Εικόνα 2(α,β,γ,δ,ε,ζ): Στιγμιότυπα του νέφους ατμού	6
Εικόνα 3: Μέρος της εγκατάστασης του Buncefield Oil Storage Terminal κατά την διάρκεια του ατυχήματος.	7
Εικόνα 4: Πανοραμική άποψη της εγκατάστασης Buncefield Oil	8
Εικόνα 5: Δεξαμενή σταθερής οροφής.	17
Εικόνα 6: Δεξαμενή εξωτερικής πλωτής οροφής μονού στρώματος.	18
Εικόνα 7: Δεξαμενή εξωτερική πλωτής οροφής διπλού στρώματος.	19
Εικόνα 8: Δεξαμενή εσωτερικής πλωτής οροφής.	20
Εικόνα 9: Δεξαμενή εξωτερικής πλωτής οροφής καλυμμένη με θόλο.	21
Εικόνα 10: Δεξαμενή πίεσης σφαιρικού σχήματος.	22

Εικόνα 11: Η διαμόρφωση των ατμοσφαιρικών στρωμάτων και της θερμοκρασίας εντός αυτών.	30
Εικόνα 12: Το Α.Ο.Σ και η μεταβολή του κατά την διάρκεια της ημέρας.	32
Εικόνα 13: Ισομετρική απεικόνιση μέρους του πεδίου ροής όπου διακρίνονται οι δύο δεξαμενές.	46
Εικόνα 14: Ισομετρική απεικόνιση της γεωμετρίας των δύο δεξαμενών.	46
Εικόνα 15: Απεικόνιση της πρόσοψης των δύο δεξαμενών καθώς και των περιοχών που έχει διαιρεθεί το πλάτος του πεδίου ροής.	47
Εικόνα 16: Απεικόνιση της πρόσοψης των δύο δεξαμενών καθώς και ο διαχωρισμός σε περιοχές (regions) ως προς το ύψος του πεδίου ροής.	47
Εικόνα 17: Απεικόνιση της πλάγιας όψης των δύο δεξαμενών καθώς και ο διαχωρισμός του πεδίου ροής σε περιοχές (regions).	48
Εικόνα 18: Κάτοψη του σχεδίου της επιφάνειας δεξαμενής που αποτελεί τον όρο πηγής.	49
Εικόνα 19: Κάτοψη της επιφάνειας του όρου πηγής όπως απεικονίζεται μετά την τετραγωνοποίηση.	49
Εικόνα 20: Στοιχειώδης όγκος ελέγχου.	77
Εικόνα 21: Κάτοψη στοιχειώδους όγκου ελέγχου καθώς και τον γειτονικών του κόμβων.	77
Εικόνα 22: Η απεικόνιση των όρων πηγής των δύο δεξαμενών	91
Εικόνα 23 α,β: Κατανομή της ΚΕ στα σενάρια Νο1 και Νο16.	92
Εικόνα 24 α,β: Κατανομή της V1 στα σενάρια Νο 10 και Νο 3.	92
Εικόνα 25 α,β: Κατανομή της W1 στα σενάρια Νο 10 και Νο 3.	92
Εικόνα 26: Κατανομή των διανυσμάτων ταχύτητας στην περιοχή ενδιάμεσα των δύο δεξαμενών	93

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 1: Οι καταστάσεις της ατμόσφαιρας μαζί με ανάλογες παραστάσεις μηχανικής ισορροπίας σφαιριδίου.	34
Σχήμα 2(α,β,γ,δ,ε,): Η κίνηση του πλουμίου-καπνού σε σχέση με την κατηγορία ευστάθειας της ατμόσφαιρας.	35, 36

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1: Αποτελέσματα/ ενδείξεις υπερπίεσης.	5
Πίνακας 2: Υλικό κατάσβεσης ανά κατηγορία πυρκαγιάς.	25
Πίνακας 3: Αριθμός πυρκαγιών ανά δεκαετία.	26
Πίνακας 4: Αιτία ατυχήματος ανά δεκαετία.	27
Πίνακας 5: Είδος ατυχήματος.	27
Πίνακας 6: Κατηγορίες ευστάθειας της ατμόσφαιρας κατά Pasquill.	38
Πίνακας 7: Ταξινόμηση κατηγορίας ευστάθειας κατά Pasquill με βάση τις μετεωρολογικές συνθήκες.	38
Πίνακας 8: Ταξινόμηση κατηγορίας ευστάθειας της ατμόσφαιρας με βάση των αριθμό Richardson και την θερμοβαθμίδα.	39
Πίνακας 9: Διαίρεση του πεδίου ροής ως προς τον άξονα z σε περιοχές καθώς και οι συντελεστές πυκνώσης του πλέγματος στις αντίστοιχες περιοχές.	44
Πίνακας 10: Διαίρεση του πεδίου ροής ως προς τον άξονα y σε περιοχές καθώς και οι συντελεστές πυκνώσης του πλέγματος.	45
Πίνακας 11: Διαίρεση του πεδίου ροής ως προς τον άξονα του x καθώς και οι συντελεστές πυκνώσης του πλέγματος.	45
Πίνακας 12: Ταξινόμηση ροής βάση του βαθμού συμπίεστικότητας του ρευστού.	54
Πίνακας 13: Τιμές σταθερών όρων που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο.	58
Πίνακας 14: Ταξινόμηση μοντέλων περιγραφής τύρβης.	63
Πίνακας 15: Σταθερές κλασικού μοντέλου $k-\epsilon$.	65
Πίνακας 16: Τιμές των συντελεστών της εξίσωσης του υβριδικού σχήματος.	82
Πίνακας 17 : Οι σχέσεις σύμφωνα με τις οποίες καθορίζονται οι τιμές διάχυσης και συναγωγής.	82
Πίνακας 18: Σενάρια- παραμετρικές εφαρμογές.	89
Πίνακας 19: Έκλυσης θερμότητας όρων πηγής των παραμετρικών εφαρμογών.	90
Πίνακας 20: Μέγιστες συγκεντρώσεις ρύπων κατά μήκος του πεδίου ροής.	100
Πίνακας 21: Συγκεντρώσεις ρύπων στο επίπεδο του εδάφους.	101

Λίστα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Συνολικός αριθμός ατυχημάτων που έχουν συμβεί από το 1960 έως και το 2003.	28
Διάγραμμα 2: Συνολικός αριθμός ατυχημάτων σχετιζόμενων με πυρκαγιά και έκρηξη που έχουν συμβεί από το 1960 έως και το 2003.	28
Διάγραμμα 3(α,β,γ): Κατανομή ρύπων για διάμετρο δεξαμενής 70 m κατά μήκος του πεδίου ροής.	97
Διάγραμμα 4(α,β,γ): Κατανομή ρύπων για διάμετρο δεξαμενής 85 m κατά μήκος του πεδίου ροής.	97
Διάγραμμα 5: Κατανομή της κινητικής ενέργειας τύρβης (KE) καθ' ύψος στην απόσταση 1127 m.	98
Διάγραμμα 6: Κατανομή της κινητικής ενέργειας τύρβης (KE) στο επίπεδο του εδάφους.	99
Διάγραμμα 7: Κατανομή του κινηματικού ιξώδους τύρβης (ENUT) στο επίπεδο εδάφους.	99
Διάγραμμα 8: Μέγιστος ύψος ανύψωσης καπνού-πλουμίου για το σενάριο Νο 12	102

Περίληψη

Η πρόληψη αλλά και η μελέτη των επιπτώσεων ενός μεγάλου βιομηχανικού ατυχήματος (B.A.M.E) αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό κομμάτι των σύγχρονων βιομηχανιών και ιδιαίτερος των «εν δυνάμει» επικίνδυνων βιομηχανιών όπως των διυλιστηρίων αλλά και των χώρων αποθήκευσης υγρών καυσίμων. Παρά τις μεγάλες βελτιώσεις που έχουν σημειωθεί τα τελευταία χρόνια στον τομέα της βιομηχανικής ασφάλειας, έχει αποδειχθεί πως δεν είναι αρκετές για την διασφάλιση μηδενικού αριθμού ατυχημάτων. Για τον παραπάνω λόγο δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην όσο δυνατόν καλύτερη και πιο ακριβή πρόβλεψη των επιπτώσεων που μπορεί να έχει ένα τέτοιο συμβάν, τόσο για την μετέπειτα αντιμετώπιση των επιπτώσεων του όσο και για την προστασία του προσωπικού που καλείται για την αντιμετώπιση του. Στην παρούσα διπλωματική εργασία συνεχίζεται η προσπάθεια για περαιτέρω διερεύνηση των επιπτώσεων από την διασπορά τοξικών ρύπων που πραγματοποιήθηκαν από τους Argyropoulos et al., 2006; 2008 καθώς και από τη Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π με την προσθήκη επιπλέον δεξαμενής και με διαφορετικές μετεωρολογικές συνθήκες. Η διερεύνηση του φαινομένου γίνεται με χρήση υπολογιστικών μεθόδων προσομοίωσης και πιο συγκεκριμένα με χρήση μοντέλων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics, CFD). Αναλυτικότερα γίνεται προσομοίωση πυρκαγιάς στην επιφάνεια σε δεξαμενές καυσίμων ύψους 20 m και με διάμετρο 70 m και 85 m για 3 διαφορετικά είδη καυσίμων τα οποία είναι αργό πετρέλαιο, ντίζελ και βενζίνη. Επιπλέον, κάθε δεξαμενή περιβάλλεται σε απόσταση ίση με το ήμισυ της διαμέτρου της από τοίχιο ασφαλείας πάχους 0.5 m και ύψους 4 m. Ως προς τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες στην συγκεκριμένη προσομοίωση η ατμόσφαιρα τέθηκε ως ουδέτερα στρωματοποιημένη ενώ εξετάζονται τα σενάρια για ταχύτητες ανέμου 8 m/s, 10 m/s και 12 m/s. Τέλος το οριακό ατμοσφαιρικό στρώμα (Α.Ο.Σ) έχει ύψος 800 m. Επιπλέον γίνεται καθορισμός των ζωνών ασφαλείας μέσω την κατασκευή διαγραμμάτων διασποράς των τοξικών ρύπων στο επίπεδο εδάφους.

Για την προσομοίωση των παραπάνω σεναρίων έγινε χρήση του εμπορικού κώδικα PHOENICS της εταιρείας CHAM Ltd. Για την διακριτοποίηση του πεδίου ροής ο συγκεκριμένος κώδικας χρησιμοποιεί την μέθοδο των πεπερασμένων όγκων ελέγχου (Finite Volume Method, F.V.M) ενώ για αλγόριθμο επίλυσης χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο σύζευξης πίεσης-ταχύτητας SIMPLEST. Τέλος για την διακριτοποίηση των διαφορικών εξισώσεων γίνεται χρήση του υβριδικού σχήματος. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως σε καμία περίπτωση στις ζώνες ασφαλείας δεν παρατηρούνται τιμές μεγαλύτερες από όρια IDLH και LC₅₀.

Abstract

The prevention and the study of the consequences of an industrial accident constitute an important part of the modern Industry and more precisely of oil refineries and oil storage depots that may be described as infrastructure of high risk. Despite improvements that have been achieved during the recent years in the area of industrial safety it has also been proven it is not enough to generate zero-risk conditions in industry. Hence it is essential that an “as much accurate” prediction of the consequences of an industrial event not only for environmental reasons, but also for the health of the response units that will be called to deal with the event. The purpose of this diploma thesis is to continue the earlier research that was conducted by Argyropoulos et al. 2006; 2008 and the Computational Fluid Dynamic Unit of the school of Chemical Engineering of N.T.U.A, for the dispersion of toxic pollutants from fires in oil tanks. This was accomplished with the further development of the code, with the addition of an extra oil tank in the three – dimensional flow field and by simulating scenarios for different meteorological conditions. More specifically the tanks’ sizes that are simulated are of 70 m and 85 m diameter and height of 20 m. Every oil tank is surrounded with safety bunds, which are 0.5 m width 4 m height and with distance between the outer side of the tank and the inner side of the bund as half of the tank diameter. The fuel types that have been examined are crude oil, diesel oil and gasoline. The prevailing atmospheric conditions that were used for the simulations is neutrally stratified atmosphere with the boundary atmospheric layer reaching the altitude of 800 m, and for wind velocity of 8 m/s, 10 m/s and 12 m/s respectively. Additionally, safety zones have been defined near and around the tanks with the calculation of the ground-level toxic pollutants dispersion that are presented in the form of diagrams.

The above-mentioned scenarios were simulated with the commercial Computational Fluid Dynamic (CFD) code PHOENICS that is distributed from CHAM Ltd. The specific code discretization of the flow field follows the finite volume method (F.V.M) and the hybrid scheme is used for the discretisation of the differential equation. The algorithm for the solution of the algebraic equations that has been used is SIMPLEST. The results indicate than the concentration’s level does not exciding the IDLH and LC₅₀ limits, but the concentration’s limit for STEL and TWA , for specific distances are excided. For the above mentioned reason, is it concluded that, only staff with proper equipment should approach and encounter similar situations.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Οργάνωση διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική έχει οργανωθεί σε 8 κεφάλαια.

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται αναφορά στο αντικείμενο μελέτης και καθώς και εκτενείς ανάλυση του βιομηχανικού ατυχήματος του Buncefield Oil Depot το οποίο και αποτέλεσε την έμπνευση της παρούσας διπλωματικής. Ακολούθως παρατίθενται η βιβλιογραφική επισκόπηση καθώς και η σχετικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί σχετικά με τις διασπορά τοξικών ρύπων αλλά και πυρκαγιών σε δεξαμενές. Επιπλέον γίνεται δήλωση του σκοπού της διπλωματικής εργασίας

Το Κεφάλαιο 2 πραγματεύεται τις εγκαταστάσεις αποθήκευσης καυσίμων και γίνεται αναφορά στους τύπους δεξαμενών που χρησιμοποιούνται. Στην συνέχεια αναλύονται τα αίτια πρόκλησης ατυχημάτων σε δεξαμενές αποθήκευσης καυσίμων και παρατίθενται τα μέτρα πρόληψης τους. Επιπλέον γίνεται μία συνοπτική αναφορά σχετικά με την ανάπτυξη της πυρκαγιάς αλλά και την ταξινόμηση της. Τέλος, παρατίθενται στατιστικά στοιχεία που σχετίζονται με τα ατυχήματα που έχουν καταγραφεί μέχρι και το 2003.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η σύσταση και την δομή της ατμόσφαιρας και γίνεται ανάλυση του Ατμοσφαιρικού Οριακού Στρώματος, της στατικής της ατμόσφαιρας καθώς και στις κατηγορίες ευστάθειας της ατμόσφαιρας.

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται περιγραφή και ανάλυση του φυσικού φαινομένου της παρούσας εργασίας της γεωμετρίας του προβλήματος καθώς και του πεδίου ροής.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται το μαθηματικό υπόβαθρο καθώς και οι εξισώσεις επίλυσης που χρησιμοποιούνται για την μαθηματική προσομοίωση του φυσικού προβλήματος. Αυτό περιλαμβάνει της συνοριακές συνθήκες του προβλήματος, το μοντέλο δύο διαφορικών εξισώσεων, συντελεστές εκπομπών πηγής από τους όρους πηγής, την μοντελοποίηση της τύρβης. Επιπλέον παρουσιάζονται πληροφορίες σχετικά με τα είδη καυσίμων που προσομοιώθηκαν στην παρούσα εργασία.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται οι αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης που χρησιμοποιείται η οποία γίνεται με την μέθοδο των πεπερασμένων όγκων (F.V.M) καθώς και στον αλγόριθμο επίλυσης. Συμπεριλαμβάνονται επίσης οι συντελεστές σύγκλισης και υποχαλάρωσης ενώ γίνεται αναφορά και τις υπολογιστικές παραμέτρους και πόρους που χρησιμοποιήθηκαν.

Στο κεφάλαιο 7 γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων και ανάλυση τους.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 8 παρουσιάζεται η βιβλιογραφική που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

1.2 Αντικείμενο μελέτης

Ο 19ος αιώνας έχει χαρακτηριστεί ως ο αιώνας των σημαντικότερων εφευρέσεων και της βιομηχανικής επανάστασης. Αποτέλεσμα της βιομηχανικής επανάστασης ήταν η δημιουργία της πρώτης βιομηχανικής κοινωνίας στην Αγγλία και εν συνεχεία ακολούθησε η εκβιομηχάνιση των αγροτικών κοινωνιών και στον υπόλοιπο κόσμο.

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

Ο 20ος αιώνας σηματοδεύτηκε από την περαιτέρω χρήση και εφαρμογή νέων τεχνολογιών με άμεσο αντίκτυπο στην αύξηση της βιομηχανικής παραγωγής. Πέρα των παραπάνω ο 20ος αιώνας έγινε γνωστός για την ολοένα και μεγαλύτερη αύξηση της χρήσης των υγρών καυσίμων που στην συντριπτική πλειοψηφία τους είναι προϊόντα της επεξεργασίας του αργού πετρελαίου.

Ως εκ τούτου δημιουργήθηκαν μεγαλύτερες και περισσότερες μονάδες διύλισης και επεξεργασίας πετρελαίου αλλά και χώροι αποθήκευσης των προϊόντων αυτών προκειμένου να καλύπτεται η ολοένα και μεγαλύτερη ζήτηση ενέργειας στην παγκόσμια αγορά. Άμεση συνέπεια της συνεχής ζήτησης για ενέργεια είναι η αύξηση του κινδύνου πρόκλησης Βιομηχανικών Ατυχημάτων Μεγάλης Έκτασης (B.A.M.E). Ο συγκεκριμένος όρος χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει τεχνολογικά ατυχήματα με πολύ σοβαρές συνέπειες τόσο από πλευράς των ανθρώπινων θυμάτων όσο και από πλευράς των επιπτώσεων στο περιβάλλον και τις υλικές ζημιές.

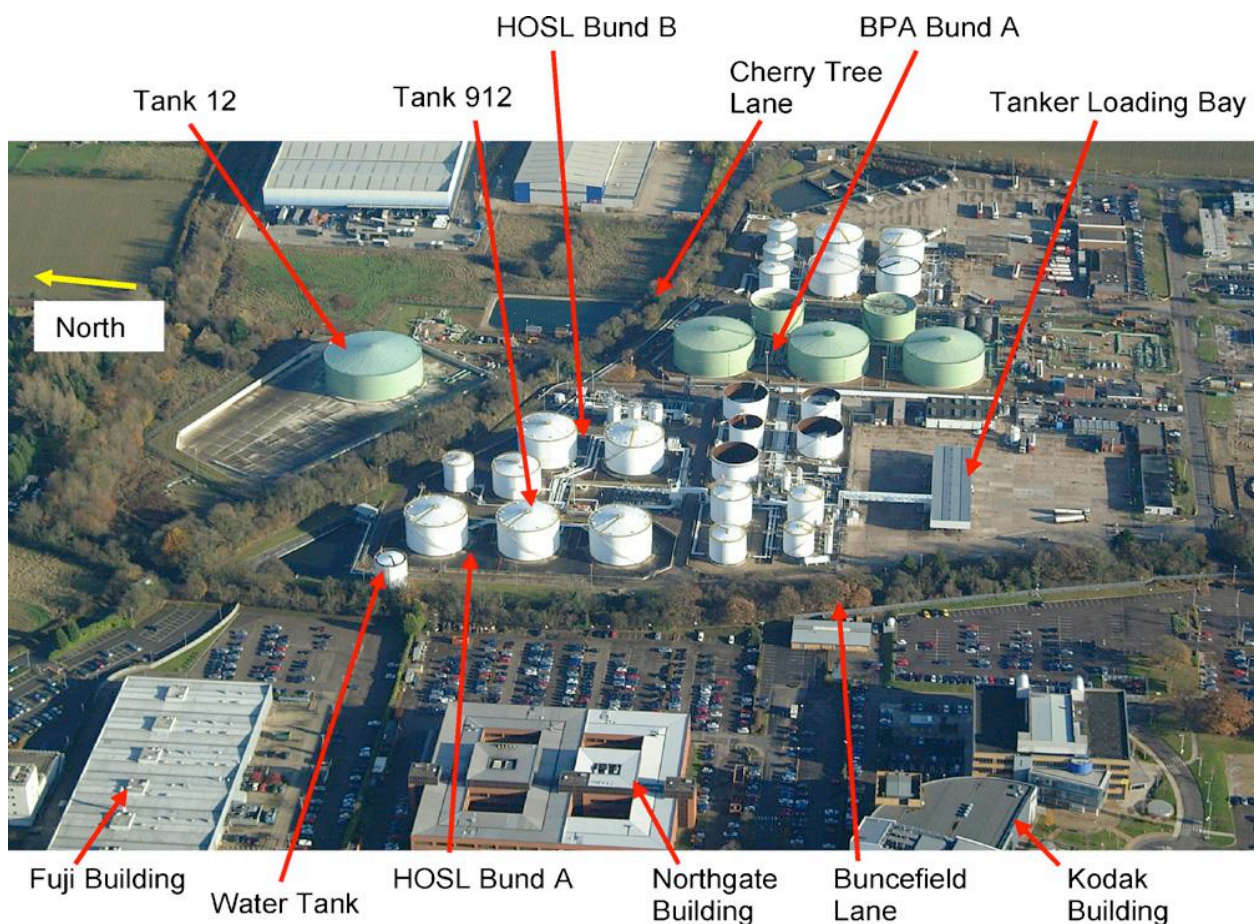
Σύμφωνα με την κοινοτική οδηγία SEVESO I 82/501/EEC ως B.A.M.E ορίζεται ένα γεγονός τέτοιο όπως η διάχυση τοξικών, πυρκαγιά ή η έκρηξη που έχει το χαρακτηριστικό της μεγάλης εκτάσεως, σε συνδυασμό με ανεξέλεγκτη ανάπτυξη μιας βιομηχανικής δραστηριότητας, που να προκαλεί σοβαρό κίνδυνο, άμεσο ή έμμεσο, για τον άνθρωπο, στο εσωτερικό ή στο εξωτερικό της εγκαταστάσεως, ή/και για το περιβάλλον και στην οποία να χρησιμοποιούνται μια ή περισσότερες επικίνδυνες ουσίες.

Η κοινοτική οδηγία SEVESO I, η οποία αντικαταστάθηκε το 1996, από την SEVESO II 96/82/EC, η οποία διατηρώντας το ίδιο πνεύμα, προβαίνει στον καθορισμό των ουσιών που θεωρούνται επικίνδυνες καθώς και στις σχετικές ιδιότητες τους όπως ευφλεκτότητα, εκρηκτικότητα, τοξικότητα κτλ.

Ο κίνδυνος πρόκλησης BAME συνίσταται στην αστοχία ενός ή περισσότερων συστημάτων κανονικής λειτουργίας ή ασφάλειας, σε εγκαταστάσεις που διαχειρίζονται μεγάλες ποσότητες επικίνδυνων ουσιών (εύφλεκτων, εκρηκτικών κ.α.) που θα οδηγήσει σε μεγάλη πυρκαγιά, έκρηξη, απελευθέρωση σημαντικών ποσοτήτων τοξικών ουσιών στην ατμόσφαιρα ή

συνδυασμό αυτών. Οι επιπτώσεις ενός τέτοιου γεγονότος μπορεί να είναι: μεγάλος αριθμός νεκρών (άμεσα ή με καθυστέρηση) και τραυματιών για τους οποίους απαιτείται ειδική νοσοκομειακή περίθαλψη, καταστροφικές επιπτώσεις για το περιβάλλον καθώς και σοβαρές οικονομικές επιπτώσεις. Θα πρέπει να σημειωθεί πως σημαντικό χαρακτηριστικό των BAME, είναι η μεγάλη πιθανότητα για επέκταση των επιπτώσεων και εκτός του χώρου μιας εγκατάστασης και σε ορισμένες περιπτώσεις εκτός των συνόρων μιας χώρας, ενώ για την αντιμετώπισή τους απαιτείται η συνεργασία πολλών ομάδων άμεσης παρέμβασης (τοπικές αρχές, πυροσβεστική υπηρεσία κτλ) (Γεωργιάδου, 2008).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα BAME αλλά και των επιπτώσεων που ενέχει, αποτελεί το ατύχημα που σημειώθηκε στις 11 Δεκεμβρίου του 2005, στο Buncefield Oil Storage Terminal στο Hertfordshire της Αγγλίας και η διάρκειά του οποία ήταν 4 ημέρες. Το Buncefield Oil Storage Terminal αποτελεί το πέμπτο μεγαλύτερο από πλευράς χωρητικότητας (272,765,400 l) τερματικό σταθμό αποθήκευσης καυσίμων στο Ηνωμένο Βασίλειο.



Εικόνα 1: Πανοραμική άποψη της εγκατάστασης πριν το ατύχημα (Gant and Atkinson, 2011).

Η σπουδαιότητα του συγκεκριμένου τερματικού σταθμού, οφείλεται στο γεγονός ότι τροφοδοτεί μεγάλο μέρος της πόλης του Λονδίνου, της νότιο-ανατολικής Αγγλίας καθώς και των αεροδρομίων του Heathrow και Gatwick. Ο συγκεκριμένος σταθμός ξεκίνησε την λειτουργία του το 1968.

Η σειρά των γεγονότων όπως έχουν καταγραφεί από τον Hebert (2010) έχουν συνοψισθεί ως εξής:

- 5:19 πμ, Εκκίνηση υπερχειλίσης μετά την αστοχία του εξισορροποιητή υψηλής στάθμης και του μετρητή στάθμης.
- Αρχική παροχή αντλίας 550 m³/h. Ροή καυσίμου από τις οπές εξαερισμού της δεξαμενής 912.
- 5:53 πμ Αύξηση της ογκομετρικής παροχής της αντλίας στα 890 m³/h.
- 06:00 πμ Αναγνώριση ύπαρξης νέφους ατμού και εκκίνηση εκτάκτων διαδικασιών. Έναρξη λειτουργίας της πυροσβεστικής αντλίας νερού.
- 6:01 πμ Πρώτη μεγάλη έκρηξη.
- Ακολουθούν μικρότερες εκρήξεις και δημιουργούνται πολλαπλές εστίες πυρκαγιάς σε δεξαμενές.
- Η πυρκαγιά καίει για 3 ημέρες πριν τελικώς κατασβησθεί.

Αναλυτικότερα, το ατύχημα σημειώθηκε κατά την διάρκεια πλήρωσης της δεξαμενής υπ' αριθμόν 912 χωρητικότητας περίπου 6 χιλιάδων λίτρων, μετά από αστοχία των συστημάτων συναγερμού που σχετίζονταν με την στάθμη του καυσίμου εντός της δεξαμενής. Άμεσο αποτέλεσμα ήταν υπερχειλίση του περιεχομένου καυσίμου διαμέσου των οπών εξαερισμού (roof vents) που υπάρχουν στην εξωτερική οροφή της δεξαμενής. Το καύσιμο που διέρρευσε από την δεξαμενή συγκεντρώθηκε περιμετρικά των τοιχίων ασφαλείας (bunds). Άμεση συνέπεια της διαρροής καυσίμου από την δεξαμενή ήταν η δημιουργία νέφους ατμού που κατέλαβε επιφάνεια συνολικής έκτασης 80,000 m². Οι ακριβές συνθήκες σχηματισμού του νέφους ατμού καθώς και η σύνθεση του είναι ακόμα και σήμερα υπό επιστημονική διερεύνηση. Θεωρείται πάντως βέβαιο πως σημαντικό ρόλο στην δημιουργία του νέφους, έπαιξε η σύνθεση της συγκεκριμένης παρτίδας του καυσίμου καθώς περιείχε 10% κατ' όγκο βουτάνιο το οποίο σε ατμοσφαιρικές συνθήκες είναι αέριο. Σύμφωνα με τις μελέτες των Atkinson and Cusco (2011) καθώς και των Atkinson et al. (2009) οι πίεσης που αναπτύχθηκαν λόγω της έκρηξης στην περιοχή όπου είχε εξαπλωθεί το νέφος ατμού υπερέβησαν τα 2000 mbar (200 kPa). Προς χάριν σύγκρισης αλλά και κατανόησης του μεγέθους της έκρηξης που προκλήθηκε παρατίθεται ο Πίνακας 1.

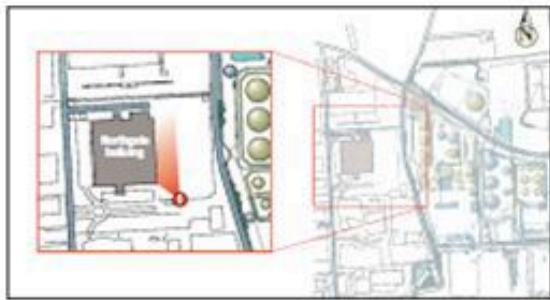
Πίνακας 1: Αποτελέσματα /ενδείξεις υπερπίεσης (Atkinson et al., 2009).

Σπάσιμο γυαλιού	1 kPa (10 millibar)
Ελάσσονες ζημιές σε οικίες	4.8 kPa (48 millibar)
Καταστροφή σε ποσοστό 50 % της πλινθοδομής/ τοιχοποιίας των οικιών	10.7 kPa (170 millibar)
Ρωγμή δεξαμενών αποθήκευσης καυσίμων	34 kPa (340 millibar)
Αναποδογυρισμός έμπορτης αμαξοστοιχίας	62 kPa (620 millibar)
Πιθανή απόλυτη καταστροφή κτιρίων	69 kPa (690 millibar)

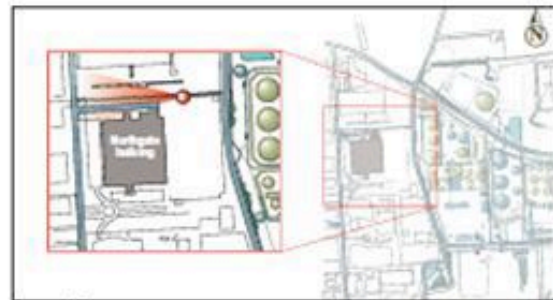
Κατά τις αναφορές μαρτύρων ο ήχος που προηγήθηκε της έκρηξης περιγράφηκε ως «ήχος jet κινητήρα», «πολύ δυνατό ήχο τριξίματος» ενώ απουσιάζει η αναφορά ήχου που να παραπέμπει σε διακριτό ήχο έκρηξης. Τα παραπάνω δεδομένα οδηγούν στο συμπέρασμα πως η διάρκεια της έκρηξης ήταν τουλάχιστον 500-1000 ms και πως η καύση του νέφους ατμού έγινε με σταδιακή κατάκαυση. Αυτό επιβεβαιώνεται και από αυτόπτες μάρτυρες που όλοι περιέγραψαν μια σταθερή εξέλιξη της πυρκαγιάς σε αντίθεση με τα στάδια που αναμένονται σε αυτές τις περιπτώσεις, όπως η εξάπλωση της φλόγας σε σχετικά μικρή έκταση και με σχετικά μικρή ταχύτητα, ακολουθούμενη από αύξηση της ταχύτητας κατά μία τάξη και την δημιουργία λάμψης. Με τα υπάρχοντα δεδομένα που υπάρχουν από τις κάμερες του κλειστού κυκλώματος παρακολούθησης (CCTV) (Εικόνα 2) και με ανάλυση της διαφοράς μεταξύ της εμφάνισης της λάμψης και της άφιξης του κρουστικού κύματος επιβεβαιώνουν τις πρώτες μαρτυρίες καθώς παρατηρείται μια σταθερή αύξηση της κρουστικής πίεσης για μια περίοδο 500 – 700 ms. Επιπλέον, επαληθεύεται και πως υπήρξε σταδιακή κατάκαυση αφού σε αυτή την περίπτωση το ασθενές κρουστικό κύμα των πρώτων σταδίων της έκρηξης προπορεύονται της φλόγας ενώ τα ισχυρότερα κρουστικά κύματα τα οποία προέρχονται από την μετέπειτα καύση του νέφους καταφθάνουν αργότερα. Η σταδιακή κατάκαυση που λάμβανε χώρα, είχε ως αποτέλεσμα την ταχεία εξάπλωση της φλόγας (με ταυτόχρονη δημιουργία υψηλών τοπικών υπερπίεσεων) με παύσης. Σε κάθε περίπτωση πάντως η μέση ταχύτητα εξάπλωσης της φλόγας ήταν υποηχητική (~ 150 m/s).

Αποτέλεσμα της πρώτης μεγάλης έκρηξης, που όπως αναφέρθηκε νωρίτερα θεωρείται πως ξεκίνησε από σπινθήρα στην περιοχή του αντλιοστασίου, ήταν η πρόκληση μεγάλης πυρκαγιάς καθώς και η μετάδοση της σε 20 παρακείμενες δεξαμενές καυσίμων, οι φλόγες των οποίων σε μερικές περιπτώσεις έφταναν τα 30 m ύψος. Λόγω της έκτασης του ατυχήματος οι τοπικές αρχές

εκκένωσαν 2000 κατοίκους της γειτονικής περιοχής και έκλεισαν προσωρινά την κυκλοφορία του αυτοκινητοδρόμου M1. Για την κατάσβεση της πυρκαγιάς απασχολήθηκαν συνολικά 1000 πυροσβέστες ενισχυμένοι επικουρικά με αστυνομικές δυνάμεις. Για την κατάσβεση της πυρκαγιάς χρησιμοποιήθηκαν 750,000 l ειδικού συμπυκνώματος αφρού και 55,000,000 l νερού.



2 α



2 β



2 γ



2 δ



2 ε



2 ζ



2 η



2 θ

Εικόνα 2: Στιγμιότυπα του νέφους ατμού που είχε σχηματισθεί όπως αποτυπώθηκε από τις κάμερες του κλειστού κυκλώματος παρακολούθησης CCTV (Πηγή: Buncefield Major Incident Investigation Board, 2008).

Ο απολογισμός του ατυχήματος (Εικόνες 3 και 4) ήταν 43 μη σοβαρά τραυματίες, μεγάλης έκτασης καταστροφές σε εγκαταστάσεις της γύρω περιοχής και κόστος επαναλειτουργίας του τερματικού σταθμού που υπολογίστηκε γύρω στα 894 εκατομμύρια λίρες Ηνωμένου Βασιλείου. Ο μικρός αριθμός θυμάτων σε ένα τόσο μεγάλο βιομηχανικό ατύχημα και πυρκαγιά (που έχει χαρακτηριστεί και ως η χειρότερη στην ιστορία του Ηνωμένου Βασιλείου μετά τον Β' παγκόσμιο πόλεμο) οφείλεται στο γεγονός ότι έγινε ημέρα Κυριακή. Ως αποτέλεσμα στην ευρύτερη περιοχή δεν ευρίσκονταν μεγάλος αριθμός ανθρώπων. Θα πρέπει να σημειωθεί πώς λόγω των μετεωρολογικών συνθηκών (κατεύθυνση των ανέμων αλλά και δομή της ατμόσφαιρας) που επικρατούσαν κατά την διάρκεια της πυρκαγιάς απέτρεψαν την ρύπανση με τοξικούς ρύπους της ευρύτερης περιοχής καθώς και της νοτιοδυτικής Αγγλίας



Εικόνα 3: Μέρος της εγκατάστασης του Buncefield Oil Storage Terminal κατά την διάρκεια του ατυχήματος © Chiltern Air Support.



Εικόνα 4: Πανοραμική άποψη της εγκατάστασης Buncefield Oil Storage Terminal μετά το ατύχημα. Σε κόκκινο κύκλο διακρίνεται η δεξαμενή No 912 από όπου υπήρξε η υπερχειλίση καυσίμου. © Chiltern Air Support.

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η περαιτέρω μελέτη του φαινομένου της διασποράς τοξικών ρύπων από πυρκαγιά σε δεξαμενές καυσίμων και αποτελεί συνέχεια των προηγούμενων προσπαθειών των Argyropoulos et al. (2006; 2008). Πιο συγκεκριμένα η παρούσα εργασία εστιάζεται στα παρακάτω:

1. Παραμετρική ανάλυση διαφορετικών σεναρίων (συνδυασμός διαφορετικών μεγεθών δεξαμενών, υγρά καύσιμα, μετεωρολογικές συνθήκες) για την μελέτη του φαινομένου και συγκέντρωσης, με τον υφιστάμενο υπολογιστικό κώδικα που έχει αναπτυχθεί στην Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π από τους Argyropoulos et al. (2010).
2. Επιπλέον ανάπτυξη του υφιστάμενου υπολογιστικού κώδικα για την προσομοίωση και μελέτη του φαινομένου σε παραπάνω από μία δεξαμενή (Tank Farm).
3. Μελέτη των επιπτώσεων και καθορισμός ζωνών επικινδυνότητας.

1.3 Βιβλιογραφική επισκόπηση – σχετικές μελέτες

Η διασπορά τοξικών ρύπων καθώς και η εξιχνίαση και κατανόηση του φαινομένου συνεχίζει να αποτελεί πρόκληση για την επιστημονική κοινότητα. Η πολυπλοκότητα του έγκειται στο γεγονός ότι κατά την διάρκεια της ανάπτυξής του, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Παράγοντες όπως, τα χαρακτηριστικά της φωτιάς (γεωμετρία, καύσιμη ύλη κτλ), επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες, ατμοσφαιρικές συνθήκες καθώς και το γεωγραφικό ανάγλυφο της περιοχής. Παράλληλα, προσπάθειες έχουν γίνει για την προσομοίωση διασποράς του πλουμίου που βασίζεται κυρίως σε εμπειρικές παρατηρήσεις και διαστατική ανάλυση, που όμως άρχισε να κερδίζει έδαφος τα τελευταία χρόνια λόγω της μεγάλης υπολογιστικής ισχύς που απαιτείται.

Τα διαθέσιμα μοντέλα για την περιγραφή πυρκαγιάς-πλουμίου ταξινομούνται σε δύο κύριες κατηγορίες, των χωρικών ή αλλιώς μοντέλων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής και των ημιεμπειρικών. Εκτεταμένη έρευνα σχετικά με τα χωρικά μοντέλα έχει πραγματοποιηθεί από πλήθος ερευνητών (Turner, 1985; Carter, 1989; Wilson, 1993; Zonato et al., 1993; Fisher et al., 2001). Το κύριο χαρακτηριστικό των παραπάνω μοντέλων είναι η χρήση Γκαουσιανής κατανομής, η οποία όμως παρουσιάζει αδυναμία, στην αποτύπωση του πλουμίου όταν η αλληλεπίδραση μεταξύ των περιοχών είναι έντονη. Τα ημιεμπειρικά μοντέλα βασίζονται στις διαφορικές εξισώσεις κίνησης και μεταφοράς μάζας/ θερμότητας και έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς από πολλούς ερευνητές. Το μειονέκτημα των ημιεμπειρικών μοντέλων, βρίσκεται στο γεγονός ότι αφενός, απαιτούν μεγάλους υπολογιστικούς χρόνους με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η άμεση εφαρμογή τους σε πραγματικούς χρόνους, αφετέρου τα αποτελέσματα αυτών να μην είναι 100% αξιόπιστα.

Η πρώτη προσπάθεια για τη προσπάθεια προσομοίωσης πυρκαγιών με χρήση μοντέλων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής έγινε από τους Markatos et al. (1982), ενώ οι Ghoniem et al. (1993) και Zhang & Ghoniem (1993,1994a,b) παρουσίασαν Λαγκρανζιανές αριθμητικές τεχνικές για την επίλυση των εξισώσεων, βασιζόμενοι στη μέθοδο των δινών (vortex method) για διαφορετικές καταστάσεις στρωματοποιημένης ατμόσφαιρας.

Πιο συγκεκριμένα, οι Ghoniem et al. (1993) ανέπτυξαν ένα πρότυπο μοντέλο με σκοπό την προσομοίωση της διασποράς αλλά και της απόθεσης πλουμίου από μεγάλες πυρκαγιές σε ομογενή ατμόσφαιρα. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην περιγραφή της καθοδικής τροχιάς του πλουμίου καπνού καθοδηγούμενο από πλευρικό άνεμο, καθώς και τις διασπορά του στο έδαφος. Αργότερα οι Zhang & Ghoniem (1993; 1994a; 1994b) προχώρησαν στην ανάπτυξη ενός πολυδιάστατου αριθμητικού μοντέλου, με σκοπό την περιγραφή της ανύψωσης και διασποράς πλουμίου καπνού σε ουδέτερα στρωματοποιημένη ατμόσφαιρα. Για την επίλυση των εξισώσεων που διέπουν το φαινόμενο έγινε χρήση Λαγκρανζιανών τεχνικών, βασισμένων στην μέθοδο των δινών (vortex

method). Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι είναι δυνατό να γίνει πρόβλεψη της τροχιάς του πλουμίου καθώς και της διασποράς των σωματιδίων του. Επίσης κατέληξαν στο συμπέρασμα πως το πλούμιο ακολουθεί τρία χαρακτηριστικά στάδια τα οποία είναι: i) σύντομη επιτάχυνση ii) στάδιο σχηματισμού 2 μεγάλων δινών, και iii) στάδιο αποσύνθεσης του πλουμίου. Το 1996 οι McGrattan et al. (1996) προχώρησαν σε αριθμητική προσομοίωση της ανύψωσης του πλουμίου καπνού από μεγάλης κλίμακας πυρκαγιές. Κάνοντας χρήση του μοντέλου LES (Large Eddy Simulation) σε συνδυασμό με Λαγκρανζιανές τεχνικές για την προσομοίωση των σωματιδίων καπνού, προχώρησαν σε σύγκριση των αποτελεσμάτων με δύο μεγάλης κλίμακας πυρκαγιές, που πραγματοποιήθηκαν στο Newfoundland το 1993 και στο Prudhoe Bay της Αλάσκας το 1994. Πιο συγκεκριμένα το πείραμα στο Newfoundland, πραγματοποιήθηκε υπό την αιγίδα της Καναδικής υπηρεσίας περιβάλλοντος σε συνεργασία με περιβαλλοντικές υπηρεσίες από τις Η.Π.Α και την Ευρώπη. Σκοπός του πειράματος ήταν η μελέτη της καύσης μεγάλων ποσοτήτων αργού πετρελαίου σε ανοιχτή θαλάσσια έκταση καθώς και η μελέτη των παραγόμενων ρύπων από την πυρκαγιά. Το πείραμα που πραγματοποιήθηκε στο Prudhoe Bay, έγινε από την ACS (Alaska Clean Seas) περιελάμβανε 3 πυρκαγιές μεσαίας έκτασης. Σκοπός του πειράματος ήταν η μελέτη της δυνατότητας καύσης γαλακτώματος πετρελαίου. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων έδειξε πως το μοντέλο ανταποκρίνεται ικανοποιητικά για την ενδιάμεση περιοχή κατάντη από την πηγή της πυρκαγιάς, η οποία εκτείνεται λίγες δεκάδες μέτρα από τη φωτιά και εκτείνεται σε λίγες δεκάδες χιλιόμετρα. Αυτό γίνεται λόγω του ότι κοντά στην πυρκαγιά η προσέγγιση Boussinesq δεν είναι έγκυρη, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών και της έντονης ακτινοβολίας που αναπτύσσονται στην πηγή. Επίσης σε μεγάλες αποστάσεις, το ανάγλυφο του εδάφους και οι μετεωρολογικές συνθήκες παίζουν καθοριστικό ρόλο με αποτέλεσμα αρκετές από της παραδοχές, πάνω στις οποίες στηρίζεται το μοντέλο, να παύουν να ισχύουν.

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

Το ίδιο έτος οι Baum & Mc Grattan (1999) κάνοντας χρήση της ίδιας μεθοδολογίας με τους McGrattan et al. (1996) ανέπτυξαν μεθοδολογία για την προσομοίωση μεγάλων βιομηχανικών πυρκαγιών σε υπαίθριο περιβάλλον για στρωματοποιημένη ατμόσφαιρα. Τα σενάρια που θεώρησαν αφορούσαν πυρκαγιά στην οροφή της δεξαμενής και πυρκαγιά περιμετρικά της δεξαμενής, εντός των περιοριστικών τοιχίων. Το παραπάνω μοντέλο αναπτύχθηκε με σκοπό να μελετηθεί η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία στις παρακείμενες δεξαμενές.

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

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

Οι Vautard et al. (2007) κάνοντας χρήση των αριθμητικών μοντέλων ALOFT-FT και CHIMERE προχώρησαν στην προσομοίωση της διασποράς ρύπων από την πυρκαγιά στο Buncefield Oil Depot (2005) για τις τότε επικρατούσες συνθήκες καθώς. Επιπλέον προχώρησαν στην προσομοίωση της διασποράς ρύπων για την ίδια πυρκαγιά αλλά για διαφορετική εποχή του χρόνου καθώς το δυστύχημα. Τα αποτελέσματα τους ήρθαν σε πολύ καλή συμφωνία με τα δεδομένα των μετρήσεων που πραγματοποιούνταν κατά την διάρκεια της πυρκαγιάς από την UK's Automatic Urban and Rural Network (AURN) καθώς και την Met Office and Natural Environment Research Council (NERC). Πιο συγκεκριμένα έδειξαν πως το πλούμιο δεν έφτασε

στο επίπεδο του εδάφους αλλά διαπέρασε το λεπτό οριακό ατμοσφαιρικό στρώμα και διαχύθηκε στην τροπόσφαιρα, γεγονός που οφείλεται στην έντασης της πυρκαγιάς αλλά και στις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούσαν. Στην περίπτωση που πυρκαγιά είχε πραγματοποιηθεί σε ατμοσφαιρικές και καιρικές συνθήκες που επικρατούσαν στην περιοχή τις θερμότερες ημέρες του Αύγουστο του 2003, όπου το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα μεγαλύτερο αλλά και πιο συνεκτικό, οι επιπτώσεις στην περιοχή θα ήταν μεγαλύτερες.

Το 2008 οι Argyropoulos et al. (2008a; 2008b) ανέπτυξαν μεθοδολογία, για την αριθμητική προσομοίωση της συμπεριφοράς του πλουμίου και της διασποράς τοξικών ρύπων (καπνός, SO₂, CO) από δεξαμενές καυσίμων σε κατάσταση πυρκαγιάς. Η ανάπτυξη της μεθόδου στηρίζεται στο μοντέλο δύο διαφορικών εξισώσεων RNG $k-\epsilon$. Ταυτόχρονα, έγινε προσπάθεια καθορισμού ζωνών επικινδυνότητας σε συνάρτηση με τις συγκεντρώσεις ρύπων κοντά στο έδαφος, που υπολογίστηκαν από την αριθμητική προσομοίωση. Η θέσπιση των ζωνών επικινδυνότητας παίζει καθοριστικό ρόλο για την ασφάλεια του προσωπικού (π.χ. πυροσβέστες), που θα αντιμετωπίσει την πυρκαγιά, αλλά και των κατοίκων που κατοικούν σε γειτονικές περιοχές από το ατύχημα. Τέλος, είναι σημαντικό να ειπωθεί ότι οι συγκεντρώσεις τοξικών ρύπων (SO₂, CO), που υπολογίστηκαν με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία δεν χαρακτηρίστηκαν ως «δόσεις θανατηφόρας επίπτωσης». Εν συνεχεία οι Markatos et al. (2009) χρησιμοποιώντας το αριθμητικό μοντέλο των Argyropoulos et al. (2008a, 2008b) προχώρησαν στην περαιτέρω ανάπτυξη του συμπεριλαμβάνοντας και τις επιδράσεις της θερμικής ακτινοβολίας από πυρκαγιά. Πιο συγκεκριμένα οι αριθμητικές προσομοιώσεις έγιναν με την χρήση ανώτερων σχημάτων διακριτοποίησης δεύτερης τάξης ακρίβειας για τους όρους συναγωγής (MUSCL και CUPID), και με την υιοθέτηση διακριτού μοντέλου θερμική ακτινοβολίας. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά των Argyropoulos et al. (2008a, 2008b) δεν διαφέρουν πάνω από 7-8% , με μέγιστη απόκλιση 10 % για την ενθαλπία.

Επιπλέον, οι Argyropoulos et al. (2009) βασιζόμενοι στις προηγούμενες εργασίες, προχώρησαν στην περαιτέρω ανάπτυξη και ολοκλήρωσης του μοντέλου. Στόχος τους ήταν ο υπολογισμός της ανύψωσης του πλουμίου καπνού καθώς και ο υπολογισμός των τοξικών ρύπων όπως καπνός, SO₂, CO, PAHs και VOCs στο επίπεδο του εδάφους. Συνολικά εξετάστηκαν εφτά διαφορετικά σενάρια για διαφορετικούς τύπους καυσίμων (κηροζίνη, αργό και ντήζελ) και για ταχύτητες ανέμου (8, 10 και 12 m/s), για την μέγεθος δεξαμενής όμοιο με την δεξαμενή No 12, του ατυχήματος στο Buncefield Oil Depot. Επιπλέον προχώρησαν στην σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με δεδομένα για την ανύψωση του πλουμίου καπνού από εμπειρικά μοντέλα της έρευνας των Fisher et al. (2001). Τέλος οι συγκεντρώσεις των τοξικών ρύπων συγκρίθηκαν με τα υπάρχοντα όρια ασφαλείας (IDLH).

Το 2009 οι B.J Devenish και J.M Edwards προχώρησαν σε ανάπτυξη μοντέλου για την προσομοίωση του καπνού πλουμίου που δημιουργήθηκε κατά την διάρκεια της μεγάλης πυρκαγιάς στο Buncefield Oil Depot το 2005 και στην σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις υπάρχουσες μετρήσεις. Σκοπός τους ήταν η αξιολόγηση του μοντέλου LES (Large Eddy Simulation) για την αναπαραγωγή των χαρακτηριστικών του παραγόμενου πλουμίου. Επιπλέον μελέτησαν την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας καθώς και της ατμοσφαιρικής υγρασίας στην δομή αλλά και την ανάπτυξη του φαινομένου. Τα αποτελέσματα τους έδειξαν πως είναι δυνατή η χρήση του μοντέλου LES, εφόσον η προσέγγιση δεν αφορά περιοχές πολύ κοντά στην πηγή όπου οι δυνάμεις της άνωσης είναι πολύ μεγάλες. Πιο συγκεκριμένα κατέληξαν πως η ατμοσφαιρική υγρασία επιδρά στην αύξηση της άνωσης το οποίο και οδηγεί στην επακόλουθη αύξηση του ύψους/επιπέδου όπου εμφανίζεται ουδέτερη άνωση. Η ηλιακή ακτινοβολία παρουσιάζει μικρή επίδραση στον καθορισμό του μεγίστου ύψους του πλουμίου, παρόλα αυτά σε μεγάλες αποστάσεις από την πηγή διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην εγκάρσια διασπορά του πλουμίου. Ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζεται εξαρτάται από την συγκέντρωση των σωματιδίων καπνού. Επιπροσθέτως προχώρησαν και σε διερεύνηση του ατυχήματος σε περίπτωση που είχε συμβεί κάτω από διαφορετικές ατμοσφαιρικές συνθήκες ή σε διαφορετική περίοδο της ημέρας. Σύμφωνα με τα ευρήματα τους, εάν η έκρηξη είχε συμβεί τις νυχτερινές ώρες θα υπήρχε, ενδεχομένως, μικρή μείωση στο μέγιστο ύψος του πλουμίου λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας. Ενώ εάν είχε συμβεί σε θερινούς μήνες, η ηλιακή ακτινοβολία θα ενίσχυε τις ανωστικές δυνάμεις με αποτέλεσμα το πλούμιο να έφτανε σε μεγαλύτερο ύψος.

Argyropoulos et al (2010) εφαρμόζοντας την ίδια μεθοδολογία με τους Argyropoulos et al (2009) κάνοντας χρήση του ίδιου μαθηματικού μοντέλου, προχώρησαν στην παραμετρική ανάλυση 18 διαφορετικών σεναρίων διασποράς τοξικών ρύπων στο έδαφος από πυρκαγιές σε δεξαμενή, στην δημιουργία αδιάστατων νομογραφημάτων καθώς και στον καθορισμό ζωνών ασφαλείας πλησίον αλλά και πέρα των δεξαμενών. Οι προσομοιώσεις αφορούσαν παραμετρικά σενάρια για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου (8, 10 και 12 m/s) καθώς και διαφορετικές διαστάσεις δεξαμενών (50, 70 και 85 m).

Τέλος, οι Gant και Atkinson (2011) προχώρησαν στην μελέτη της διάχυσης και διασποράς εύφλεκτου ατμού που σχηματίστηκε από την διαρροή του υγρού καυσίμου από την δεξαμενή και που οδήγησε στην δημιουργία την έκρηξης. Πιο συγκεκριμένα προχώρησαν στην ανάλυση των στιγμιότυπων που καταγράφηκαν από τις κάμερες κλειστού κυκλώματος παρακολούθησης (CCTV) και προχώρησαν στην προσομοίωση του φαινομένου με χρήση υπολογιστικών μεθόδων ρευστομηχανικής (CFD).

Κεφάλαιο 2: Δεξαμενές αποθήκευσης καυσίμων – ατυχήματα πυρκαγιάς σε χώρους αποθήκευσης υγρών καυσίμων

2.1 Εισαγωγή

Οι δεξαμενές αποθήκευσης χημικών ενώσεων και καυσίμων αποτελούν σημαντικό κομμάτι των σύγχρονων βιομηχανιών όπως διυλιστήρια, βιομηχανίες παραγωγής χημικών και πετροχημικών προϊόντων καθώς και για άλλες εγκαταστάσεις όπως λιμένες και αεροδρόμια. Η σπουδαιότητα τους έγκειται στο γεγονός πρέπει να αποθηκεύουν χημικές ενώσεις χωρίς να τις αλλοιώνουν αλλά ταυτοχρόνως να μην υφίστανται και οι ίδιες αλλοίωση. Επιπλέον το μέγεθος ή τα μεγέθη τους πρέπει να είναι σε τέτοια ώστε να μην δημιουργούνται προβλήματα στην απρόσκοπτη λειτουργία της μονάδας που εξυπηρετεί. Οι δεξαμενές αποθήκευσης που χρησιμοποιούνται εντάσσονται, σύμφωνα με την EPA (Environmental Protection Agency) των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής, αλλά και της API (American Petroleum Institute) στην κατηγορία αποθήκευσης υγρών οργανικών ενώσεων. Ως υγρές οργανικές ενώσεις για την πετρελαϊκή βιομηχανία, εννοούνται γενικώς μείγματα υδρογονανθράκων με διαφορετικές τάσεις ατμών (π.χ. βενζίνη και αργό πετρέλαιο). Ενώ υγρές οργανικές ενώσεις για την χημική βιομηχανία, συνήθως ονομάζονται οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOL, Volatile Organic Liquids), οι οποίες αποτελούνται από καθαρές χημικές ουσίες ή μείγματα χημικών ουσιών με παραπλήσιες τάσεις ατμών (π.χ. βενζόλιο ή μείγμα ισοπροπυλικής και βουτανικής αλκοόλης).

Τα υγρά καύσιμα που αποθηκεύονται ταξινομούνται ως προς την ασφάλεια τους σε δύο κατηγορίες:

1. Εύφλεκτα υγρά, και αναφέρεται στα υγρά που έχουν σημείο ανάφλεξης μικρότερης από 37.8°C και τάση ατμών στην συγκεκριμένη θερμοκρασία μικρότερη ή ίση από 28 Mpa. Τα υγρά που εμπίπτουν σε αυτή την κατηγορία είναι τα κάτωθι:
 - Ομάδα IA (Class I, Flammable): Υγρά με σημείο ανάφλεξης (Σ.Α) μικρότερο των 22.8°C και σημείο βρασμού (Σ.Β) μικρότερο των 37.8°C.
 - Ομάδα IB (Class II, Combustible): υγρά με σημείο ανάφλεξης μικρότερο (Σ.Α) των 22.8°C και σημείο βρασμού (Σ.Β) ίσο ή μικρότερο των 37.8°C.

- Ομάδα IC (Class III, Combustible): υγρά με σημείο ανάφλεξης (Σ.Α) ίσο ή μεγαλύτερο των 22.8°C και μικρότερο από 37.8°C.

1 Καύσιμα υγρά, και αναφέρεται στα υγρά εκείνα με σημείο ανάφλεξης (Σ.Α) ίσο ή μεγαλύτερο από 37.8°C. Τα υγρά καύσιμα που εμπίπτουν στη συγκεκριμένη κατηγορία είναι τα κάτωθι:

- Ομάδα II: Αναφλέξιμα υγρά με σημείο ανάφλεξης (Σ.Α) μεγαλύτερης των 37.8°C και μικρότερης των 60°C.
- Ομάδα IIIA: Αναφλέξιμα υγρά με σημείο ανάφλεξης (Σ.Α) μεγαλύτερης των 60°C και μικρότερης των 93.4°C.
- Ομάδα IIIB: Αναφλέξιμα υγρά με σημείο ανάφλεξης (Σ.Α) μεγαλύτερο των 93.4°C.

2.2 Τύποι δεξαμενών

Στις ατμοσφαιρικές δεξαμενές αποθήκευσης καυσίμων τα υγρά καύσιμα που αποθηκεύονται βρίσκονται σε θερμοκρασία και πίεση παραπλήσια αν όχι ίδια με του περιβάλλοντα χώρου. Οι κατασκευή του γίνεται με χάλυβα ενώ η βάση της είναι κατασκευασμένη από σκυρόδεμα. Ενώ είναι σχεδιασμένες με τέτοιο τρόπο ώστε να αντέχει εσωτερική πίεση ή υποπίεση της τάξης των 0.07 bar.

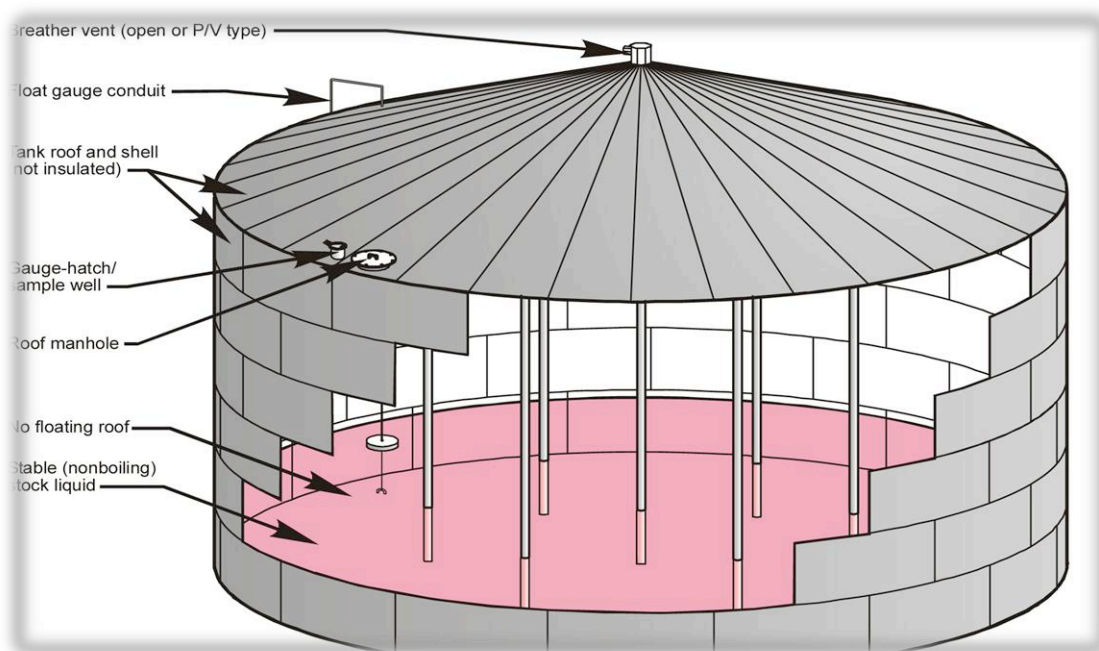
Οι δεξαμενές του παραπάνω τύπου μπορούν να ταξινομηθούν σε 6 βασικές κατηγορίες

1. Σταθερής οροφής (οριζόντιες ή κάθετες, fixed roof)
2. Εξωτερικής πλωτής δεξαμενής (floating roof)
3. Πλωτής δεξαμενής καλυμμένης με θόλο (domed external)
4. Εσωτερικής πλωτής δεξαμενής (Internal Floating Roof Tanks)
5. Μεταβαλλόμενου χώρου ατμού (Variable vapor space)
6. Υψηλής και χαμηλής πίεσης (low and high pressure)

2.2.1 Δεξαμενή σταθερής οροφής

Ο συγκεκριμένος τύπος δεξαμενής αποτελείται από κυλινδρικό κέλυφος, χαλύβδινης κατασκευής με καθορισμένο ύψος οροφής όπως φαίνεται στην Εικόνα 5 . Το ύψος καθώς και το σχήμα (κωνικό, θόλος, επίπεδο) εξαρτάται αποκλειστικά από τον σχεδιαστή. Οι δεξαμενές του παραπάνω τύπου, είναι ελεύθερα αεριζόμενες ή είναι εφοδιασμένες με εξαεριστήρα πίεσης/κενού.

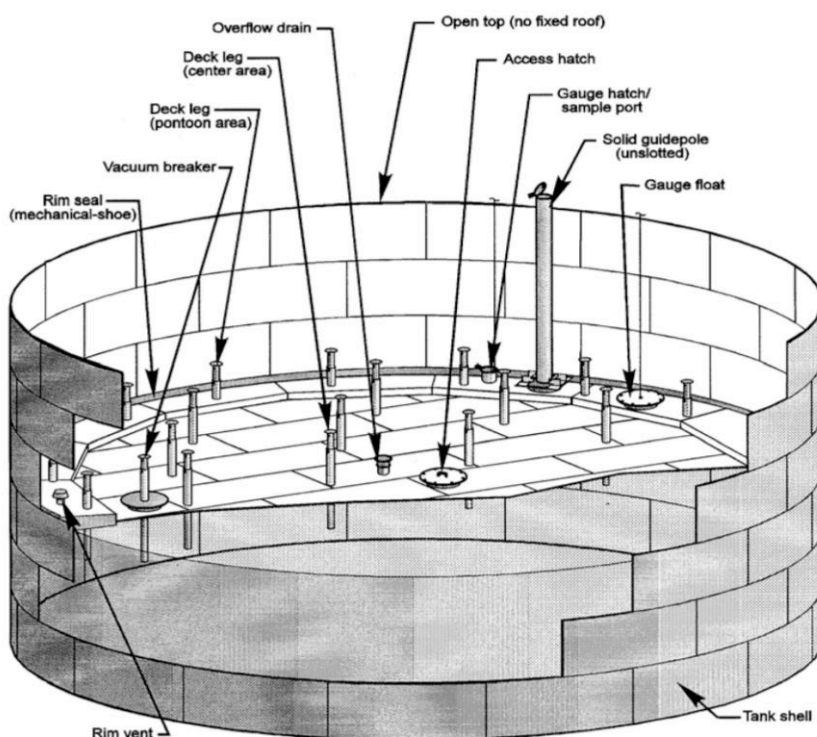
Ο τελευταίος επιτρέπει στην δεξαμενή να λειτουργεί σε κατάσταση μικρής εσωτερικής πίεσης ή υπό-πίεσης ώστε να προλαμβάνεται η δημιουργία ατμών που δημιουργούνται κατά την μεταβολή της στάθμης, θερμοκρασίας και πίεσης. Ειδικότερα, οι οριζόντιες δεξαμενές του παραπάνω τύπου κατασκευάζονται τόσο για υπόγεια όσο για επίγειες και υπέργειες χρήσεις. Τα υλικά κατασκευής είναι συνήθως χάλυβας, χάλυβας με επικάλυψη υαλονημάτων (fiberglass), ή υαλονήματα-ενισχυμένος πολυεστέρας. Οι συγκεκριμένες δεξαμενές είναι χωρητικότητας μικρότερης των 40000 γαλονιών. Κατά την κατασκευή τους λαμβάνεται υπόψη, το μήκος της δεξαμενής να μην υπερβαίνει το 6-πλάσιο της διαμέτρου, ώστε να διαφυλάσσεται η δομική συνοχή/αντοχή της. Ο συγκεκριμένος τύπος δεξαμενής χρησιμοποιείται για την αποθήκευση βαρέων προϊόντων των ομάδων II και III.



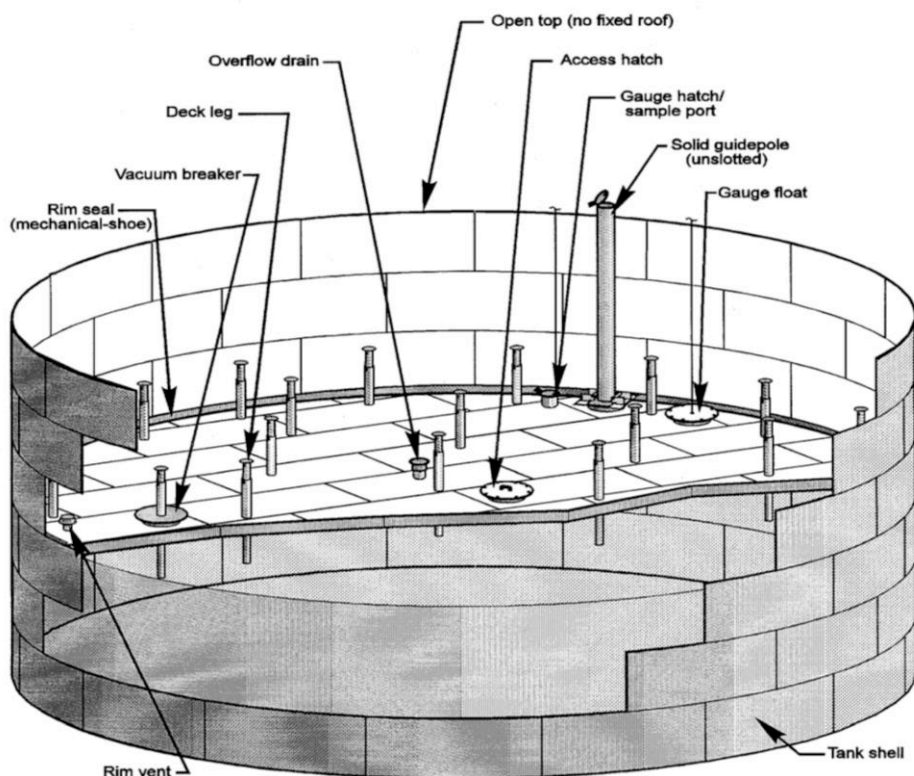
Εικόνα 5: Δεξαμενή σταθερής οροφής (U.S Environmental Protection Agency, 2006).

2.2.2 Δεξαμενή εξωτερικής πλωτής οροφής

Ο συγκεκριμένος τύπος δεξαμενής (EFRT, External Floating Roof Tank) αποτελείται από ανοιχτό κυλινδρικό κέλυφος χαλύβδινης κατασκευής, με οροφή ικανή να επιπλέει/ακολουθεί την επιφάνεια του αποθηκευμένου υγρού καθώς αυτή μεταβάλλεται για λόγους όπως πλήρωση, εκκένωση καθώς και την διαστολή και συστολή λόγω μεταβολής θερμοκρασίας. Η πλωτή οροφή αποτελείται από τον πλωτήρα (deck) και την στεφάνη σφραγίσματος (rim seal system). Ο πλωτήρας της οροφής, ο οποίος αποτελείται από συγκολλημένες χαλύβδινες πλάκες, χωρίζεται σε δύο τύπους. Μονού στρώματος (Pontoon-type) ή διπλού στρώματος (double-deck-type) όπως φαίνεται και στις Εικόνες 6 και 7 αντίστοιχα. Ο σχεδιασμός και η χρήση των παραπάνω δεξαμενών σκοπεύει στην ελαχιστοποίηση των απωλειών του περιεχομένου υγρού λόγω εξάτμισης. Γι' αυτό το λόγο στο διάκενο μεταξύ πλωτής οροφής και των τοιχωμάτων τις δεξαμενής τοποθετείται η στεφάνη σφραγίσματος. Χρήση δεξαμενών διπλού στρώματος (double-deck-type) την άμεση επαφή του περιεχομένου υγρού με τον εξωτερικό πλωτήρα ο οποίος είναι άμεσα εκτεθειμένος με την ηλιακή ακτινοβολία. Άμεσο αποτέλεσμα του παραπάνω η δεξαμενές διπλού στρώματος έχει μικρότερες απώλειες λόγω εξάτμισης καθώς και μικρότερο κίνδυνο εκκίνησης πυρκαγιάς.



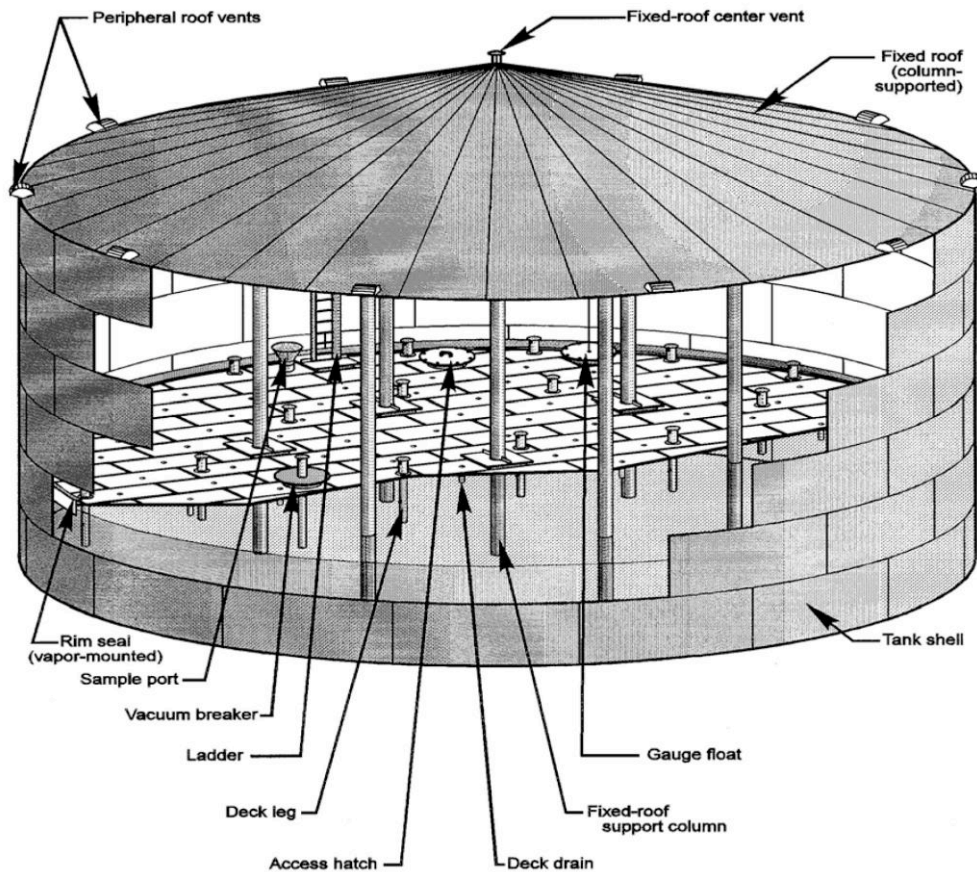
Εικόνα 6: Δεξαμενή εξωτερική πλωτής οροφής μονού στρώματος, (U.S Environmental Protection Agency, 2006).



Εικόνα 7: Δεξαμενή εξωτερικής πλωτής οροφής διπλού στρώματος, (U.S Environmental Protection Agency, 2006).

2.2.3 Δεξαμενή εσωτερικής πλωτής οροφής

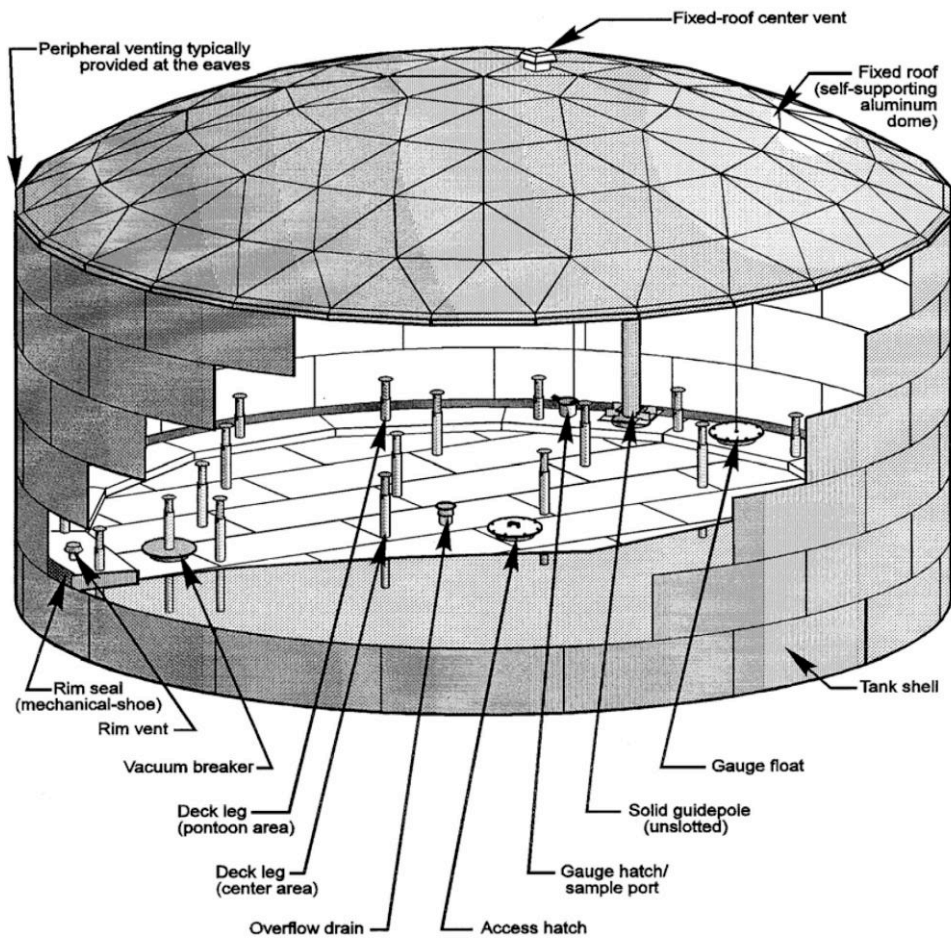
Οι δεξαμενές εσωτερικής πλωτής δεξαμενής (IFRT, Internal Floating Roof Tank) αποτελούνται από τη μόνιμη εξωτερική οροφή και την εσωτερική πλωτή δεξαμενή Εικόνα 8. Οι δεξαμενές αυτές χωρίζονται σε δύο τύπους εσωτερικών πλωτών δεξαμενών. Δεξαμενές των οποίων η μόνιμη εξωτερική οροφή στηρίζεται σε κατακόρυφη δοκό που βρίσκεται εσωτερικά και σε δεξαμενές των οποίων η μόνιμη εξωτερική οροφή στηρίζεται χωρίς εσωτερική υποστήριξη. Ο λόγος που έχει γίνει ο παραπάνω διαχωρισμός οφείλεται κυρίως στο ότι στην βιομηχανία συναντούνται δεξαμενές η οποίες έχουν μετασχηματιστεί από δεξαμενές σταθερής οροφής σε δεξαμενές σταθερής εξωτερικής οροφής με εσωτερική πλωτή δεξαμενή. Η εσωτερική οροφή ακολουθεί την πορεία της στάθμης και μπορεί είτε να είναι σε άμεση επαφή, οπότε ορίζεται ως «οροφή άμεσης επαφής» (contact deck) με την στάθμη του υγρού που περιέχεται, είτε να βρίσκεται μερικές ίντσες πάνω από την επιφάνεια του υγρού. Ο συγκεκριμένος τύπος δεξαμενής όπως και η προηγούμενη που είναι τύπου πλωτής οροφής χρησιμοποιούνται κυρίως για την αποθήκευση αργού και πτητικών όπως βενζίνη, νάφθα, δηλαδή προϊόντα ομάδων IA, IB, IC.



Εικόνα 8: Δεξαμενή εσωτερικής πλωτής οροφής, (U.S Environmental Protection Agency, 2006).

2.2.4 Δεξαμενή εξωτερική πλωτής οροφής καλυμμένη με θόλο

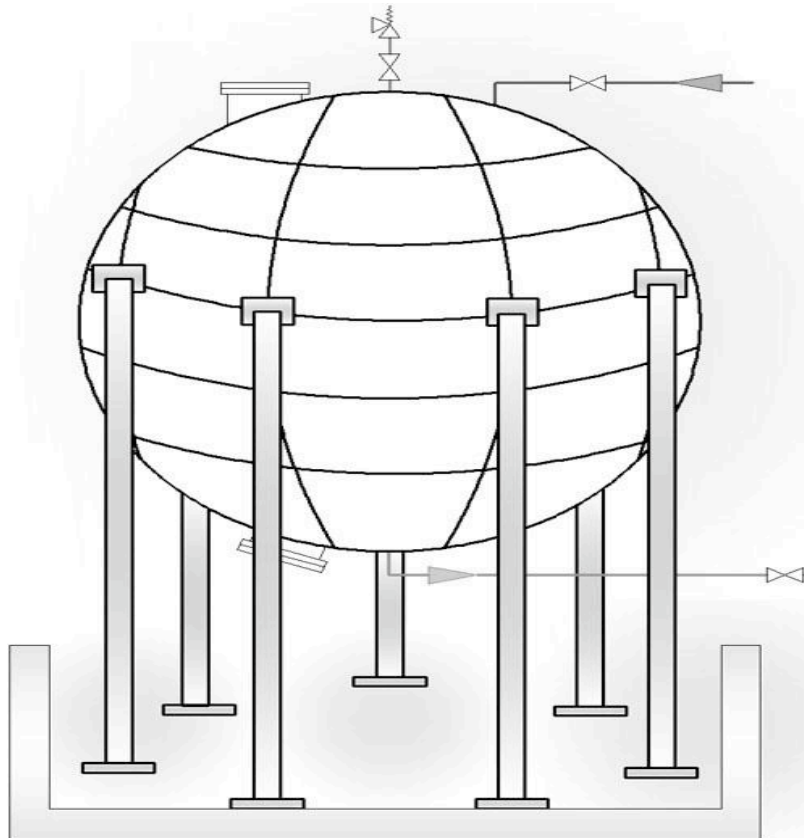
Ο συγκεκριμένος τύπος δεξαμενής συνήθως αποτελεί μετασκευή δεξαμενών εσωτερικής πλωτής δεξαμενής (Εικόνα 9). Η διαφορά της παραπάνω δεξαμενής έγκειται στο γεγονός ότι πλωτήρας της είναι βαρύτερος και στο ότι η τοποθέτηση του θόλου γίνεται με σκοπό, όχι την αποφυγή εξατμίσεις του υγρού που περιέχεται αλλά στην παρεμπόδιση της επίδρασης του ανέμου.



Εικόνα 9: Δεξαμενή εξωτερικής πλωτής οροφής καλυμμένη με θόλο, (U.S Environmental Protection Agency, 2006)

2.2.5 Δεξαμενή πίεσης

Οι δεξαμενές πίεσης που χρησιμοποιούνται ευρέως χωρίζονται σε : χαμηλής πίεσης, για πίεσης από 2.5 μέχρι 15 psig, και υψηλής πίεσης για πιέσεις υψηλότερες από 15 psig. Οι συγκεκριμένες δεξαμενές χρησιμοποιούνται κυρίως για την αποθήκευση υγρών και αερίων με υψηλή τάση ατμών και μεγέθη αλλά και η μορφή τους ποικίλη με την χρήση την οποία προορίζονται. Συνήθως η μορφή στην οποία συναντώνται είναι σφαιρικές όπως φαίνεται στην Εικόνα 10.



Εικόνα 10: Δεξαμενή πίεσης σφαιρικού σχήματος.

2.3 Αιτίες και μέτρα πρόληψης ατυχημάτων σε ατμοσφαιρικές δεξαμενές αποθήκευσης υγρών καυσίμων

Τα κύρια μέτρα πρόληψης πυρκαγιάς σε δεξαμενών υγρών καυσίμων αφορούν στην κατασκευή, λειτουργία, συντήρηση-επισκευή και πυροσβεστικά μέσα. Οι αιτίες για την έναρξη πυρκαγιάς συνδέονται σε μεγάλο βαθμό σε κατάσταση που συνδέονται με τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν. Πρέπει εδώ να σημειωθεί πως στις πλείστες περιπτώσεις η πυρκαγιά αποτελεί το τελικό στάδιο ενός ατυχήματος. Παρακάτω γίνεται μια γενική αναφορά των αιτιών αλλά και των μέτρων που ακολουθούνται για την πρόληψη ατυχημάτων. Αναλυτικότερη περιγραφή των αιτιών αλλά και των μέτρων πρόληψης παρατίθεται στο Παράρτημα Ι. Η παρουσίαση των στοιχείων στο συγκεκριμένο παράρτημα ακολουθεί αυτούσια την δομή της μεταπτυχιακής εργασία του Αργυρόπουλου (2008), τα στοιχεία αντλήθηκαν από την αξιολόγηση της Μελέτης Ασφαλείας για την εγκατάσταση «ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΑ-ΕΡΓΟ ΕΚΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΥ & ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΟΥ ΕΛΕΥΣΙΝΑΣ» που εκπονήθηκε από την Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (ΜΥΡ), με επιστημονικό υπεύθυνο τον καθηγητή Ν.Χ Μαρκάτο, καθώς και από Argyropoulos et al (2012). Επιπλέον στοιχεία έχουν αντληθεί και από

δεδομένα των μελετών ασφαλείας για τις πέντε νέες οριζόντιες δεξαμενές LPG της MOTOP ΟΪΛ (ΕΛΛΑΣ), που εκπονήθηκε από την ίδια μονάδα και έχοντας τον ίδιο επιστημονικό υπεύθυνο.

1 Κατασκευή

1.1. Ανάχωμα-τοιχίο: Κάθε υπέργεια δεξαμενή αποθήκευσης υγρών καυσίμων περικλείεται από ανάχωμα το οποίο έχει χωρητικότητα ίση με το περιεχόμενο της δεξαμενής ή των δεξαμενών που εσωκλείει. Αυτό γίνεται με το σκοπό του περιορισμού μιας ενδεχομένης διαρροής.

1.2. Διάβρωση: Ο κίνδυνος της διάβρωσης της δεξαμενής λόγω διάβρωσης απομακρύνεται με την βαφή της δεξαμενής με εποξειδικές βαφές-ρητίνες εσωτερικά και εξωτερικά. Στην περίπτωση των υπόγειων δεξαμενών, αυτές τοποθετούνται εντός τσιμεντένιων θηκών και το διάκενο μεταξύ δεξαμενής και τσιμέντου γεμίζεται με γαρμπίλι ή άμμο.

1.3. Πάχος μεταλλικού τοιχώματος δεξαμενής: Το πάχος του μεταλλικού τοιχώματος ορίζεται με βάση τα διεθνή πρότυπα (API και NFPA) και είναι συναρτήσεως των διαστάσεων της δεξαμενής καθώς και του καυσίμου (λόγο πυκνότητας) που πρόκειται να αποθηκευτεί.

2 Λειτουργία

2.1 Αποφυγή διαρροών: Η διαρροή καυσίμου από της δεξαμενές αποφεύγεται με τον σωστό, συχνό και προσεκτικό έλεγχο όλων των «σημείων εισόδου» της δεξαμενής αλλά και με αισθητήρες για το πρόωρο εντοπισμό τυχόν διαρροών από διάφορα σημεία (π.χ. την στεφάνη σφραγίσματος,) ή αστοχιών σε σημεία της δεξαμενής.

2.2 Αποφυγή σπινθήρων και φλογών: Η σπινθήρες αλλά και φλόγες είναι δυνατόν να υπάρξουν εφόσον δεν τηρούνται οι κανόνες ασφαλείας, αμέλεια, λειτουργική αστοχία αλλά και από στατικό ηλεκτρισμό. Ειδικότερα, η αποφυγή δημιουργίας στατικού ηλεκτρισμού που συναντώνται γίνεται με γείωση της δεξαμενής, γείωση του οχήματος ή σκάφους από όπου γίνεται η φόρτωση. Επίσης η μη σωστή ροή καυσίμου ή χρήση δεξαμενής που προηγουμένως χρησιμοποιούταν για άλλο είδος καυσίμου με διαφορετικό Σ.Α δύναται να δημιουργήσει σπινθήρες.

2.3 Συντήρηση: Η συντήρηση πρέπει να γίνεται από εξειδικευμένο και πιστοποιημένο προσωπικό βάση των προτύπων αλλά και των κανόνων ασφαλείας. Σημαντική παράμετρος στην συντήρηση των δεξαμενών είναι ότι πρέπει να είναι άδειες και

προηγουμένως αλλά και κατά την διάρκεια της επισκευή να γίνεται έλεγχος για την ύπαρξη τυχόν ατμών καυσίμου. Επίσης γίνεται χρήση αντικρουστικών εργαλείων.

- 3) Πυροσβεστικά μέτρα: Πλησίον των δεξαμενών και εντός της εγκατάστασης υπάρχουν κινητά και μόνιμα συστήματα πυρόσβεσης που είναι συνδεδεμένα με το μόνιμο πυροσβεστικό δίκτυο νερού αλλά και αφρογεννητριών

2.4 Ανάπτυξη πυρκαγιάς και ταξινόμησή της

Πυρκαγιά ορίζεται ως η ανεξέλεγκτη καύση με ταυτόχρονη καταστροφή του ενός σώματος η οποία συνοδεύεται από την έκλυση θερμότητας και δημιουργία φλογών. Για να γίνει εφικτή η ανάπτυξη μιας πυρκαγιάς πρέπει να συνυπάρχουν τέσσερις παράγοντες οι οποίοι είναι: 1) Καύσιμη ύλη, 2) Οξυγόνο, 3) Θερμοκρασία 4) Ελεύθερες ρίζες. Η εξουδετέρωση ενός τουλάχιστον από τους παραπάνω παράγοντες οδηγούν στην κατάσβεση της πυρκαγιάς.

Η εξέλιξη κάθε πυρκαγιάς διακρίνεται σε διάφορες φάσεις. Στη φάση της έναυσης και ανάπτυξης κατά την διάρκεια της οποίας η θερμοκρασία στην επιφάνεια του υλικού/καύσιμης ύλης διαφέρουν πολύ. Η συγκεκριμένη φάση εξαρτάται από πλήθος παραγόντων όπως σχήμα επιφανείας, χώρος εκδήλωσης της πυρκαγιάς, ποσότητα καύσιμης ύλης και ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους. Αξίζει να σημειωθεί πως στην συγκεκριμένη φάση οι αναθυμιάσεις των ουσιών αρχίζουν την διαδικασία της καύσης. Εν συνεχεία στην δεύτερη φάση γίνεται η εξάπλωση της πυρκαγιάς η οποία χαρακτηρίζεται από χαμηλές σχετικά θερμοκρασίες και μικρές σχετικά ποσότητες καιόμενου καυσίμου. Αυτό συμβαίνει μέχρι τη στιγμή που η θερμοκρασία ανέλθει στο σημεία ανάφλεξης (Σ.Α) με αποτέλεσμα την επιτάχυνση της καύσης και εξάπλωσης της πυρκαγιάς. Σε όλη την καύσιμη ύλη. Προτελευταίο και κυρίως στάδιο στην εξέλιξη της πυρκαγιάς είναι η φάση της γενικευμένη πυρκαγιάς όπου στην καύση συμμετέχει όλο το υλικό και επιτυγχάνεται η μέγιστη θερμοκρασία. Τέλος είναι η φάση της ύφεσης ή κατάσβεσης. Η μέση θερμοκρασία σε αυτή την περίπτωση είναι γύρω στους 1000 C.

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Τυποποίηση (Πρότυπο EN2), οι πυρκαγιές διακρίνονται και ταξινομούνται ανάλογα με το καιόμενο υλικό σε πέντε κατηγορίες και χαρακτηρίζονται διεθνώς με τα γράμματα A, B, C, D και E.

- 1) Κατηγορία Πρώτη (A): Οι πυρκαγιές χρησιμοποιούν ως καύσιμη ύλη τα λεγόμενα συνήθη-κοινά στερεά καύσιμα με οργανική σύνθεση και σχηματισμό όπως ξυλεία, χαρτί, ύφασμα, ελαστικό, πλαστικά κ.α.

- 2) Κατηγορία Δεύτερη (B): Οι πυρκαγιές χρησιμοποιούν ως καύσιμη ύλη εύφλεκτα υγρά ή στερεά που υγροποιούνται κατά την καύση όπως βενζίνη, πετρέλαιο, έλαια, λίπη, παραφίνη κ.α.
- 3) Κατηγορία Τρίτη (C): Οι πυρκαγιές χρησιμοποιούν ως καύσιμη ύλη αέρια καύσιμα όπως προπάνιο, φωταέριο, φυσικό αέριο, ασετιλίνη, τιτάνιο, υδρογόνο κ.α.
- 4) Κατηγορία Τετάρτη (D): Οι πυρκαγιές που προέρχονται από μέταλλα, όπως νάτριο, κάλιο, μαγνήσιο, αλουμίνιο, τιτάνιο κ.α.
- 5) Κατηγορία Πέμπτη (E): Η συγκεκριμένη κατηγορία χρησιμοποιείται άτυπα για πυρκαγιές των παραπάνω κατηγοριών που λαμβάνουν χώρα πάνω κοντά σε ηλεκτρικές συσκευές ή εγκαταστάσεις που βρίσκονται υπό ηλεκτρική τάση.

Η παραπάνω ταξινόμηση γίνεται για λόγους καλύτερης αντιμετώπισης της πυρκαγιάς. Η αντιμετώπιση και κατά συνέπεια πυρόσβεση κάθε πυρκαγιάς εξαρτάται άμεσα από το καίόμενο υλικό. Το κατασβεστικό υλικό που χρησιμοποιείται για κάθε κατηγορία πυρκαγιάς παρατίθεται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Υλικό κατάσβεσης ανά κατηγορία πυρκαγιάς.

Κατηγορία Πυρκαγιάς	Καύσιμη ύλη	Υλικό κατάσβεσης
A	Συνήθη-καιόμενα υλικά	Νερό, αφρός, ξηρά κόνη
B	Εύφλεκτα υγρά, υγρά καύσιμα	Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂), Ξηρά κόνη, αφρός, ομίχλη ύδατος.
C	Αέρια καύσιμα	Ξηρά κόνη, Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂)
D	Μέταλλα	Ξηρά σκόνη, άμμος, γραφίτης

2.5 Στατιστική ανάλυση ατυχημάτων πυρκαγιάς σε δεξαμενές αποθήκευσης καυσίμων

Οι Persson και Lönnemark (2004) προχώρησαν σε εκτεταμένη βιβλιογραφική και όχι μόνο ανασκόπηση των πυρκαγιών σε δεξαμενές αποθήκευσης καυσίμων από την δεκαετία 1950 έως και το 2003. Η έρευνα αυτή αποτελούσε συνέχεια του ερευνητικού προγράμματος FOAMSPEX (Large-scale Foam Application - Modelling of Foam Spread and Extinguishment), του οποίου σκοπός ήταν η ανάπτυξη μοντέλων για την πρόβλεψη διασποράς του αφρού πυρόσβεσης αλλά και άλλων πυροσβεστικών μέσων κάτω από συνθήκες πυρκαγιάς μεγάλης κλίμακας. Η συλλογή των

δεδομένων έγινε μέσα από ευρεία γκάμα πηγών όπως, αρχεία αρμόδιων αρχών, εκθέσεις και παρουσιάσεις περιστατικών σε διεθνή συμπόσια, έγκριτα επιστημονικά περιοδικά του χώρου της πυρασφάλειας (π.χ. Industrial Fire World (IFW), Industrial Fire Journal (IFJ) και Industrial Fire Protection (IFP)). Σημαντικό εμπόδιο στην διερεύνηση και δημιουργία πλήρους μελέτης είναι ότι πολλά σημεία των εκθέσεων μετά των συμβάν θεωρούνται από τις περισσότερες εταιρείες βιομηχανικό απόρρητο και ως εκ τούτου, οι πληροφορίες αυτές δεν είναι προσιτές στο ευρύ κοινό. Επιπλέον απουσιάζει η σωστή καταγραφή από έναν ανεξάρτητο φορέα με αποτέλεσμα αρκετές φορές το συμβάν κάποιας πυρκαγιάς να έχει αντληθεί από τον έντυπο τύπο.

Συνολικά, όπως φαίνεται και στο Πίνακα 3 από την δεκαετία του 1950 έχουν εξακριβωθεί 480 ατυχήματα πυρκαγιάς σε δεξαμενές, ενώ ο πραγματικός αριθμός μπορεί να θεωρεί μεγαλύτερος εάν ληφθεί υπόψη ο αυξημένος αριθμός ατυχημάτων που παρουσιάζεται κάθε δεκαετία. Παράγοντας που συντελεί στην παραπάνω θεώρηση είναι και το γεγονός πως τις 3 πρώτες δεκαετίες δεν υπήρχε συστηματική και πλήρη καταγραφή των ατυχημάτων. Επίσης, ενδέχεται να υπάρχουν και ατυχήματα τα οποία συνέβησαν σε αναπτυσσόμενες χώρες όπου η όποια καταγραφή των ατυχημάτων από τα μέσα ενημέρωσης να είναι ανεπαρκής καθώς αυτές οι πηγές καλύπτουν κυρίως τις Η.Π.Α, Ευρώπη και κάποιες αγγλόφωνες χώρες. Οι πυρκαγιές που έχουν καταγραφεί κυμαίνονται από ελάσσονα περιστατικά, όπως μικρής έκτασης πυρκαγιές που εκδηλώθηκαν στη στεφάνη σφραγίσματος της δεξαμενής και τέθηκαν γρήγορα υπό έλεγχο, χωρίς να υπάρξουν περαιτέρω θύματα ή υλικές ζημιές. Μέχρι μεγάλης έκτασης πυρκαγιάς που επεκτάθηκε στο σύνολο των εγκαταστάσεων αποθήκευσης υγρών καυσίμων, προξενώντας θύματα αλλά και μεγάλες ζημιές. Σύμφωνα με την έρευνα των Persson και Lönnemark (2004) προκύπτει ένας ετήσιος αριθμός ατυχημάτων που κυμαίνεται σε 15-20. Η τελευταία καταγεγραμμένη πυρκαγιά στην μελέτη τους είναι στις 28/9/2003.

Πίνακας 3: Αριθμός πυρκαγιών ανά δεκαετία (Persson and Lönnemark, 2004)

Δεκαετία	1950	1960	1970	1980	1990	2000
Αριθμός πυρκαγιών	13	28	80	135	161	62

Οι Chang και Lin (2006) προχώρησαν σε επανεξέταση 242 ατυχημάτων σε δεξαμενές αποθήκευσης εντός βιομηχανικών εγκαταστάσεων που έγιναν τα τελευταία 40 χρόνια. Από την στατιστική ανάλυση προκύπτει ότι από σύνολο 242 ατυχημάτων, ότι τα 114 έγιναν σε χώρες της Βόρειας Αμερικής, 72 σε χώρες της Ασίας και 38 σε χώρες της Ευρώπης (Πίνακας 3). Τα περισσότερα από αυτά τα ατυχήματα έχουν συμβεί κυρίως σε εγκαταστάσεις διυλιστηρίων με 116 περιπτώσεις (47.9%), ενώ ακολουθούν οι τερματικοί σταθμοί αποθήκευσης και αντλιοστάσια (64

περιπτώσεις, 26.4 %). Οι υπόλοιπες περιπτώσεις (25.7%) αφορούν ατυχήματα που συνέβησαν σε πετροχημικά εργοστάσια (12.8%), εξέδρες εξόρυξης (2.5%) καθώς και σε άλλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις (10.3%) όπως εργοστάσια παραγωγής ρεύματος, μονάδες επεξεργασίας φυσικού αερίου, αγωγοί μεταφοράς, εργοστάσια παραγωγής λιπασμάτων κτλ. Η συχνότερη αιτία πρόκλησης των ατυχημάτων ήταν η πτώση κεραυνού, με απευθείας πτώση (εντός ακτίνας 10 m) στην δεξαμενή είτε περιμετρικά από την δημιουργία ηλεκτρικού τόξου. Η πρόκληση ατυχημάτων λόγω μη σωστής συντήρησης είναι η δεύτερη συχνότερη αιτία ακολουθούμενη από τα λειτουργικά λάθη κατά την διάρκεια της παραγωγής (Πίνακας 4). Επίσης, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5, η πυρκαγιά αποτελεί το συχνότερο είδος ατυχήματος με 145 (59.9 %) περιπτώσεις, ενώ ακολουθεί με 61 (25.2%) περιπτώσεις η έκρηξη. Οι αιτίες αυτές αντιπροσωπεύουν το 85.1% ατυχημάτων που έχουν προκληθεί σε δεξαμενές αποθήκευσης καυσίμων.

Πίνακας 4: Αίτια ατυχήματος ανά δεκαετία.

Χρονική Περίοδος	1960-1969	1970- 1979	1980-1989	1990- 1999	2000- 2003	Σύνολο
Κεραυνός	4	10	19	37	10	80
Συντήρηση/θερμές εργασίες	1	5	9	12	5	32
Λειτουργικό λάθος	1	5	6	8	9	29
Αστοχία υλικού	3	1	5	7	3	19
Δολιοφθορά	2	5	2	6	3	18
Ρήξη/ρωγμή	0	3	3	3	8	17
Διαρροή και διάρρηξη γραμμής	0	3	2	5	5	15
Στατικός ηλεκτρισμός	2	1	2	2	5	12
Πηγή φλόγα	1	0	4	2	1	8
Φυσική καταστροφή	1	2	1	1	2	7
Ανεξέλεγκτη αντίδραση	2	1	0	2	0	5
Σύνολο	17	36	53	85	51	242

Πίνακας 5: Είδος ατυχήματος

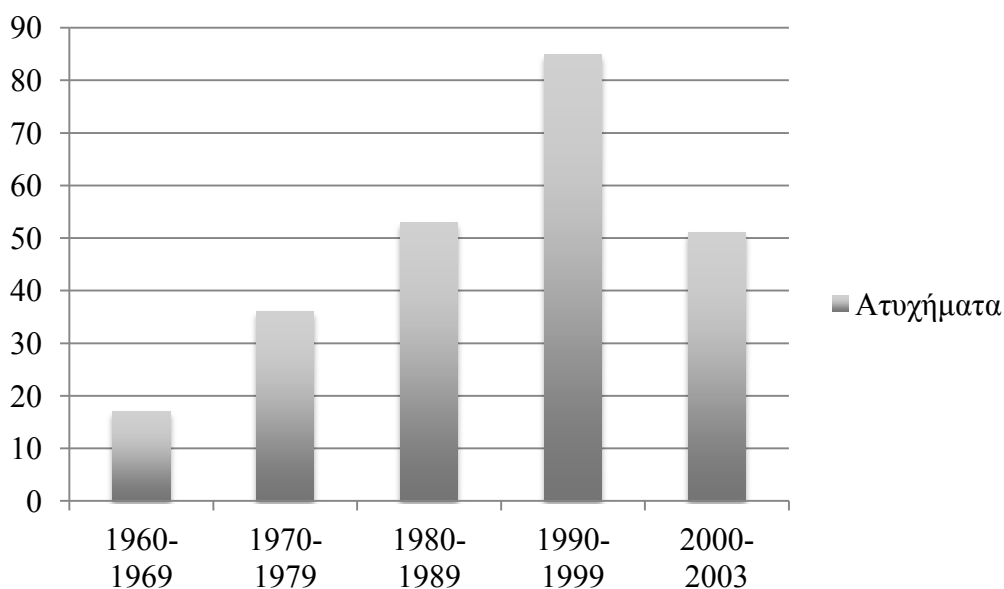
Έτος	Πυρκαγιά	Έκρηξη	Υπερχείλιση	Διαρροή τοξικού αερίου	Άλλη αιτία	Υποσύνολο
1960- 1969	8	8	0	0	1 ^α	17
1970- 1979	26	5	5	0	-	36
1980- 1989	31	16	3	2	1 ^α	53
1990- 1999	59	22	2	1	1 ^β	85
2000- 2003	21	10	8	10	2 ^γ	51
Υποσύνολο	145	61	18	13	5	242

^α: Παραμόρφωση δεξαμενής.

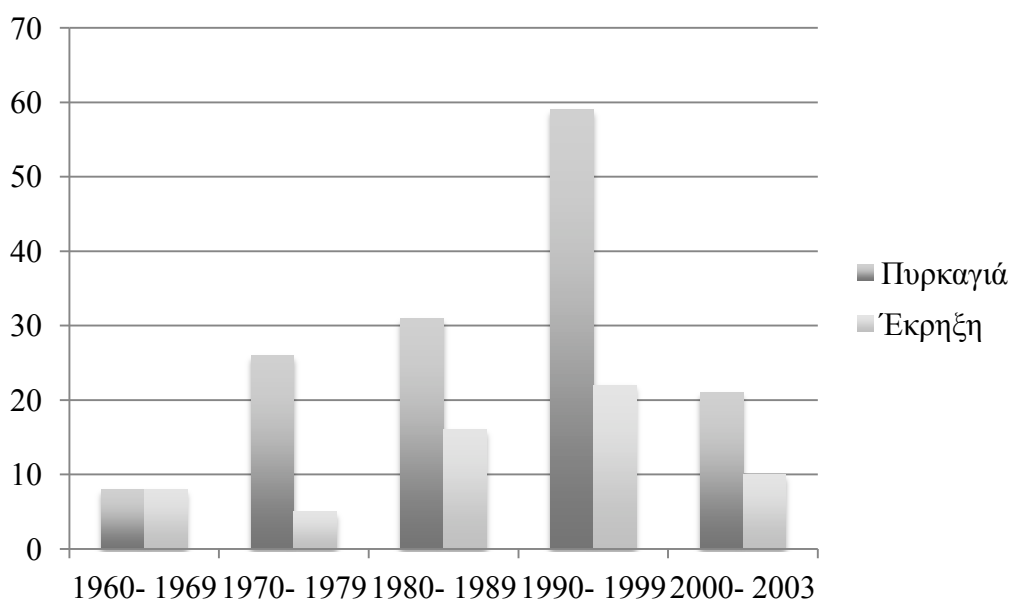
^β: Πτώση και τραυματισμός εργαζομένου.

^γ: Πτώση ενός εργαζομένου και ηλεκτροπληξία μέχρι θανάτου ενός ακόμα εργαζομένου.

Ένα εντυπωσιακό, αλλά, συνάμα ανησυχητικό γεγονός είναι πώς τα ατυχήματα ακολουθούν, όπως φαίνεται και στα Διαγράμματα 1 και 2, ανοδική τάση παρά την εξέλιξη που έχει υπάρξει, ιδιαίτερα τις τελευταίες δεκαετίες, στην πρόληψη βιομηχανικών ατυχημάτων καθώς και των εξελιγμένων διεθνών πρακτικών όπως των API Global Practises (American Petroleum Institute , ASME (American Society of Mechanical Engineering) και ANSI (American National Standards Institute).



Διάγραμμα 1: Συνολικός αριθμός ατυχημάτων που έχουν συμβεί από το 1960 έως και το 2003.



Διάγραμμα 2: Συνολικός αριθμός ατυχημάτων σχετιζόμενων με πυρκαγιά και έκρηξη που έχουν συμβεί από το 1960 έως και το 2003.

Κεφάλαιο 3: Σύσταση και δομή ατμόσφαιρας

3.1 Εισαγωγή

Η διασπορά των ρυπαντών και κατ' επέκταση των τοξικών ρύπων εξαρτάται από την κατάσταση της ατμόσφαιρας, τόσο τη θερμοδυναμική (θερμοκρασιακές διαφορές) όσο και τη ρευστομηχανική (ατμοσφαιρικά ρεύματα).

Ο ήλιος αποτελεί τη πηγή ενέργειας για τη Γη και η ανισομερής θέρμανση της από τον ήλιο αποτελεί τη κύρια αιτία των μετεωρολογικών φαινομένων. Η ποσότητα της ηλιακής ενέργειας που φθάνει στην επιφάνεια της Γης εξαρτάται από α) τη σχετική θέση της Γης ως προς τον ήλιο, β) το μήκος της διαδρομής των ηλιακών ακτινών εντός της ατμόσφαιράς, γ) την κατάσταση της ατμόσφαιρας και δ) την γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών.

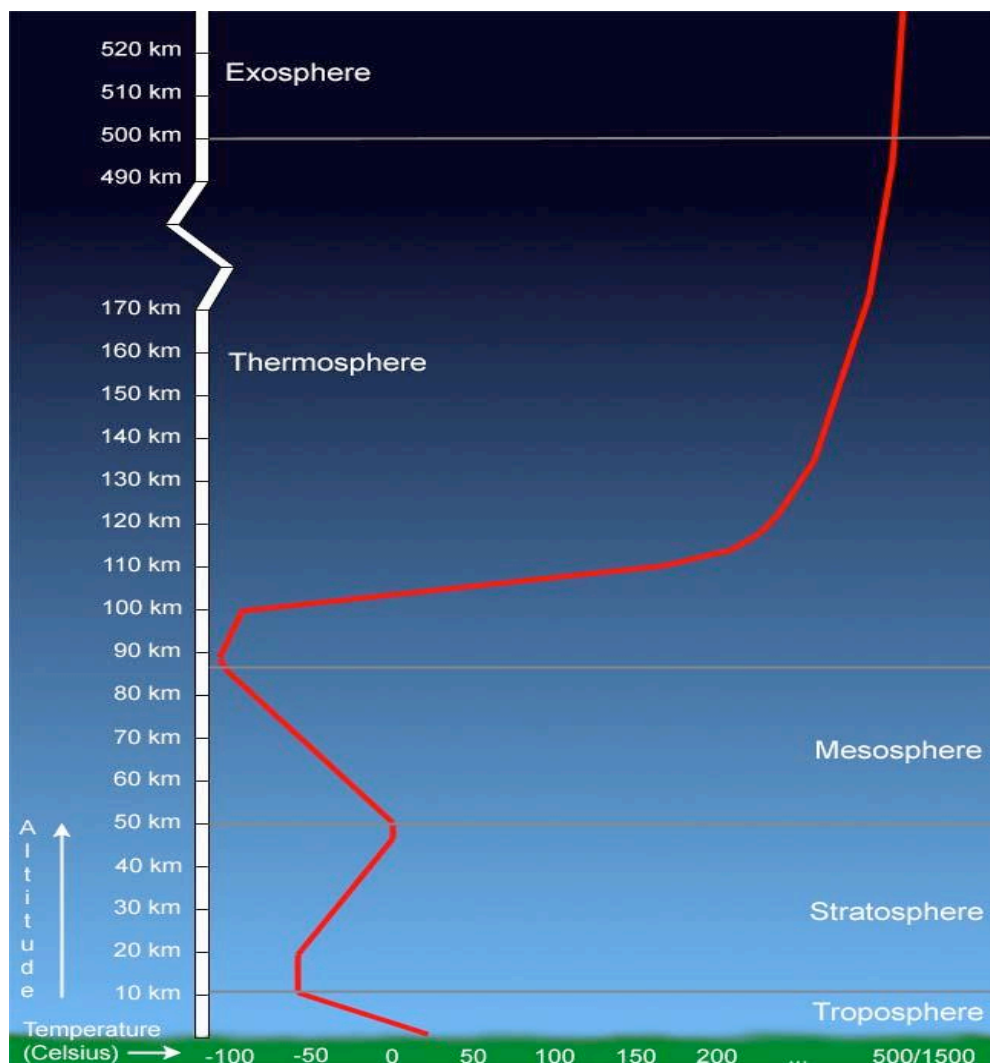
Η Γη έχει μέση ακτίνα 6.35×10^6 m και συνολική επιφάνεια 5.1×10^{14} m². Η μέση θερμοκρασία της επιφανείας είναι 14 C°, μέση πυκνότητα 5.52 kg/m³, μάζα 5.98×10^{24} kg και οι μέγιστες θερμοκρασίες του αέρα είναι 58 C° στην Λιβύη και -89.6 C° στην Ανταρκτική. Το μέσο βάθος των ωκεανών είναι 3794 m ενώ το μέγιστο βάθος είναι 10924 m. Η μάζα του ωκεανού είναι 1.35×10^{21} kg. Θα πρέπει να σημειωθεί πως οι ωκεανοί παίζουν σημαντικό ρόλο στη μεταβλητότητα και την αλλαγή του κλίματος και κατ' επέκταση στις κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στη Γη λόγω της μεγάλης θερμοχωρητικότητας τους (4.2 kJ/(kg C°) η οποία είναι περίπου 1000 φορές μεγαλύτερη από της ατμόσφαιρας.

Η ατμόσφαιρά της Γης αποτελείται από 78.1% N₂, 20.9 O₂, 0.9 Ar, 370 ppm CO₂, 18 ppm Ne, 5 ppm He, 1.7 ppm CH₄, 0.53 ppm H₂, 0.31 ppm NO και ποσότητα υδρατμών. Η ατμόσφαιρα διαιρείται σε ατμοσφαιρικά στρώματα τα οποία καθορίζονται από τη μεταβολή της θερμοκρασίας με το ύψος. Μεταξύ των ατμοσφαιρικών στρωμάτων βρίσκονται ατμοσφαιρικά στρώματα όπου η θερμοκρασία δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες μεταβολές και καλούνται ατμοσφαιρικές παύσης. Το 99 % της συνολικής μάζας των αερίων της ατμόσφαιρας βρίσκεται σε απόσταση μικρότερη των 32 km από την επιφάνεια.

Το πρώτο ατμοσφαιρικό στρώμα ονομάζεται τροπόσφαιρα, εκτείνεται μέχρι τα 20 km περίπου από την επιφάνεια του εδάφους και όλα τα μετεωρολογικά φαινόμενα συμβαίνουν σε αυτό το στρώμα της ατμόσφαιρας. Η θερμοκρασία στην τροπόσφαιρα μειώνεται ρυθμό 6 C°/1000 m. Μεταξύ της τροπόσφαιρας και της στρατόσφαιρας βρίσκεται η τροπόπαυση όπου η θερμοκρασία δεν μεταβάλλεται καθ' ύψος. Πάνω από τη τροπόπαυση βρίσκεται η στρατόσφαιρα η οποία φτάνει μέχρι τα 50 km. Η θερμοκρασία παραμένει σταθερή στους -60 C° μέχρι το ύψος των 30 περίπου km και μετά αυξάνεται, φθάνοντας τους 15 C°. Η απότομη αύξηση της θερμοκρασίας οφείλεται στην απορρόφηση μεγάλου μέρος της υπεριώδους ακτινοβολίας από το στρώμα του όζοντος που βρίσκεται σε αυτό το ύψος.

Εν συνεχεία, μεταξύ της στρατόσφαιρας και της μεσόσφαιρας παρεμβάλλεται το στρώμα της στρατόπαυσης. Η μεσόσφαιρα εκτείνεται από τα 50 km μέχρι τα 80 km και κύριο χαρακτηριστικό της είναι η ταχεία μείωση της θερμοκρασίας που φθάνει μέχρι του -152 C° .

Τελευταίο ατμοσφαιρικό στρώμα, είναι η θερμόσφαιρα η οποία εκτείνεται από τα 80 km όπου βρίσκεται η Μεσόπαυση, μέχρι τα 300 km. Η θερμοκρασία σε αυτό το ατμοσφαιρικό στρώμα αυξάνεται ραγδαία και κυμαίνεται στους 925.85 C° - 1500 C° . Η θερμοκρασία αυτή μπορεί να είναι και υψηλότερη καθώς εξαρτάται άμεσα από το την ηλιακή δραστηριότητα. Μια γραφική παράσταση της κατανομής της θερμοκρασίας στην ατμόσφαιρα δίνεται από την Εικόνα 11.



Εικόνα 11: Η διαμόρφωση των ατμοσφαιρικών στρωμάτων και της θερμοκρασίας εντός αυτών. (Πηγή: University Corporation for Atmospheric Research (UCAR). ©1995–1999, 2000).

Η ανισομερής θέρμανση της Γης από τον ήλιο, είτε λόγω περιστροφής της Γης (ημερήσιος κύκλος), διαφορετική κλίση της επιφανείας της Γης ως προς τις ακτίνες του ηλίου (εποχιακός κύκλος), διαφορετικού συντελεστή απορρόφησης-ανάκλισης της επιφάνειας (θάλασσα, ξηρά, χιόνι), αποτελεί την αιτία δημιουργίας κυκλοφοριακών συστημάτων στην ατμόσφαιρα (Μπεργελές, 2006).

Τα κυκλοφοριακά συστήματα μπορούν να διαχωριστούν σε μεγάλα κυκλοφοριακά συστήματα ή αλλιώς κυκλοφοριακές κυψέλες, και σε τοπικά κυκλοφοριακά συστήματα. Η διαφοροποίησή τους, έγκειται στο γεγονός ότι τα πρώτα καθορίζουν και επηρεάζουν ουσιαστικά το κλίμα της Γης, ενώ τα τοπικά έχουν τοπικό χαρακτήρα έκτασης 10-20 km.

Η περιστροφή τη Γης επιδρά στο κυκλοφοριακό σύστημα λόγω των εξ' αυτής αναπτυσσόμενων δυνάμεων Coriolis που εφαρμόζονται πάνω σε κάθε κινούμενη κινούμενη μάζα. Ενώ η ανισομερής θέρμανση, που οφείλεται σε παράγοντες όπως η διάρκεια του ημερήσιου κύκλου, ανάγλυφο αλλά και απορροφητικότητα/ανάκλιση εδάφους, αποτελούν την αιτία ανάπτυξης των τοπικών κυκλοφοριακών συστημάτων.

Οι κυκλοφοριακές κυψέλες αλλά και τα βασικά χαρακτηριστικά τους είναι (Μπεργελές, 2000):

α) Κυκλοφοριακή κυψέλη Hadley: Μεταφορά θερμού αέρα με μεγάλη ποσότητα υδρατμών από την περιοχή του Ισημερινού. Λόγω της ψύξης που υφίσταται το αέριο ρεύμα προκαλούνται εκτεταμένες βροχοπτώσεις στις περιοχές $\pm 10^\circ$. Το ξηρό, πλέον, αέριο ρεύμα κατευθύνεται Βόρεια και κατέρχεται στην γεωγραφική περιοχή 30° .

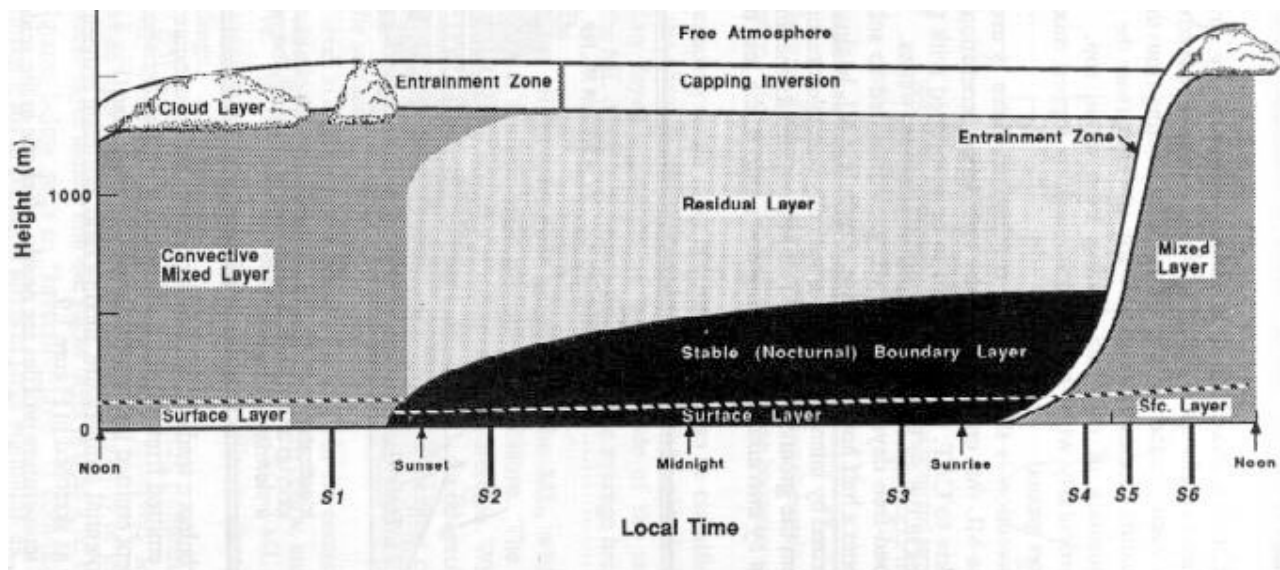
β) Κυκλοφοριακή κυψέλη Ferrel: Η κυκλοφοριακή κυψέλη Ferrel καλύπτει τις γεωγραφικές περιοχές 30° μέχρι $40-50^\circ$. Επιφανειακή μεταφορά θερμού αέρα προς Βορρά με αποτέλεσμα την σημαντική μείωση των θερμοκρασιών σε αυτές τις περιοχές.

γ) Πολική κυκλοφοριακή κυψέλη: Η πολική κυκλοφοριακή κυψέλη κινείται αντίθετα από την κυκλοφοριακή κυψέλη Ferrel ενώ η περιοχή που συνυπάρχουν οι δύο κυψέλες ορίζει το πολικό μέτωπο.

3.2 Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα

Το σύνολο των παραγόμενων ρύπων (με εξαίρεση αυτών που παράγονται από αεροσκάφη) συμβαίνει εντός του οριακού ατμοσφαιρικού στρώματος.

Το οριακό ατμοσφαιρικό στρώμα (Α.Ο.Σ) ορίζεται σύμφωνα με τον Stull (1988) ως “το μέρος της τροπόσφαιρας που επηρεάζεται άμεσα από τη μορφολογία του εδάφους και, η οποία επιδρά με χρονική διάρκεια μικρότερη της μιας ώρας”.



Εικόνα 12: Το Α.Ο.Σ και η μεταβολή του κατά την διάρκεια της ημέρας. (Πηγή: Stull 1988)

Το πάχος του οριακού στρώματος εκτείνεται μέχρι τα 1000 m και εξαρτάται από την ηλιοφάνεια (θέρμανση εδάφους), περίοδο της ημέρας, ανάγλυφο του εδάφους και ύπαρξη αερίων μαζών που κινούνται οριζόντια (μέτωπα, θαλάσσια αύρα, κλπ) στροβίλους. Στην Εικόνα 2 παρουσιάζεται το Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα καθώς και η εξέλιξη του κατά την διάρκεια της ημέρας. Σε αυτό το μέρος της ατμόσφαιρας τα φυσικά μεγέθη όπως ταχύτητες ανέμου, θερμοκρασία, υγρασία εμφανίζουν ταχείες διακυμάνσεις. Το Α.Ο.Σ μπορεί να διαχωριστεί σε 4 διακριτές περιοχές οι οποίες είναι (Μπεργελές, 2000, Stull 1988): α) Στρώμα επιφανείας (Mixed Layer) , β) Στρώμα ανάμειξης (Mixed Layer), γ) Ζώνη εισροής (Entrainment Zone), δ) Αποκομμένο ή Εναπομένον στρώμα (Residual Layer).

α) Στρώμα επιφανείας (Surface Layer): Έχει ύψος που κυμαίνεται από 50 – 100 m (αποτελεί το 10% του Α.Ο.Σ) και επηρεάζεται άμεσα από το ανάγλυφο του εδάφους. Σε αυτό το στρώμα δημιουργούνται οι εκπομπές ρύπων.

β) Στρώμα ανάμειξης (Mixed Layer): Στο συγκεκριμένο στρώμα γίνεται η ανάμιξη των

αερίων ρύπων από τις ατμοσφαιρικές αναταράξεις. καθώς και η δημιουργία των οργανωμένων αερίων μαζών λόγω μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής, από τα χαμηλότερα στα υψηλότερα ατμοσφαιρικά στρώματα. Σε πολλές περιπτώσεις το στρώμα ανάμειξης ταυτίζεται με το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα.

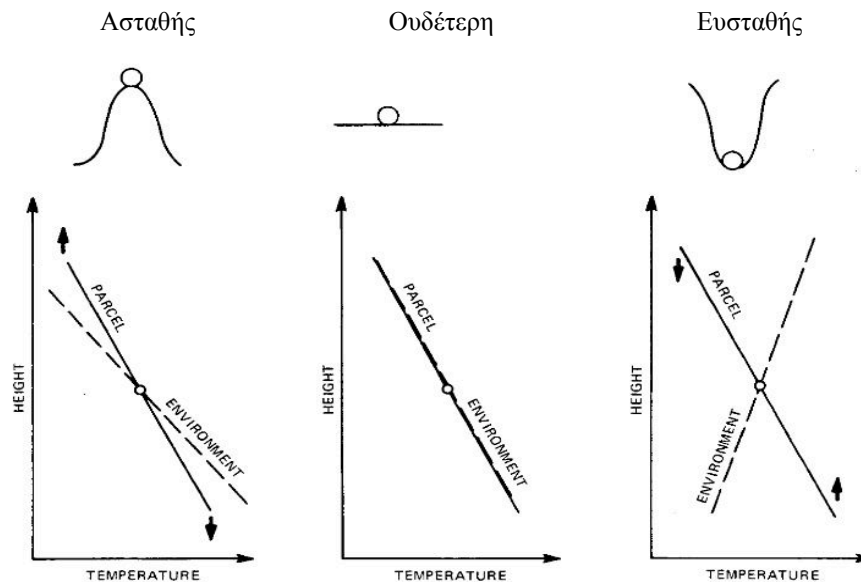
γ) Ζώνη εισροής (Entrainment Zone): Πρόκειται για το ευσταθές οριακό στρώμα που δημιουργείται στην κορυφή του στρώματος ανάμειξης και λειτουργεί ως κάλυμμα στα ανερχόμενα θερμικά ρεύματα, έτσι περιορίζεται η κυριαρχία της τύρβης.

δ) Αποκομμένο στρώμα (Residual layer): Το στρώμα που πολλές φορές ονομάζεται και στρώμα αποκοπής. Δημιουργείται 30 λεπτά περίπου πριν την δύση του ηλίου οπότε και παύει η δημιουργία των θερμών ανοδικών ρευμάτων. Το αποκομμένο στρώμα είναι ουδέτερα στρωματοποιημένο με αποτέλεσμα η τύρβη να είναι σχεδόν ίδιας έντασης σε όλες της κατεύθυνσης.

3.3 Στατική της ατμόσφαιρας

Η πραγματική κατάσταση της ατμόσφαιρας, έχει ουσιαστική επίδραση στη διασπορά των ρυπαντικών ουσιών και χαρακτηρίζεται από τη μεταβολή της θερμοβαθμίδας (environmental lapse rate) καθ' ύψος, δηλαδή της τιμής, τόσο κατά την διάρκεια της ημέρας όσο και κατά την διάρκεια της νύχτας. Σύμφωνα με τους μετεωρολόγους, το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε τρεις καταστάσεις: ασταθές, ουδέτερο, και σταθερό. Στις περιπτώσεις όπου η μεταβολή της θερμοβαθμίδας είναι αρνητική, π.χ. η θερμοκρασία του αέρα αυξάνεται με καθ' ύψος τότε εμφανίζεται το φαινόμενο τις θερμοκρασιακής αναστροφής.

Η κατάταξη του γίνεται με βάση την επίδραση μίας στοιχειώδης μάζας αέρα που έχει μετατοπιστεί αδιαβατικά κατακόρυφα. Έστω ότι η στοιχειώδης μάζα αέρα όπως φαίνεται στο Σχήμα 1, βρίσκεται σε συγκεκριμένο ύψος και έχει την ίδια θερμοκρασία με αυτή του περιβάλλοντος αέρα. Εάν η πυκνότητα της στοιχειώδης μάζας αέρα είναι μικρότερη από του περιβάλλοντος ($\rho_p < \rho_e$ ή $T_p > T_e$), τότε στη στοιχειώδη μάζα θα αναπτυχθούν ανωστικές δυνάμεις και η κατάσταση της ατμόσφαιρας χαρακτηρίζεται ως ασταθής. Εάν η πυκνότητα της στοιχειώδης μάζας είναι μικρότερη από τον αέρα του την περιβάλλει ($\rho_p > \rho_e$ ή $T_p < T_e$), τότε μετακινείται σε χαμηλότερο ύψος. Στην παραπάνω περίπτωση η κατάσταση της ατμόσφαιρας είναι ευσταθής. Στην περίπτωση όπου η θερμοκρασία που περιβάλλει την στοιχειώδη μάζα αέρα είναι ίδια, τότε η στοιχειώδης μάζα διατηρεί την αρχική της ταχύτητα και η κατάσταση της ατμόσφαιρας θεωρείται ουδέτερη.



Σχήμα 1: Οι καταστάσεις της ατμόσφαιρας καθώς και μαζί με ανάλογες παραστάσεις μηχανικής ισορροπίας σφαιριδίου.

Τα παραπάνω κριτήρια μπορούν να εκφραστούν μαθηματικά και ως εξής:

$$\text{Ασταθής: } \frac{\partial T_e}{\partial z} < -\frac{0.98^\circ\text{C}}{100} m$$

$$\text{Ουδέτερη: } \frac{\partial T_e}{\partial z} = -\frac{0.98^\circ\text{C}}{100} m$$

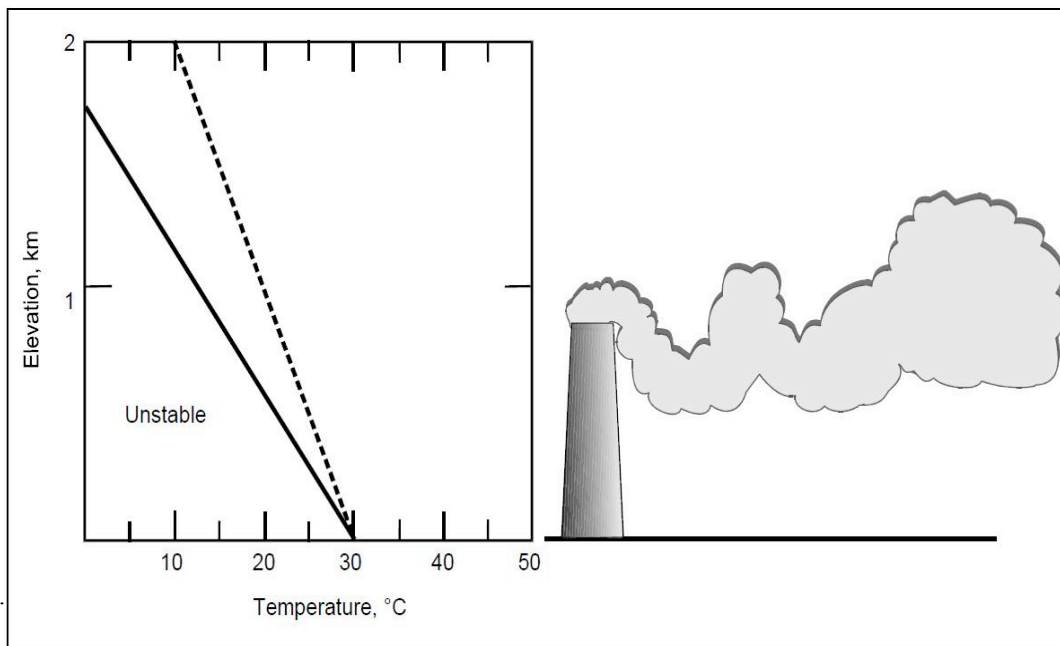
$$\text{Ευσταθής: } \frac{\partial T_e}{\partial z} > -\frac{0.98^\circ\text{C}}{100} m$$

Συνήθως, το κριτήριο αστάθειας ικανοποιείται μόνο εντός 100 m από το έδαφος σε ηλιόλουστη ημέρα. Η ατμόσφαιρα είναι ουδέτερη στην περίπτωση που επικρατούν άνεμοι και νέφωση τόσο κατά την διάρκεια της ημέρα όσο και της νύχτας. Σταθερή μπορεί να θεωρηθεί κοντά στην επιφάνεια κατά την διάρκεια της νύχτας ή οποιαδήποτε στιγμή της ημέρα .

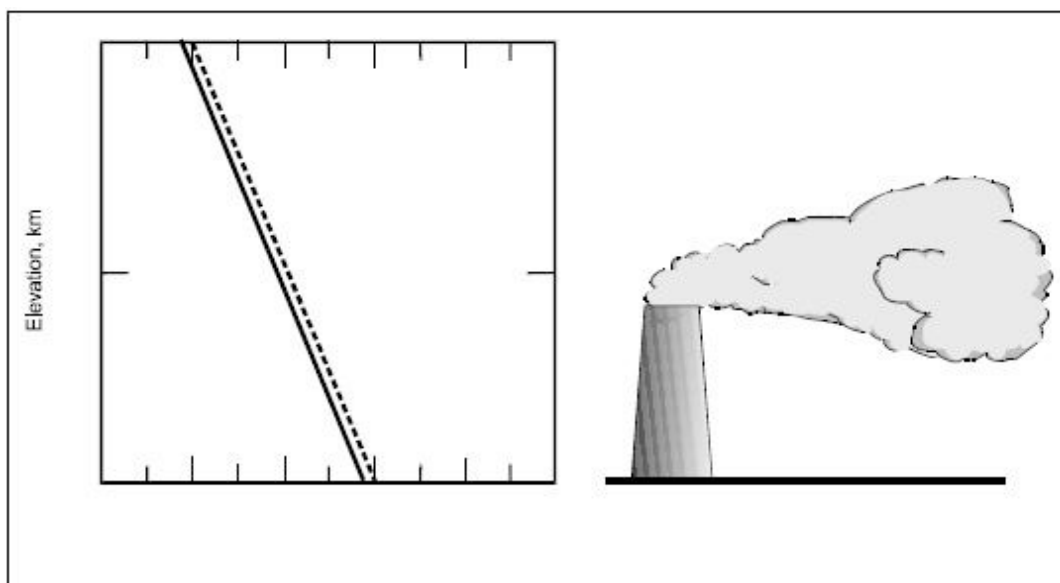
Η επίδραση της ατμοσφαιρικής ευστάθειας είναι ιδιαίτερα σημαντική για την διασπορά των τοξικών ρύπων. Όταν η ατμόσφαιρα παρατηρείται ισχυρά ασταθής, η κίνηση του πλουμιού μπορεί να χαρακτηριστεί ως μαιανδρική, όπως στο Σχήμα 2α, με αποτέλεσμα η διασπορά των ρύπων να μην είναι προβλέψιμη τόσο πλησίον όσο και αρκετά μακρύτερα από την πηγή.

Στην περίπτωση που η ατμόσφαιρα χαρακτηρίζεται ως ουδέτερη ή ελαφρά ευσταθής, το

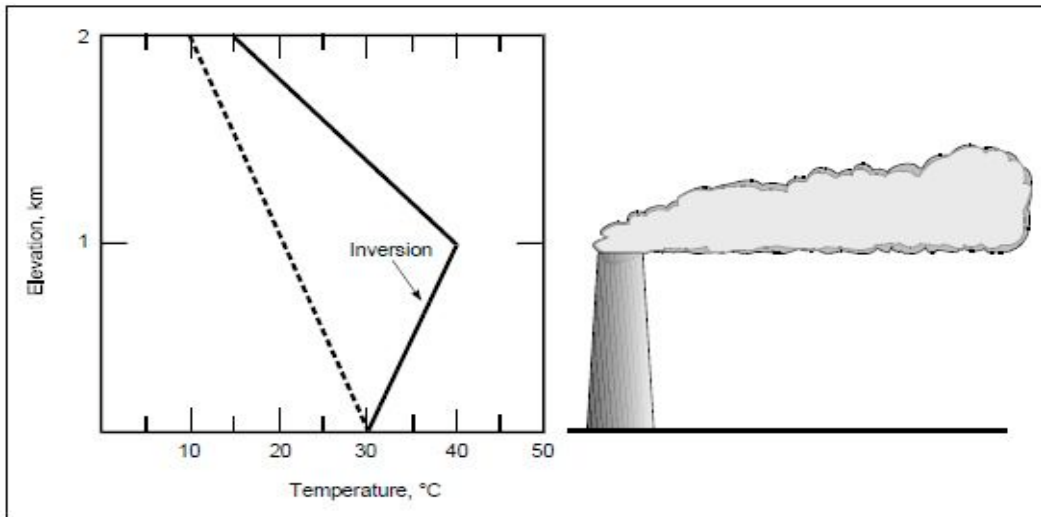
πλουμιά παίρνει ένα κωνικό σχήμα όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2β. Σε ευσταθή ατμόσφαιρα όπου πραγματοποιείται και αναστροφή, όπως στο Σχήμα 3γ, παρεμποδίζεται η κάθετη διασπορά των ρύπων με αποτέλεσμα την μεταφορά και διασπορά του σε μεγάλες αποστάσεις. Ενώ στην περίπτωση που άνωθεν της αναστροφής επικρατεί ελαφρά αστάθεια, οι ρυπαντές διαχέονται χωρίς να παρατηρούνται υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων στο επίπεδο του εδάφους πλησίον της πηγής. Τέλος στην περίπτωση όπου επικρατεί ελαφρά αστάθεια κάτω από την αναστροφή, όπως στο Σχήμα 3δ, οι τιμές των ρύπων πλησίον της πηγής στο επίπεδο του εδάφους είναι ιδιαίτερα υψηλές.



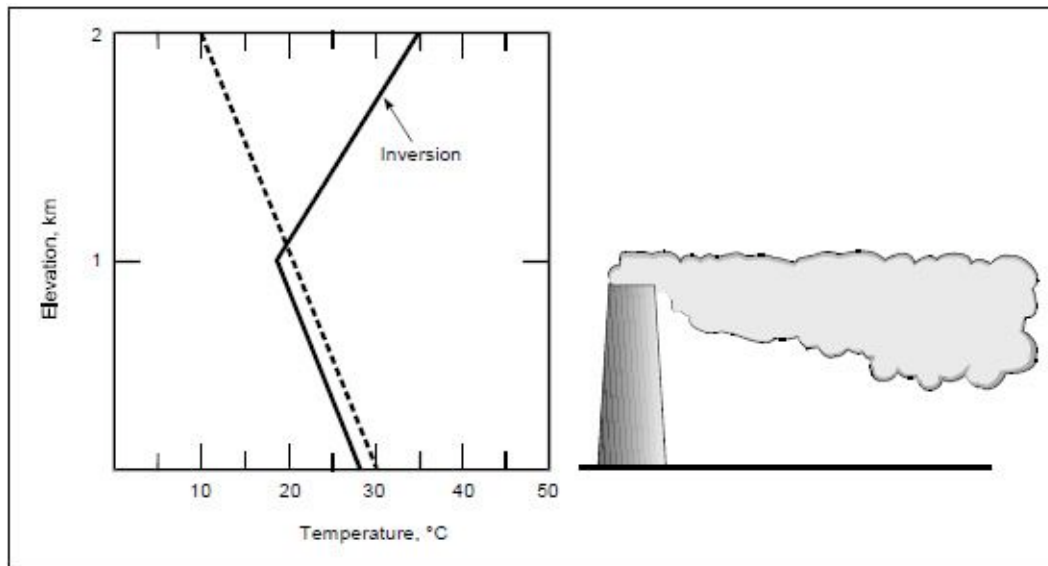
Σχήμα 2α : Έντονη αστάθεια ατμόσφαιρας



Σχήμα 2β: Ουδέτερη ή ελαφρά ευσταθής ατμόσφαιρα.



Σχήμα 2γ: Ευσταθής ατμόσφαιρα με αναστροφή.



Σχήμα 2δ: Ελαφρά αστάθεια κάτω από την αναστροφή.

Κατά την διάρκεια επικράτησης ευσταθών συνθηκών, η στοιχειώδης μάζα αέρα θα αρχίσει να εκτελεί ταλάντωση στο γύρω από επίπεδο ισορροπίας με την συχνότητα Brunt-Vaissala, n_{BV} (rad/ sec) σύμφωνα με την εξίσωση παρακάτω εξίσωση (1).

$$n_{BV} = \left[\frac{g}{T_e} \left(\frac{\partial T_e}{\partial z} + \frac{0.98^\circ\text{C}}{100 \text{ m}} \right) \right]^{1/2} = \left(\frac{g}{T_e} \frac{\partial \theta_e}{\partial z} \right)^{1/2} = s^{1/2} \quad (1)$$

Όπου θ , η δυναμική θερμοκρασία που ορίζεται ως $\theta = T \left(\frac{P_0}{P} \right)^{R/e}$, όπου T είναι η θερμοκρασία, R παγκόσμια σταθερά των αερίων, e ειδική θερμοχωρητικότητα με σταθερή πίεση, P_0 πίεσης αναφοράς, συνήθως, 1000 mb.

Η παράμετρος ευστάθειας (s) στην εξίσωση (1), είναι σημαντικός παράγοντας στον

υπολογισμό ανύψωσης του πλουμίου. Μπορεί να θεωρηθεί ανάλογος του ρυθμού μέσω του οποίου η σταθερότητα παρεμποδίζει την δημιουργία τύρβης. Η δημιουργία τύρβης, οφείλεται στις διατμητικές δυνάμεις που δημιουργούνται με ρυθμό ανάλογο του . Ο λόγος των δύο αυτών μηχανισμών ονομάζεται αριθμός Richardson (Ri) και η εξίσωση του είναι η παρακάτω:

$$Ri = \frac{g}{T} \frac{\left(\frac{\partial z}{\partial \theta}\right)}{\left(\frac{\partial z}{\partial u}\right)^2} = \frac{s}{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2} \quad (2)$$

Όπως φαίνεται και στην εξίσωση (2), η παράμετρος ευστάθειας Ri μας δίνει περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση της τύρβης στην ατμόσφαιρα σε σύγκριση με τον παράγοντα ευστάθειας s. Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί πως η κατάσταση της τύρβης στην ατμόσφαιρα είναι παράγοντας που επηρεάζει άμεσα την διασπορά ρύπων.

3.4 Κατηγορίες ευστάθειας της ατμόσφαιρας

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η ευστάθεια της ατμόσφαιρας χαρακτηρίζεται από τη θερμοβαθμίδα της ατμόσφαιρα σε διάφορα ύψη. Επειδή καθ' ύψος μετρήσεις της θερμοκρασίας δεν είναι δυνατόν να γίνονται συστηματικά ως μετεωρολογικές μετρήσεις ρουτίνας. Γι' αυτό κατόπιν συστηματικών συσχετίσεων που έχουν αναπτυχθεί μεταξύ μετεωρολογικών μετρήσεων ρουτίνας (ταχύτητα ανέμου σε ύψος 10 m από την επιφάνεια, ένταση ηλιακής ακτινοβολίας, νέφωση) και κατάσταση ευστάθειας ατμόσφαιρας, δημιουργήθηκε η μέθοδος προσδιορισμού ευστάθειας ατμόσφαιρας Pasquill. Η μέθοδος αυτή παρουσιάστηκε από τους Pasquill et al. (1961) και εν συνεχεία υπέστη κάποιες τροποποιήσεις από διάφορους ερευνητές με αποτέλεσμα να συναντάται στην βιβλιογραφία και ως μέθοδος Pasquill - Gifford και Pasquill- Turner.

Η μέθοδος Pasquill αν και έχει μειονεκτήματα, όπως ότι οι κατηγορίες ευστάθειας περιέχουν μόνο μια ποιοτική μεταβλητή και πως τα αποτελέσματα της βασίζονται σε μεγάλο βαθμό από τις ιδιαίτερες συνθήκες της υπό μελέτη περιοχής. Εντούτοις, συνεχίζουν να αποτελούν τη δημοφιλέστερη μέθοδο προσδιορισμού των συνθηκών ευστάθειας της ατμόσφαιρας σε μοντέλα που χρησιμοποιούνται για ρυθμιστικούς σκοπούς ρύπανσης. Ο κυριότερος λόγος είναι η απλότητα της μεθόδου, η περιορισμένη ανάγκη σε στοιχεία εισαγωγής, καθώς και η συσσωρευμένη εμπειρία στην χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου.

Στους παρακάτω πίνακες εμφανίζεται η κατάταξη των κατηγοριών ευστάθειας καθώς η κατάταξη αυτών σε ομάδες σύμφωνα με τις ταχύτητες του ανέμου στην επιφάνεια του εδάφους, ημερήσια ηλιοφάνεια, και της νέφωσης που επικρατεί την νύχτα.

Οι κατηγορίες ευστάθειας της ατμόσφαιρας σε σχέση με τις καιρικές συνθήκες χωρίζεται σε επτά κατηγορίες, οι οποίες διακρίνονται στο Πίνακα 6:

Πίνακας 6: Κατηγορίες ευστάθειας της ατμόσφαιρας κατά Pasquill (Μπεργελές, 2006)

Κατηγορία ευστάθειας	Συνθήκες
A	Πολύ ασταθείς συνθήκες
B	Μέτρια ασταθείς συνθήκες
C	Ελαφρά ασταθείς συνθήκες
D	Ουδέτερες συνθήκες*
E	Ελαφρά ευσταθείς συνθήκες
F	Μέτρια ευσταθείς

* Ισχύει υπό συνθήκες πυκνής νέφωσης τόσο κατά την διάρκεια της ημέρας όσο και της νύχτας.

Πίνακας 7: Ταξινόμηση κατηγορίας ευστάθειας ατμόσφαιρας κατά Pasquill με βάση τις μετεωρολογικές συνθήκες (Μπεργελές, 2006).

Ημέρα				Νύχτα**	
Άνεμος επιφανείας σε ύψος 10m (m/s)	Ισχυρή Ηλιοφάνεια	Μέση Ηλιοφάνεια	Ελαφρά Ηλιοφάνεια	Ελαφρά νέφωση >4/8	Νέφωση*** <3/8
<2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

** Νύχτα χαρακτηρίζεται γενικά η περίοδος 1 ώρα πριν την δύση μέχρι 1 ώρα μετά την ανατολή.

*** Ως βαθμός νέφωσης ορίζεται το κλάσμα του ουρανού πάνω από το τοπικό ορίζοντα που καλύπτεται από νέφωση.

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα προκύπτει πως κατά την διάρκεια της νύχτας η κατάσταση της ατμόσφαιρας είναι ευσταθής ή ουδέτερη, ενώ ο βαθμός έχει άμεση σχέση με το βαθμό της νέφωσης. Κατά την διάρκεια της ημέρας η ηλιακή ακτινοβολία παίζει σημαντικό ρόλο στην κατάσταση ευστάθειας της ατμόσφαιρας για ταχύτητες ανέμου μέχρι 5 m/s. Ενώ για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερης των 6 m/s, η κατάσταση της ατμόσφαιρας μπορεί να θεωρείται ουδέτερη. Εφόσον υπάρχουν μετρήσεις θερμοκρασίας καθ' ύψος, οι κατηγορίες μπορούν να αντιστοιχηθούν με τις τιμές θερμοβαθμίδων όπως στον φαίνεται και στον Πίνακα 8.

Πίνακας 8: Ταξινόμηση κατηγορίας ευστάθειας της ατμόσφαιρας με βάση τον αριθμό Richardson και την θερμοβαθμίδα (Μπεργελές, 2006).

Κατηγορία Ευστάθειας	Θερμοβαθμίδα (C°/100m)	Ri (αριθμός Richardson στα 2 m από το έδαφος)
Κατηγορία A	$dT/dz < -1.9$	-0.9
Κατηγορία B	$-1.9 < dT/dz < -1.7$	-0.5
Κατηγορία C	$-1.7 < dT/dz < -1.5$	-0.15
Κατηγορία D	$-1.5 < dT/dz < 0.5$	0
Κατηγορία E	$-0.5 < dT/dz < 1.5$	0.4
Κατηγορία F	$1.5 < dT/dz < 4$	0.8
Κατηγορία G	$4 < dT/dz$	1

Κεφάλαιο 4: Διασπορά πλουμίου και περιγραφή του φαινομένου

4.1 Εισαγωγή

Ένα φυσικό πρόβλημα, που περιγράφεται από ένα σύνολο μερικών διαφορικών εξισώσεων και βοηθητικών σχέσεων (αρχικές και οριακές συνθήκες), είναι καλώς τοποθετημένο εάν ισχύουν οι ακόλουθες τρεις συνθήκες (Μαρκάτος και Ασημακόπουλος, 1995):

- Υπάρχει λύση.
- Η λύση είναι μοναδική.
- Η λύση εξαρτάται με συνεχή τρόπο από τις βοηθητικές σχέσεις.

Η μη-μοναδικότητα της λύσης συνήθως οφείλεται στην αποτυχία της σωστής σύνδεση των οριακών συνθηκών με τον τύπο της διαφορικής εξίσωσης. Γενικά, ο υποπροσδιορισμός των οριακών συνθηκών οδηγεί σε μη-μοναδικές λύσεις ενώ ο υπερπροσδιορισμός των οριακών συνθηκών οδηγεί σε αφύσικες λύσεις κοντά στα όρια. Το φαινόμενο της ύπαρξης πολλαπλών λύσεων, όταν αναμένεται λόγω της φυσικής του προβλήματος, παρουσιάζεται στις περιπτώσεις μετάβασης από τη στρωτή στην τυρβώδη ροή. Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ πως για η τρίτη συνθήκη απαιτεί ότι μία μικρή μεταβολή στις αρχικές ή οριακές συνθήκες θα πρέπει να προκαλεί μια πεπερασμένη μεταβολή στη λύση.

4.2 Περιγραφή του φυσικού φαινομένου της παρούσας εργασίας

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, η διασπορά τοξικών ρύπων από πυρκαγιά σε δεξαμενές έχει απασχολήσει την επιστημονική κοινότητα, για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων καθώς και τις επιπτώσεις που δύναται να υπάρξουν στην υγεία του ανθρώπου. Οι σημαντικότεροι παράγοντες στη διασπορά τοξικών ρύπων από πυρκαγιά σε δεξαμενές μπορούν να συνοψισθούν στους παρακάτω:

- Ανωστική ροή πλουμίου
- Ύπαρξη γειτονικών πλουμίων και άλλων θερμικών πηγών.
- Ταχύτητα ανέμου
- Ευστάθεια ατμόσφαιρας
- Τοπογραφικό ανάγλυφο/χαρακτηριστικά περιοχής

Για τον καθορισμό της μέγιστης συγκέντρωσης τοξικών ρύπων στο επίπεδο του εδάφους, ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο διαδραματίζει ο παράγοντας της ανύψωσης του πλουμίου και πιο συγκεκριμένα η τελική ανύψωση (οριζοντίωση). Η οριζόντια κίνηση του πλουμίου εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου. Η κατακόρυφη κίνηση και διαπλάτυνση του πλουμίου καθορίζεται από την άνοση αλλά και από την ταχύτητα του ανέμου και εξαρτάται από την κατανομή της πυκνότητας εντός του πλουμίου και της ατμοσφαιρικής στρωματοποίησης (Ghoniem, 1993). Τυπικά η πυκνότητα του πλουμίου, το οποίο ορίζεται ως το μείγμα τέλειων προϊόντων καύσης, καθορίζεται από τη θερμοκρασία και τη συγκέντρωση καπνού. Οι τιμές των δύο αυτών συνιστωσών παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις κατά την διάρκεια της άνοσης του πλουμίου καθώς γίνεται η μείξη του πλουμίου που βρίσκεται με τον περιβάλλοντα αέρα. Στην περίπτωση των πολλαπλών πλουμίων αυτά αντιμετωπίζονται ως ένα μεγαλύτερο πλούμιο κατά αναλογία με την υπέρθεση των κυμάτων. Σύμφωνα με τους Trelles et al. (1999), ως ανεξάρτητο ορίζεται το πλούμιο του οποίο πεδίο όπου κινείται αλλά και η θερμική του πηγή δεν υπερκαλύπτεται από άλλο. Όταν μία από τις δύο περιπτώσεις δεν συμβαίνει τότε το πλούμιο αντιμετωπίζεται ως ένα ενιαίο το οποίο αποτελεί συμβολή των ανεξάρτητων. Στις περιπτώσεις πυρκαγιάς σε δεξαμενές καυσίμων, το παραγόμενο πλούμιο επηρεάζεται άμεσα από την ένταση της πυρκαγιάς η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από την επιφάνεια της δεξαμενής και την καιόμενη καύσιμη ύλη. Καθώς το καύσιμο φλέγεται, το πλούμιο που δημιουργείται έχει πολύ μεγάλη αρχική θερμοκρασία. Κατά την άνοδο του, η θερμοκρασία του πλουμίου μειώνεται με αποτέλεσμα σε συγκεκριμένο ύψος να γίνεται ανωστικά σταθερό, και καθώς ψύχεται οδηγεί στην αύξηση της πυκνότητας, και κατά συνέπεια στην κάθοδο του. Ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στο μέγιστο ύψος ανύψωσης του καπνού-πλουμίου διαδραματίζει η ταχύτητα του ανέμου. Στην περίπτωση υψηλής ταχύτητας ανέμου, η διασπορά των τοξικών ρύπων θα γίνει σε σχετικά κοντινές αποστάσεις αλλά με υψηλότερη συγκέντρωση. Αυτό συμβαίνει καθώς η ροή του ανέμου αναγκάζει το πλούμιο να έρπει σε μικρό ύψος από την επιφάνεια που οδηγεί στην καθίζηση των ρύπων συντομότερα. Ενώ στην περίπτωση που η ταχύτητα του αέρα είναι σχετικά μικρή, οι ανωστικές δυνάμεις κυριαρχούν με αποτέλεσμα η συγκέντρωση ρύπων κοντά στην πηγή να είναι μικρή και να αυξάνεται έπειτα από κάποια απόσταση. Αξίζει εδώ να αναφερθεί και η περίπτωση όπου οι τοξικοί ρύποι να διασπαρθούν σε πολύ μικρή ποσότητα και χωρίς καμία ιδιαίτερη περιβαλλοντική επίδραση στην γύρω περιοχή. Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή συνέβη στο B.A.M.E του Buncfield. Αυτό συνέβη καθώς η πυρκαγιά ήταν τέτοιας έντασης, με αποτέλεσμα το παραγόμενο πλούμιο να φθάνει σε μεγάλο υψόμετρο, χωρίς την ιδιαίτερη επίδραση του ανέμου, και να εγκλωβίζεται πάνω από το Α.Ο.Σ σε ψυχρότερο και σταθερότερο ατμοσφαιρικό στρώμα.

Για την περίπτωση της συνένωσης δύο ή και περισσότερων πλουμίων από διαφορετικές πυρκαγιές η τελική διασπορά πέρα των παραπάνω που αναφέρθηκαν, επηρεάζεται άμεσα και από τη θέση των πηγών αλλά και το σημείο όπου πραγματοποιείται η ένωση των δύο ανεξάρτητων πλουμίων.

Για να γίνει ευκολότερη κατανόηση θα παρουσιαστούν δύο περιπτώσεις ενός υποθετικού πεδίου ροής στο οποίο οι δύο δεξαμενές βρίσκονται σε στοίχιση και μεταβάλλεται μόνο η διεύθυνση του εισερχόμενου ανέμου. Στην περίπτωση όπου η κατεύθυνση του ανέμου εισέρχεται έτσι ώστε η ροή να μην βρίσκει και τα δύο παραγόμενα πλούμια ταυτοχρόνος, ο βαθμός με τον οποίο θα επηρεάζεται το παραγόμενο πλούμιο (μέχρι το σημείο σύζευξή τους) της δεύτερης σε σειρά δεξαμενής είναι αρκετά μικρότερο εν αντιθέσει με την περίπτωση όπου ο άνεμος βρίσκει και τις δύο δεξαμενές ταυτοχρόνος. Αυτό συμβαίνει καθώς μεγάλο μέρος της κινητικής ενέργειας του εισερχόμενου ανέμου απορροφάται από το πλούμιο που δημιουργείται από την πρώτη δεξαμενή. Πιο πρακτικά θα μπορούσε να ειπωθεί πως το δεύτερο πλούμιο, μέχρι το σημείο της πλήρης σύζευξής του με το πρώτο και μέχρι κάποιο ύψος, αναπτύσσεται σε συνθήκες μικρότερης έντασης ανέμου. Στην αντίθετη περίπτωση, όπου ο εισερχόμενος άνεμος συναντά ταυτοχρόνος τις στοιχισμένες δεξαμενές, θα ενισχυθεί η διαπλάτυνση και διασπορά του πλουμίου ως προς το πλάτος του πεδίου ενώ, στο μέσο της απόστασης μεταξύ των δύο δεξαμενών και σε μεγάλη απόσταση κατά μήκος του πεδίου θα δημιουργηθεί μία ζώνη συνεχής μείξης και αλληλεπίδρασης των δύο πλουμίων μέσω των εξωτερικών δινών που σχηματίζονται κατά την ανάπτυξη του κάθε πλουμίου ξεχωριστά. Σε αυτή την περίπτωση το μέγιστο ύψος του πλουμίου θα είναι χαμηλότερο από το αντίστοιχο της προηγούμενης περίπτωσης αλλά στο ενδιάμεσο της απόστασης των δύο δεξαμενών θα παρατηρείται αυξημένη συγκέντρωση. Τέλος, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η απόσταση μεταξύ των φλεγόμενων δεξαμενών λόγω της αλληλεπίδρασης των θερμικών πηγών και των καπνού πλουμίου. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η μείξη του καπνού με τον περιβάλλοντα αέρα συμβαίνει λόγω της θερμικής τους διαφοράς αλλά και της πυκνότητας του ατμοσφαιρικού αέρα. Με αυτό το τρόπο η απόσταση μεταξύ τους οδηγεί το πλούμιο στην παραμονή του και ταυτόχρονη ψύξη για κάποιο χρονικό διάστημα (αναλόγως της απόστασης), προτού κυριαρχήσουν οι ανωστικές δυνάμεις ξανά λόγω της θερμικής πηγής που θα συναντήσει.

4.3 Γεωμετρία προβλήματος - Γεωμετρία πεδίου ροής και δεξαμενών

4.3.1 Πεδίο ροής αριθμητικής προσομοίωσης

Το πεδίο ροής στο οποίο γίνεται η αριθμητική προσομοίωση του φυσικού προβλήματος είναι τρισδιάστατο με τις εξής διαστάσεις: μήκος 34521 m (άξονας z), πλάτος 1200 m (άξονας x) και ύψος 3000 m (άξονας y) ενώ η ροή του εισερχόμενου ανέμου γίνεται ως προς τον άξονα z.

Για να είναι ευκολότερο να κατανοηθούν οι διάφορες φάσεις κατά την εξέλιξη του φαινομένου καθώς και για μπορέσει να ορισθεί ο συνολικός αριθμός αριθμών των κελιών, το πεδίο ροής διαιρείται σε περιοχές (regions). Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η πύκνωση των γραμμών του αριθμητικού πλέγματος στις περιοχές (regions) όπου υπάρχουν μεγάλες κλίσεις των εξαρτημένων μεταβλητών. Οι περιοχές όπου συμβαίνει αυτό είναι στην περιοχή μεταξύ των τοιχείων (bund walls) της κάθε δεξαμενής, της περιοχής πάνω από την κάθε δεξαμενή, και στην περιοχή μεταξύ των δύο δεξαμενών. Το πεδίο διαιρείται σε 4485600 κελιά / όγκους ελέγχου μη ομοιόμορφης κατανομής καθώς όπως αναφέρθηκε σε ορισμένες περιοχές απαιτείται πύκνωση. Το μήκος του πεδίου ροής (Άξονας z) υποδιαιρείται σε 17 περιοχές (regions) στις οποίες ευρίσκονται συνολικά 346 κελιά, το πλάτος του πεδίου (Άξονας x) υποδιαιρείται σε 5 περιοχές (regions) στις οποίες ευρίσκονται συνολικά 70 κελιά και τέλος το ύψος του πεδίου ροής (Άξονας y) το οποίο υποδιαιρείται σε 10 περιοχές (regions) όπου συνολικά υπάρχουν 180 κελιά. Αναλυτικότερα για τις περιοχές που έχει διαιρεθεί το πεδίο αριθμητικής ροής ως καθώς και οι συντελεστές πύκνωσης κάθε περιοχής για το μήκος, πλάτος αλλά και ύψος απεικονίζεται στους Πίνακα 9, Πίνακα 10 και Πίνακα 11 αντίστοιχα.

Πίνακας 9: Διαίρεση του πεδίου ροής ως προς τον άξονα z σε περιοχές καθώς και οι συντελεστές πύκνωσης του πλέγματος στις αντίστοιχες περιοχές.

Regions	NZ1	NZ2	NZ3	NZ4	NZ5	NZ6
Συντελεστής πύκνωσης	-1.6	1.0	1.4	1.0	-1.4	1.0
Αριθμός κελιών	20	1	18	20	18	1
Regions	NZ7	NZ8	NZ9	NZ10	NZ11	NZ12
Συντελεστής πύκνωσης	-1.5	1.0	1.4	1.0	-1.4	1.0
Αριθμός κελιών	18	1	18	20	18	1
Regions	NZ13	NZ14	NZ15	NZ16	NZ17	
Συντελεστής πύκνωσης	1.5	1.5	1.5	1.5	1.6	
Αριθμός κελιών	12	22	44	55	59	

Πίνακας 10: Διάρθρωση του πεδίου ροής ως προς τον άξονα y σε περιοχές καθώς και οι συντελεστές πυκνώσεως του πλέγματος.

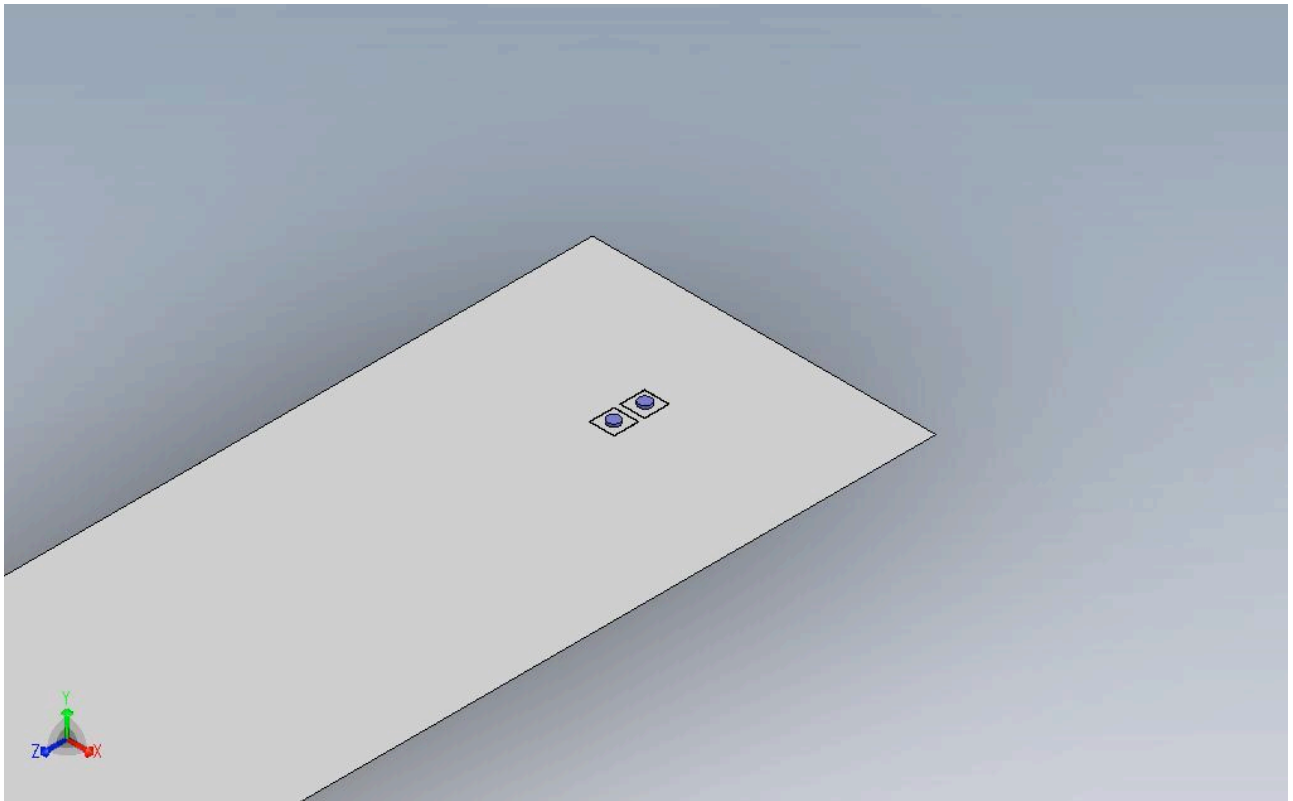
Regions	NY1	NY2	NY3	NY4	NY5	NY6
Συντελεστής πυκνώσεως	1.3	1.2	1.3	1.2	1.2	1.2
Αριθμός κελιών	4	10	16	16	14	15
Regions	NY7	NY8	NY9	NY10		
Συντελεστής πυκνώσεως	1.2	1.2	1.3	1.3		
Αριθμός κελιών	15	15	32	43		

Πίνακας 11: Διάρθρωση του πεδίου ροής ως προς τον άξονα του x καθώς και οι συντελεστές πυκνώσεως τους πλέγματος.

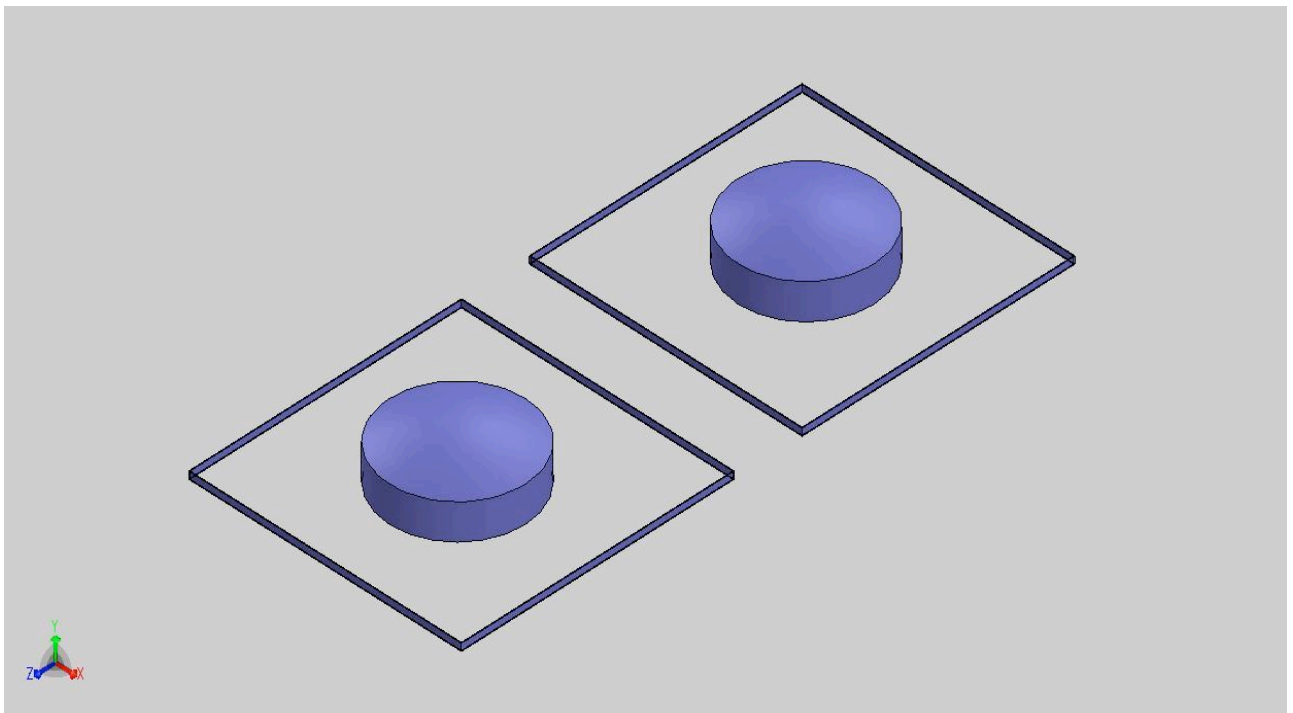
Regions	NX1	NX2	NX3	NX4	NX5
Συντελεστής πυκνώσεως	-1.3	-1.4	1.0	1.4	1.0
Αριθμός κελιών	28	21	1	10	10

4.3.2 Γεωμετρία πεδίου ροής και δεξαμενών

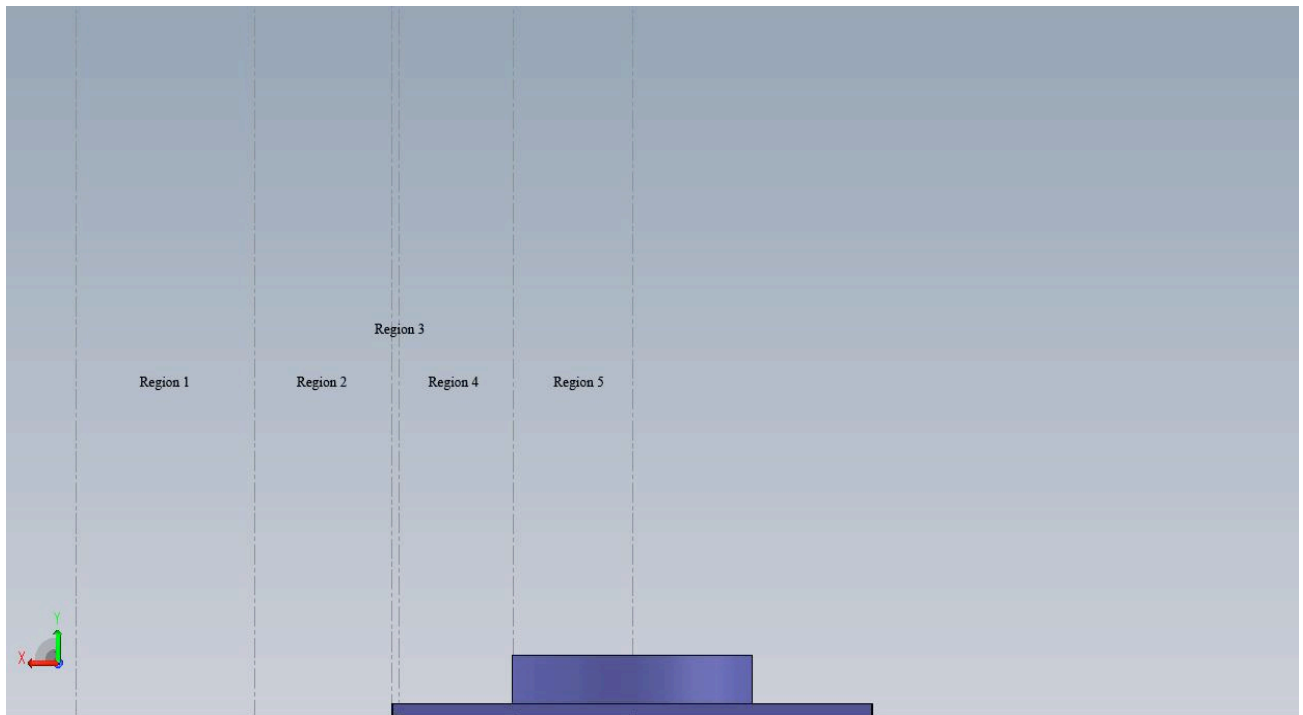
Στις Εικόνες 13 έως και 23 απεικονίζεται η γεωμετρία του πεδίου ροής για την περίπτωση δύο δεξαμενών ίδιας διαμέτρου, 85 m, που έγινε με χρήση του σχεδιαστικού προγράμματος SolidWorks. Η απόσταση μεταξύ των τοιχιών των δύο δεξαμενών, καθώς και η απόσταση της κάθε δεξαμενής με την εσωτερική πλευρά των τοιχιών είναι συναρτήσει των διαμέτρων των δεξαμενών που εξετάζονται και είναι ίσο με το μισό αυτής. Δηλαδή στην προκειμένη περίπτωση η απόσταση που τις διαχωρίζει (buffer zone) μεταξύ τους είναι 42.5 m. Το πάχος των τοιχιών της κάθε δεξαμενής είναι ίσο με 0.5 m.



Εικόνα 13: Ισομετρική απεικόνιση μέρους του πεδίου ροής όπου διακρίνονται οι δύο δεξαμενές.



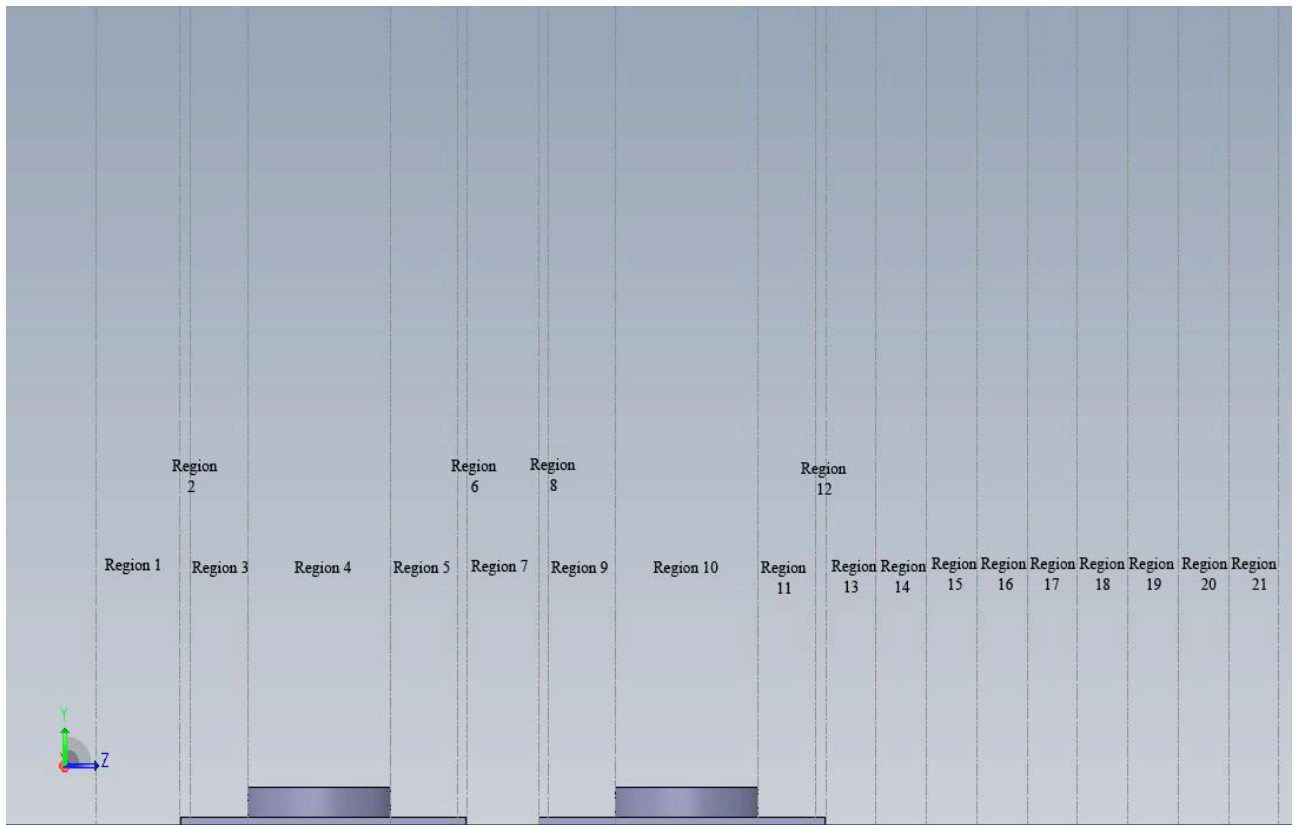
Εικόνα 14: Ισομετρική απεικόνιση της γεωμετρίας των δύο δεξαμενών.



Εικόνα 15: Απεικόνιση της πρόοψης των δύο δεξαμενών καθώς και των περιοχών που έχει διαιρεθεί το πλάτος του πεδίου ροής.



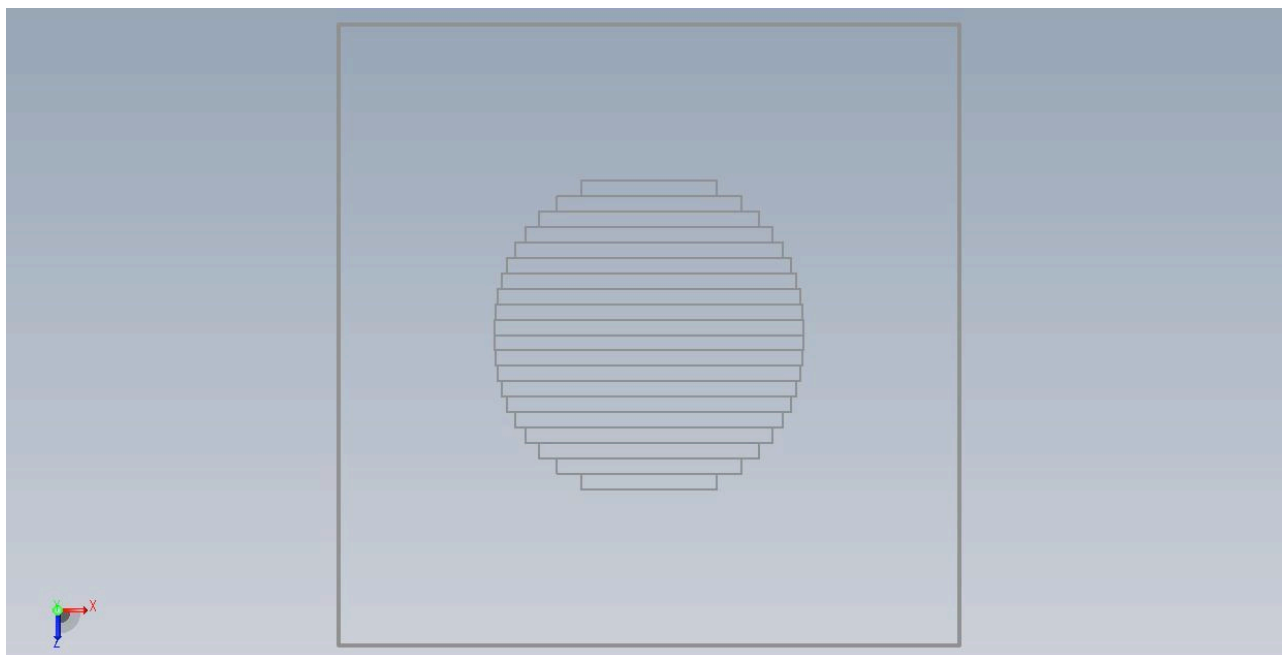
Εικόνα 16: Απεικόνιση της πρόοψης των δύο δεξαμενών καθώς και ο διαχωρισμός σε περιοχές (regions) ως προς το ύψος του πεδίου ροής.



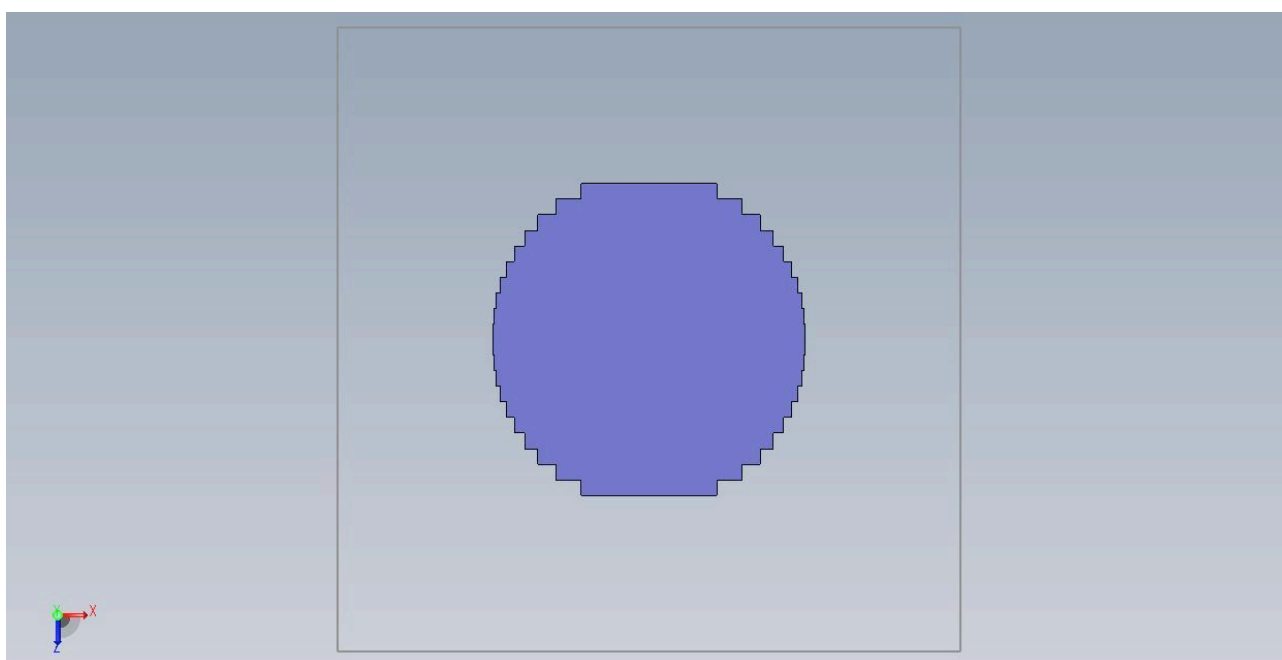
Εικόνα 17: Απεικόνιση της πλάγιας όψης των δύο δεξαμενών καθώς και ο διαχωρισμός του πεδίου ροής σε περιοχές (regions).

4.4.3 Γεωμετρία όρου πηγής ρύπων – πυρκαγιάς

Ο όρος πηγής των ρύπων στην παρούσα προσομοίωση επιφάνεια τις είναι η επιφάνεια των δεξαμενών. Η γεωμετρία αυτή είναι γίνεται με τετραγωνοποίηση της επιφάνειας της δεξαμενής όπως απεικονίζεται στις Εικόνες 22 και 23. Η επιφάνεια της κάθε δεξαμενής διαιρείται σε παραλληλόγραμμα ίσου πλάτους αλλά διαφορετικού μήκους και τα 296 κελιά που «περιλαμβάνονται» στον συγκεκριμένο χώρο αντιμετωπίζονται ως όροι πηγής. Έτσι το σύνολο των κελιών που λαμβάνονται στο πεδίο ως όροι πηγής είναι 592.



Εικόνα 18: Κάτοψη του σχεδίου της επιφάνειας δεξαμενής που αποτελεί τον όρο πηγής καθώς και η περιοχή της επιφάνειας η οποία καθορίζεται ως όρος πηγής..



Εικόνα 19: Κάτοψη της επιφάνειας του όρου πηγής όπως απεικονίζεται μετά την τετραγωνοποίηση.

Κεφάλαιο 5: Μαθηματικό υπόβαθρο – μαθηματική προσομοίωση προβλήματος

5.1 Εισαγωγή

Η αριθμητική προσομοίωση των φαινομένων μεταφοράς γίνεται δυνατή με την αποτύπωση σε μαθηματική μορφή, σε μορφή διαφορικών εξισώσεων, των νόμων που διέπουν τα φαινόμενα αυτά. Οι διαφορικές εξισώσεις εκφράζουν απλώς μια αρχή διατήρησης για κάποια φυσική ποσότητα. Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης, σε ένα χώρο συντεταγμένων Euler η αρχή διατήρησης μιας φυσικής ποσότητας Φ , θα έχει την μορφή:

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

Συνεπώς, οι όροι της διαφορικής εξίσωσης ορίζουν κάποια δράση ανά μονάδα όγκου, με τρόπο ώστε το άθροισμα τους να συνεπάγεται ένα ισοζύγιο.

Η φυσική ποσότητα που διατηρείται, αποτελεί την εξαρτημένη μεταβλητή της εξίσωσης διατήρησης η οποία και εκφράζει την ισορροπία των διαφορικών παραγόντων που επηρεάζουν αυτή τη μεταβλητή. Συνήθως, στις εξισώσεις διατήρησης η εξαρτημένη μεταβλητή εκφράζεται ως ειδικές ποσότητες, δηλαδή ανηγμένες στη μονάδα μάζας ποσότητες όπως κλάσμα μάζας (μάζα συστατικού ως προς τη μάζα μίγματος), ταχύτητα (ορμή ανά μονάδα μάζας), ειδική ενθαλπία.

5.2 Ταξινόμηση διαφορικών εξισώσεων

Οι γραμμικές (γενικότερα οι ημι-γραμμικές) μερικές διαφορικές εξισώσεις κατατάσσονται μαθηματικά σε τρεις βασικές κατηγορίες (Μαρκάτος, 1995, Patankar (1980), Malalasekera (1995), Μπεργελές 2006).

- Ελλειπτικού τύπου
- Παραβολικού τύπου
- Υπερβολικού τύπου

Τα περισσότερα προβλήματα μεταφοράς μπορούν να εκφραστούν σε μια από τις παραπάνω απλοποιημένες μορφές. Η ταξινόμηση αυτή βοηθά στην εκλογή της μεθόδου μετατροπής της διαφορικής εξίσωσης στο μη-συνεχές αριθμητικό πρόβλημα καθώς και στην επιλογή του κατάλληλου αλγόριθμου επίλυσης.

Ο τύπο της διαφορικής εξίσωσης:

$$a \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + 2b \frac{\partial \varphi}{\partial x \partial y} + c \frac{\partial \varphi}{\partial y^2} + d \frac{\partial \varphi}{\partial x} + e \frac{\partial \varphi}{\partial y} + f \varphi = g \quad (7)$$

όπου a, b, c, d, e, f και g είναι συναρτήσεις των $x, y, \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \frac{\partial \varphi}{\partial y}$ και καθορίζεται από τους όρους με την μεγαλύτερη τάξης παράγωγο. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι οι εξισώσεις που εκφράζουν ένα πεδίο ροής δεν είναι γραμμικές αλλά για την αριθμητική επίλυση του, συνήθως είναι η γραμμικοποίησή τους με την παραδοχή ότι το πεδίο ταχυτήτων είναι γνωστό σ' ένα ορισμένο στάδιο επίλυσης των εξισώσεων. Με αυτό το τρόπο ακόμα και αν κάποιοι ή όλοι συντελεστές είναι συναρτήσεις του φ ή και των παραγώγων του να μπορεί να θεωρούνται πρόσκαιρα γνωστές ποσότητες, συναρτήσεις μόνον των x και y .

Στην παραπάνω διαφορική εξίσωση επίδραση έχουν μόνο οι συντελεστές των παραγώγων δευτέρας τάξης a, b, c και οι ρίζες τις. Λαμβάνοντας τα παραπάνω υπόψιν η εξίσωση ονομάζεται:

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

Η παραπάνω ταξινόμηση μπορεί να γίνει και στις περιπτώσεις που οι συντελεστές a, b, c είναι συναρτήσεις των x και y ή στη περίπτωση όπου η εξίσωση είναι μη γραμμική. Θα πρέπει να σημειωθεί πως τύπο τις εξίσωσης είναι δυνατόν να αλλάζει αναλόγως του πεδίου λύσης λόγω της εξάρτησής από την σχέση.

Στην περίπτωση ελλειπτικού τύπου, η αρχική διαφορική εξίσωση μετασχηματίζεται με χρήση των μετασχηματισμών (1) και (2):

$$y - \lambda_1 x = \xi + i\eta \quad (1)$$

$$y - \lambda_2 x = \xi - i\eta \quad (2)$$

όπου λ_1, λ_2 οι ρίζες του τριωνύμου $a\lambda^2 - 2b\lambda + c$ και i η μιγαδική μονάδα, στην απλούστερη μορφή:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2}{\partial \eta^2} + \kappa \varphi = h(\xi, \eta) \quad (8)$$

Στην περίπτωση εξισώσεων παραβολικού τύπου, η αρχική διαφορική εξίσωση μετατρέπεται με χρήση των μετασχηματιστών:

$$y - \lambda = -\eta \quad (9)$$

$$ay - b\lambda = \xi \quad (10)$$

όπου a και b σταθερές τέτοιες ώστε η Ιακωβιανή του μετασχηματισμού να μην γίνεται μηδέν και λ η διπλή ρίζα του τριωνύμου, στην ακόλουθη μορφή:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial \xi^2} + \frac{\partial \varphi}{\partial \eta} = h(\xi, \eta) \quad (11)$$

Τέλος, στην περίπτωση εξισώσεων υπερβολικού τύπου, η αρχική διαφορική εξίσωση μετασχηματίζεται με χρήση των μετασχηματισμών:

$$y - \lambda_1$$

$$y - \lambda_2$$

μετατρέπεται στην παρακάτω μορφή:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \eta^2} + 2D \frac{\partial \varphi}{\partial \xi} + 2E \frac{\partial \varphi}{\partial \eta} + f_\varphi = G(\xi, \eta) \quad (14)$$

Οι διάφορες κατηγορίες των μερικών διαφορικών εξισώσεων συνδέονται, γενικά με διαφορετικούς τύπους προβλημάτων ροής. Εξισώσεις που εξαρτώνται από το χρόνο οδηγούν συνήθως σε προβλήματα παραβολικού ή υπερβολικού τύπου. Αν υπάρχουν φυσικοί μηχανισμοί σκέδασης (dissipative, π.χ. ισχυρές διατμητικές τάσεις ή θερμική αγωγή) τότε η εξίσωση θα είναι παραβολικού τύπου, ενώ ελλειπτικές εξισώσεις καθορίζουν συνήθως, προβλήματα μόνιμης κατάστασης ή ισορροπίας (Μαρκάτος, 1995). Πιο συγκεκριμένα, η ταξινόμηση των ροών, εξαρτάται από το βαθμό συμπίεστικότητας του ρευστού και κατά συνέπεια από τον αριθμό Mach (M). Στον Πίνακα 12 παρουσιάζεται η ταξινόμηση των προβλημάτων ροής.

Πίνακας 12: Ταξινόμηση ροής βάση του βαθμού συμπιεστότητας του ρευστού. (Πηγή: Versteeg και Malalasekera, 1995).

Τύπος ροής	Μόνιμη Κατάσταση	Μη-μόνιμη Κατάσταση
Ιξώδης ροή	Ελλειπτικού τύπου	Παραβολικού τύπου
Μη ιξώδης ροή	$M < 1$ Ελλειπτικού τύπου	Υπερβολικού τύπου
	$M > 1$ Υπερβολικού τύπου	
Ροή οριακού στρώματος	Παραβολικού τύπου	Παραβολικού τύπου

Επιπλέον, οι όροι παραβολική, ελλειπτική, υπερβολική διεργασία που χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση των διαφορικών εξισώσεων αντιστοιχούν επίσης και σε διαφορετικού τύπους διεργασιών, ως εξής (Μαρκάτος, 1995):

- Μια διεργασία θα λέγεται παραβολική αν υπάρχει μια τουλάχιστο συντεταγμένη, τέτοια που οι συνθήκες, σε μια δεδομένη θέση αυτής της συντεταγμένης, να επηρεάζονται από αλλαγές που συμβαίνουν μόνο από τη μια πλευρά αυτής της θέσης (μονόδρομος συντεταγμένη). Σε σχέση με τη μηχανική ρευστών, οι ροές που παρουσιάζουν μια μονόδρομη συντεταγμένη λέγονται ροές οριακού στρώματος.
- Ελλειπτικές διεργασίες είναι εκείνες στις οποίες οι συνθήκες σε δεδομένη θέση, οποιασδήποτε συντεταγμένης, επηρεάζονται από τις αλλαγές συνθηκών που συμβαίνουν σε οποιαδήποτε πλευρά αυτής της θέσης. Σε σχέση με τη μηχανική των ρευστών, οι ελλειπτικές ροές ονομάζονται και ροές επανακυκλοφορίας.
- Υπερβολικό είναι εκείνο το πρόβλημα που παρουσιάζει μια μορφή μονόδρομης συμπεριφοράς, όχι κατά μήκος των συντεταγμένων, αλλά κατά μήκος ειδικών γραμμών, των χαρακτηριστικών της διαφορικής εξίσωσης που περιγράφει το πρόβλημα.

5.3 Γενικευμένη εξίσωση μεταφοράς

Το σύνολο των εξαρτημένων μεταβλητών που χρησιμοποιούνται αλλά και συνδέονται με τα προβλήματα που ερευνά η υπολογιστική ρευστοδυναμική φαίνεται ότι υπακούουν σε μια γενικευμένη αρχή διατήρησης. Εάν η εξαρτημένη μεταβλητή ορισθεί ως Φ , η γενικευμένη διατήρηση αρχή θα έχει την μορφή (Patankar, 1980):

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\Phi\vec{u}) = \text{div}(\Gamma\text{grad}\Phi) + S_\phi \quad (15)$$

όπου Γ είναι ο συντελεστής διάχυσης, και S_ϕ ο συντελεστής όρου πηγής. Οι όροι που απαρτίζουν την γενικευμένη εξίσωση μεταφοράς είναι ο μεταβλητός όρος, ο όρος συναγωγής, ο όρος διάχυσης και ο όρος πηγής.

Η γενικευμένη εξίσωση μεταφοράς μόνιμη ροή και καρτεσιανές συντεταγμένες εκφράζεται στην μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \phi + J_{\phi,i}) = S_\phi \quad (15)$$

όπου u_j τα διανύσματα της ταχύτητας, δείκτης $j=1,2,3$, Γ ο συντελεστής διάχυσης και S ο όρος πηγής.

Η παραπάνω σχέση είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς είναι δυνατή η δημιουργία υπολογιστικών προγραμμάτων σε υπολογιστή, όπου γράφοντας γενικές οδηγίες για την επίλυση της γενικής εξίσωσης διατήρησης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν επαναληπτικά για οποιαδήποτε αριθμό εξαρτημένων μεταβλητών ϕ , απλώς και μόνο με αλλαγή των εκφράσεων \vec{j} , S και των αρχικών οριακών συνθηκών. Επομένως γίνεται δυνατή η θεμελίωση μιας γενικής μεθόδου επίλυσης και η ανάπτυξη ενός μόνο προγράμματος στον υπολογιστή για οποιαδήποτε εφαρμογή.

5.4 Εξισώσεις επίλυσης του φυσικού προβλήματος

Το αριθμητικό μοντέλο της παρούσας εργασίας, βασίζεται σε ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων ελλειπτικού τύπου. Οι εξισώσεις που διέπουν το φυσικό πρόβλημα είναι η εξίσωση συνέχειας, οι εξισώσεις ορμής (Navier-Stokes), η εξίσωση θερμότητας, η εξίσωση συγκέντρωσης χημικού είδους, η εξίσωση κινητικής ενέργειας τύρβης και, τέλος, η εξίσωση κατανάλωσης της κινητικής ενέργειας τύρβης. Οι εξισώσεις επίλυσης του προβλήματος για μόνιμη, ασυμπίεστη τρισδιάστατη ροή σε καρτεσιανή μορφή γράφονται με την κάτωθι μορφή (Argyropoulos, 2008):

Εξίσωση συνέχειας:

$$\frac{\partial U_i}{\partial \chi_i} = 0 \quad (16)$$

Εξισώσεις ορμής (Navier-Stokes):

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial \chi_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \chi_i} + \frac{\partial}{\partial \chi_j} \left[(v + v_t) \left(\frac{\partial U_i}{\partial \chi_i} + \frac{\partial U_j}{\partial \chi_i} \right) \right] + g_i \left(\frac{T - T_{ref}}{T_{ref}} \right) \quad (17)$$

Εξίσωση ενέργειας:

$$U_j \frac{\partial h}{\partial \chi_j} = \frac{\partial}{\partial \chi_j} \left\{ \left(\frac{v}{Pr} + \frac{v_t}{\sigma_h} \right) \frac{\partial h}{\partial \chi_j} \right\} \quad (18)$$

Εξίσωση συγκέντρωση χημικού είδους:

$$U_j \frac{\partial C}{\partial \chi_j} = \frac{\partial}{\partial \chi_j} \left\{ \left(v + \frac{v_t}{\sigma_c} \right) \frac{\partial C}{\partial \chi_j} \right\} \quad (19)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού, U_j το άνωσμα της ταχύτητας, p η πίεση, g_i οι ανωστικές δυνάμεις, T_{ref} η θερμοκρασία αναφοράς που τίθεται ίση με 298 K, T η θερμοκρασία, v το κινηματικό ιξώδες, v_t ιξώδες Boussinesq, h η ενθαλπία, Pr ο αριθμός Prandtl, σ_h ο αριθμός Prandtl για την ενθαλπία h , και σ_c ο αριθμός Schmidt για την συγκέντρωση C . Οι δείκτες i, j ($=1,2,3$) καθορίζουν τις τρισδιάστατες χωρικές συντεταγμένες.

Για τον υπολογισμό των ανωστικών δυνάμεων της τυρβώδους ροής που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια του φαινομένου, χρησιμοποιείται το μοντέλο δύο διαφορικών εξισώσεων RNG $k\sim\epsilon$ (Yakhot & Orszag, 1986; Yakhot & Smith, 1992; Yakhot et al., 1992) με τις τροποποιήσεις των Markatos και Pericleous (1984) για τον υπολογισμό των ανωστικών δυνάμεων της τυρβώδους κινητικής ενέργειας. Οι δύο διαφορικές εξισώσεις είναι οι κάτωθι :

Εξίσωση κινητικής ενέργειας τύρβης (k):

$$U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + P_k + G_b - \varepsilon \quad (20)$$

Εξίσωση σκεδασμού τύρβης (ε):

$$U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} + (c_{\varepsilon 1} P_k - c_{\varepsilon 2} \varepsilon + c_{\varepsilon 3} G_b) \varepsilon \frac{\varepsilon}{k} - \frac{c_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta_1 \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (21)$$

όπου σ_k και σ_ε είναι αριθμοί Prandtl για την κινητική ενέργεια (k) και για τον σκεδασμό (ε) της τύρβης αντίστοιχα, ενώ οι αριθμοί c_1 , c_2 , c_3 , c_μ , και β_1 αποτελούν σταθερές του μοντέλου.

Ο όρος P_k αντιπροσωπεί τον ρυθμό της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, G_b είναι ο όρος παραγωγής της τυρβώδους ενέργειας που προέρχεται από τις ανωστικές δυνάμεις, η είναι η αναλογία της χρονικής κλίμακας της τύρβης προς τον ρυθμό της κύριας τάσης, και η_0 το ιξώδες δίνης boussinesq. Οι όροι P_k , P_k , n και ν_t περιγράφονται απο τις ακόλουθες σχέσεις.

Ρυθμός τυρβώδους ροής:

$$P_k = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (21)$$

Παραγωγή τυρβώδους ενέργειας:

$$G_b = -g \frac{1}{T_{ref}} \frac{\nu_t}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial y} \quad (22)$$

Αναλογία χρονικής κλίμακας της τύρβης προς τον ρυθμό της κύριας τάσης:

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (23)$$

Ιξώδες δίνης boussinesq:

$$\eta = \frac{SK}{\varepsilon} \quad (24)$$

Όπου S είναι ο ρυθμός της κύριας τάσης της ροής και ορίζεται ως:

$$S^2 = (2S_{ij}S_{ij}) \quad (25)$$

όπου ο ρυθμός παραμόρφωσης S_{ij} ορίζεται από την σχέση:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (26)$$

Οι τιμές των σταθερών όρων που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο απεικονίζονται στον παρακάτω Πίνακα 13

Πίνακας 13: Τιμές των σταθερών όρων που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο.

$c_{\varepsilon 1}$	$c_{\varepsilon 2}$	$c_{\varepsilon 3}$	c_{μ}	σ_k	σ_{ε}	η_o	β_1
1.42	1.68	$\tan \left \frac{u}{v} \right $	0.0845	0.719	0.719	4.38	0.012

5.5 Συνοριακές συνθήκες προβλήματος

Για την καλύτερη και ακριβέστερη προσομοίωση των συνοριακών συνθηκών στη περίπτωση εφαρμογής της μεθόδου πεπερασμένων όγκων, οι συνθήκες αυτές εισάγονται με τη μορφή ενός όρου πηγής ή αλλιώς ψευτοπηγή. Για την περίπτωση μας χρησιμοποιούμε τις ίδιες συνοριακές συνθήκες σύμφωνα με την μεταπτυχιακή εργασία του (Argyropoulos, 2008) εκτός από την υιοθέτηση εκθετικού προφίλ στην είσοδο.

Η ταχύτητα του ανέμου στην είσοδο του υπολογιστικού πεδίου ακολουθεί το λογαριθμικό νόμο μέχρι το ύψος του οριακού στρώματος και παραμένει σταθερή για μεγαλύτερα ύψη. Το λογαριθμικό προφίλ του ανέμου περιγράφεται από τη ακόλουθη σχέση (Tennekes, 1973):

$$\bar{U} = \frac{u_o}{k_a} \ln \left(\frac{z}{z_o} \right) \quad (27)$$

όπου \bar{U} είναι η μέση ταχύτητα του ανέμου σε ύψος z , k_a η σταθερά von Karman και η οποία έχει τιμή ίση με 0.41, u_0 η ταχύτητα της τριβής και z_0 το ύψος της τραχύτητας. Πιο συγκεκριμένα ως ταχύτητα αναφοράς, εισάγεται η ταχύτητα ανέμου σε ύψος 10 m από την επιφάνεια, καθώς αποτελεί και την συνήθη επιλογή για την μέτρηση ταχύτητας του ανέμου. Το ύψος τραχύτητας, z_0 λαμβάνει τιμή ίση με 0.3 m που αντιστοιχεί για ανάγλυφο αστικού περιβάλλοντος. Στην έξοδο του πεδίου γίνεται η παραδοχή ότι το ρευστό εξέρχεται σε χώρο δεδομένης ομοιόμορφης πίεσης. Τέλος σε όλα τα άλλα όρια, η κλίση των εξαρτημένων μεταβλητών θεωρείται ίση με το μηδέν.

Το προφίλ της τυρβώδους κινητικής ενέργειας (k) καθώς και ο σκεδασμός της τύρβης στην είσοδο του πεδίου υπολογίζεται από τις παρακάτω σχέσεις (Huser et al., 1997). Μεγαλύτερη αναφορά σχετικά με το μοντέλο που χρησιμοποιείται γίνεται στα επόμενα κεφάλαια.

Κινητική ενέργεια τύρβης (k):

$$k = \frac{u_*}{\sqrt{C_\mu}} \left(1 - \frac{z}{\delta}\right) \quad \text{για } z \leq 0.9 \delta \quad (28)$$

$$k = 0.1 \frac{u_*}{\sqrt{C_\mu}} \quad \text{για } z > 0.9 \delta \quad (29)$$

Διασκεδασμός τύρβης (ε):

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k^{1.5}}{k_a Z} \quad \text{για } z \leq 0.22 \delta \quad (30)$$

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{3/4}}{k_a d} \quad \text{για } z > 0.22 \delta \quad (31)$$

όπου δ η τιμή του οριακού ατμοσφαιρικού στρώματος (Α.Ο.Σ).

Για την παρούσα εργασία ευστάθεια της ατμόσφαιρας έχει η επιλεγεί η ουδέτερη κατάσταση η οποία ανήκει στην κατηγορία D και η τιμή του Α.Ο.Σ στα 800 m. Στα στερεά όρια του πεδίου ροής, γίνεται η χρήση των συναρτήσεων τοίχου (wall function) (Launder and Spalding, 1974). Με τη χρήση των συναρτήσεων τοίχου παρακάμπτεται η αριθμητική ολοκλήρωση των ισχυουσών εξισώσεων μέχρι και τους κόμβους των στερεών τοιχωμάτων, στη περιοχή των οποίων εισάγεται εμπειρική πληροφορία. Αυτό έχει ως συνέπεια οι εξισώσεις να επιλύονται σε σημαντικά αραιότερα πλέγματα. Με βάση την παραπάνω μέθοδο, στην περιοχή του οριακού στρώματος, η

μέση εφαπτομενική ταχύτητα συνδέεται με τη διατμητική τάση του οριακού στρώματος μέσω λογαριθμικής σχέσης. Πιο συγκεκριμένα, πλησίον του στερεού τοιχώματος η μεταφορά ορμής προκύπτει:

$$U^+ = \frac{1}{k} \ln(Ey^+) \quad (32)$$

Όπου, U^+ η αδιάστατη ταχύτητα, και ορίζεται:

$$U^+ = \frac{\rho U_P C_\mu^{1/4} k_\rho^{1/2}}{\tau_w / \rho} \quad (33)$$

Και y^+ , η αδιάστατη απόσταση από το τοίχωμα και ορίζεται ως:

$$y^+ = \frac{\rho C_\mu^{1/4} k_\rho^{1/2} y_\rho}{\mu} \quad (34)$$

Όπου k είναι η σταθερά von Karman ($=0.418$), E εμπειρική σταθερά ($=9.793$), U_P η μέση ταχύτητα του ρευστού στο σημείο P, k_ρ η κινητική ενέργεια τύρβης στο σημείο P, y_ρ η απόσταση του σημείου P από το τοίχωμα και τ_w το δυναμικό ιξώδες του ρευστού.

Ο λογαριθμικός νόμος εφαρμόζεται για τιμές αδιάστατης απόστασης μεγαλύτερης από $y^+ > 11.225$. Όταν η διακριτοποίηση του πλέγματος είναι τέτοια ώστε η τιμή του είναι $y^+ < 11.225$ τότε εφαρμόζεται η σχέση στρωτής τάσης- παραμόρφωσης και η οποία γράφεται ως εξής:

$$U^+ = y^+ \quad (35)$$

Η συνοριακή συνθήκη που εφαρμόζεται για την τυρβώδη κινητική ενέργεια, k , στο τοίχωμα είναι:

$$\frac{\partial k}{\partial n} = 0 \quad (36)$$

όπου n είναι η τοπική διεύθυνση κάθετα στο τοίχωμα. Η παραγωγή κινητικής ενέργειας, G_k , και ο ρυθμός διασκεδασμού της τύρβης, ϵ , στα κελιά πλησίον των τοιχωμάτων, τα οποία και

αποτελούν τους όρους πηγής της εξίσωσης κινητικής ενέργειας τύρβης (k) υπολογίζεται με βάση την τοπική ενεργειακή ισορροπία. Με βάση την θεώρηση, η παραγωγή της κινητικής ενέργειας της τύρβης (k) καθώς και ο ρυθμός διασκεδασμού θεωρούνται ισοδύναμα στον όγκο ελέγχου πλησίον των τοιχωμάτων.

Επομένως, η παραγωγή κινητικής ενέργειας τύρβης (k) βασίζεται στο λογαριθμικό νόμο και υπολογίζεται :

$$G_k \approx \tau_w \frac{\partial U}{\partial y} = \tau_w \frac{\tau_w}{k\rho k_p^{1/2} y_p} \quad (37)$$

και ο σκεδασμός της τύρβης (ε) υπολογίζεται :

$$\varepsilon_p = \frac{C_\mu^{3/4} k_p^{3/2}}{k y_p} \quad (38)$$

Οι συναρτήσεις τοίχου που αναφέρθηκαν παραπάνω χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα ευρύτατα σε πραγματικές βιομηχανικές εφαρμογές λόγω του ότι επιτρέπει τη χρησιμοποίηση υπολογιστικών πλεγμάτων με μικρότερο πλήθος κόμβων και στοιχείων μιας και η απόσταση του πρώτου, κάθε φορά, κόμβου από το στερεό όριο δεν χρειάζεται να είναι πολύ μικρή για να καταφέρει να προλέξει τα φυσικά φαινόμενα στην περιοχή του τοιχώματος (Ζυμάρης, 2010). Η ακρίβεια καθώς και οι αξιοπιστία των αποτελεσμάτων μειώνεται καθώς η ροή που μοντελοποιείται ξεφεύγει από τις παραδοχές που έχουν γίνει. Ειδικότερα όταν πρόκειται για ροές όπου στο οριακό στρώμα παρατηρούνται μεγάλες μεταβολές των πιέσεων, έντονες αλλαγές διεύθυνσης ταχύτητας και όταν δεν τηρείται η υπόθεση της ενεργειακής ισορροπίας της κινητικής ενέργειας τύρβης καθώς και του σκεδασμού της τύρβης.

5.6 Μοντελοποίηση της Τύρβης

5.6.1 Εισαγωγή

Το θέμα της τύρβης έχει από πολύ καιρό αναγνωρισθεί ως από τα πλέον δυσνόητα αλλά και άλυτα επιστημονικά πρόβλημα σε σημείο που ο Richard Feynman (1918-1988) να το κατατάξει ως το πιο σημαντικό άλυτο επιστημονικό θέμα του αιώνα μας.

Το κύριο γνώρισμα της τυρβώδους ροής είναι η τυχαία διακύμανση των ιδιοτήτων του ρευστού σε τυχόν σημείο του πεδίου ροής (Μαρκάτος, 1998). Όμως ακόμα και ο ορισμός της τύρβης είναι δύσκολος και κάθε σχολή δίνει το δικό της ορισμό ανάλογα με τη σκοπιά που την εξετάζει. Ένα πληρέστερος αλλά πιο εκτενής ορισμός δίνεται από τον Peter Bradshaw κατά τον οποίο, «τύρβη είναι μια τρισδιάστατη χρονικά μεταβαλλόμενη ροή στην οποία η έκταση των δινοσωλήνων προκαλεί διαταραχές ταχύτητας σε όλες τις συχνότητες μεταξύ ελαχίστης που καθορίζεται από τις οριακές συνθήκες και μέγιστης που καθορίζεται από τη συνεκτικότητα του ρευστού». Τα δομικά χαρακτηριστικά της τυρβώδους ροής είναι οι δίνες και οι ανακυκλοφορίες.

Η τύρβη αποτελείται από δίνες και στροβίλους που κινούνται τυχαία γύρω και σχετικά με τη συνολική κατεύθυνση της κίνησης. Το βασικότερο χαρακτηριστικό της τυρβώδους ροής είναι η μεταφορά ενέργειας στις μικρότερες χωρικές κλίμακες κατά μήκος ενός συνεχούς φάσματος κυματικού αριθμού, δηλαδή πρόκειται για τρισδιάστατη μη γραμμική διεργασία (Σταυρακάκης, 2010). Η μεταφορά της ενέργειας γίνεται με το σχηματισμό δινών. Οι δίνες μπορούν να θεωρηθούν ως ένα σύνολο στροβίλων που εκτείνονται γύρω και σχετικά με τη συνολική κατεύθυνση της κίνησης της ροής. Τεχνικά, η χαοτική κατάσταση δημιουργείται όταν η ταχύτητα του ρευστού υπερβεί ένα συγκεκριμένο όριο, κάτω από το οποίο επικρατούν οι ιξώδεις τάσεις. Οι δίνες μπορούν να θεωρηθούν ως ένα σύνολο στροβίλων που επεκτείνονται από τη μέση ροή προς τυχαία διεύθυνση από τον ένα στροβίλο στον άλλο. Μέσω αυτού του μηχανισμού, που καλείται «έκταση των στροβίλων», γίνεται η διάσπαση των μεγάλων δινών σε μικρότερες. Με αυτό το τρόπο γίνεται μεταφορά κινητικής ενέργειας από τις μεγαλύτερες δίνες στις μικρότερες, ώστε η διεργασία αυτή να μπορεί να ερμηνευθεί και ως διεργασία που έχει τη μορφή «ενεργειακού καταρράκτη». Έτσι οι δίνες μεγάλου μεγέθους που δημιουργούνται ανταλλάσσουν ενέργεια μεταξύ τους, και στη συνέχεια αυτό το ποσό ενέργειας μεταφέρεται στις γειτονικές δίνες μικρότερης κλίμακας. Το φαινόμενο αυτό συνεχίζεται προς όλο και μικρότερες δίνες μέχρι την προσέγγιση της δίνης με την ελάχιστη κλίμακα μήκους. Αυτό συμβαίνει όταν έχει μετατραπεί πλέον η κινητική ενέργεια, υπό την επίδραση των ιξωδών τάσεων, σε εσωτερική θερμική ενέργεια.

Για τους μηχανικούς, η κατανόηση των τυρβωδών ροών είναι μεγάλης σημασίας για την πρόληψη ή αντιμετώπιση των αρνητικών συνεπειών τους (π.χ. αεροδυναμική περυγών, διασπορά ρύπων) αλλά και για αξιοποίηση του φαινομένου σε διεργασίες ανάμειξης (π.χ. θάλαμοι καύσης των κινητήρων εσωτερικής καύσης, χημικοί αντιδραστήρες). Δυστυχώς δεν υπάρχει ένα μοντέλο υπολογισμού τυρβώδους ροής το οποίο να είναι παγκοσμίως αποδεκτό, και να χρησιμοποιείται για όλες της περιπτώσεις τυρβώδους ροής. Η επιλογή του μοντέλου εξαρτάται από τη φυσική που περικλείεται στη ροή, προηγούμενη εμπειρία καθώς και πρακτικές που έχουν εφαρμοσθεί στο παρελθόν σε συγκεκριμένο πρόβλημα, ο βαθμός ακρίβειας που απαιτείται καθώς και οι διαθέσιμοι υπολογιστικοί πόροι.

Τα υπολογιστικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση της τύρβης ταξινομούνται ως εξής σύμφωνα με τον Πίνακα 14:

Πίνακας 14: Ταξινόμηση μοντέλων περιγραφής τύρβης (Versteeg & Malalasekera, 1995).

Κλασικά μοντέλα (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations, RANS)	Βασίζονται στις (μέσες χρονικά) εξισώσεις Reynolds 1) Πρότυπο μηδενικού αριθμού εξισώσεων – μοντέλο μήκους ανάμειξης 2) Πρότυπο δύο εξισώσεων –μοντέλο $k-\epsilon$ 3) Πρότυπα εξισώσεων τάσεων Reynolds 4) Πρότυπα αλγεβρικών εξισώσεων τάσεων
Προσομοίωση μεγάλων δινών (Large Eddy Simulation, LES)	Βασίζεται σε εξισώσεις με χωρικά φίλτρα.
Άμεσης αριθμητική επίλυση (Direct Numerical Solution, DNS)	Βασίζεται στην άμεση επίλυση των εξισώσεων Navier-stokes.

Σύμφωνα με τη μέθοδο της άμεσης αριθμητικής προσομοίωσης (Direct Numerical Simulation, DNS) είναι θεωρητικά εφικτή η άμεση ανάλυση όλου του φάσματος κλίμακας μήκους με επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes στο υπολογιστικό πλέγμα χωρίς καμία προσέγγιση-τεχνητή μείωση του αριθμού Reynolds. Για να γίνει εφικτή η χρήση του DNS απαιτούνται τεράστιοι υπολογιστικοί πόροι που ξεπερνούν τις υπάρχουσες υπολογιστικές δυνατότητες τις πολύ πυκνά υπολογιστικά πλέγματα και υπολογιστικός φόρτος αλλά και υπολογιστικοί πόροι που

ξεπερνούν τις υπάρχοντες δυνατότητες.

Στην περίπτωση των μοντέλων προσομοίωσης μεγάλων δινών (Large Eddy Simulation, LES), τα πρότυπα που επιλύουν τις χρονικά εξαρτημένες εξισώσεις της ροής για τη μέση ροή και για τις μεγάλες δίνες, ενώ οι επιδράσεις των μικρότερων δινών μοντελοποιούνται (Μαρκάτος, 1998). Οι μεγάλες δίνες αλληλεπιδρούν έντονα με τη μέση ροή καθώς περιέχουν και το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας με αποτέλεσμα το μοντέλο LES να περιγράφει αρκετά ικανοποιητικά τις επιδράσεις της τύρβης. Η προσομοίωση μεγάλων δινών που περιγράφηκε παραπάνω βρίσκεται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο καθώς οι υπολογιστικοί πόροι που απαιτούνται είναι μεγάλοι γεγονός που δεν επιτρέπει, ακόμα, την ευρεία εφαρμογή και προσομοίωση σε πραγματικά προβλήματα.

Η προσέγγιση των μοντέλων RANS, αποτελούν την πλειοψηφία των μοντέλων που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της τύρβης τόσο σε ερευνητικές όσο και βιομηχανικές εφαρμογές. Τα μοντέλα αυτά στηρίζονται στην υπόθεση πως υπάρχει αναλογία μεταξύ τις ιξώδεις διατμητικές τάσεις και τις τάσεις Reynolds. Πιο συγκεκριμένα το υπολογιστικό κόστος είναι μικρό και οι βιομηχανικές εφαρμογές δεν ενδιαφέρονται για τις διακυμάνσεις των ταχυτήτων και των πιέσεων, αλλά ενδιαφέρονται για μια σωστή χρονική ολοκλήρωση των εξισώσεων, που θα αποδώσει σωστά τις επιπτώσεις της κινητικής ενέργειας και του διασκεδασμού της τύρβης ανά μονάδα χρόνου.

5.6.2 Συμβατικό μοντέλο δύο διαφορικών εξισώσεων $k\sim\varepsilon$

Εφόσον η διάχυση και η μετάδοση της τύρβης μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες, τότε η επίδραση της τύρβης στη μέση ροή μπορεί να γίνει με χρήση μοντέλων μήκους ανάμιξης. Στις περιπτώσεις που παρατηρούνται φαινόμενα ανακυκλοφορίας, όπου η επίδραση της τύρβης είναι σημαντική, απαιτείται το μοντέλο να περιλαμβάνει τις δυναμικές της τύρβης. Αυτό γίνεται με το μοντέλο 2 διαφορικών εξισώσεων το οποίο εστιάζεται στον μηχανισμό που επηρεάζει την κινητική ενέργεια της τύρβης. Το μοντέλο $k\sim\varepsilon$ είναι μια πιο λεπτομερής και γενική, αλλά και πιο δαπανηρή, περιγραφή της τύρβης που επιτρέπει να λαμβάνονται υπόψη στη μεταφορά ιδιοτήτων της τύρβης οι επιδράσεις της μέσης ροής και της διάχυσης καθώς και η παραγωγή και καταστροφή της τύρβης (Μαρκάτος 1998). Για να γίνει δυνατό αυτό θα πρέπει να προσδιορισθεί το μήκος της δίνης από μία ανεξάρτητη διαφορική εξίσωση. Το μοντέλο που τράβηξε περισσότερο την προσοχή της ερευνητικής κοινότητας χρησιμοποιεί ως δεύτερη εξίσωση αυτή για την «ισοτροπική απορρόφηση» D , βασισμένη στην ακριβή εξίσωση μεταφοράς του D που

προκύπτει από την διαφοροποίηση ως προς x_j της συνιστώσας των εξισώσεων Navier-Stokes, τον πολλαπλασιασμό της προκύπτουσας εξίσωσης επί $\frac{\partial u_t}{\partial x_j}$ και τη λήψη του χρονικού μέσου όρου της.

Σε υψηλούς αριθμούς Reynolds η διαφορά μεταξύ ε και D είναι μικρή και για λόγους ευκολίας χρησιμοποιείται το ε ως ανεξάρτητη μεταβλητή. Φυσικά η εξίσωση του ε υπονοεί μια εξίσωση μεταφοράς για το L , με την ταυτόχρονη χρήση της εξίσωσης του k . Η ακριβής εξίσωση για το ε προκύπτει από τις εξισώσεις Navier-Stokes με τον τρόπο που αναφέρθηκε παραπάνω, και έχει προταθεί ανεξάρτητα από τους Davidov (1961) και τους Harlow και Nakayama (1986).

Έτσι για ασυμπίεστη ροή η σχέση παίρνει τη μορφή:

$$\begin{aligned} \underbrace{\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}}_{(I)} + \underbrace{\bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}}_{(II)} = & \underbrace{-2v \frac{\partial \bar{u}'_i}{\partial x_m} \left(\frac{\partial \bar{u}'_i}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{u}'_m}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}'_j}{\partial x_i} \frac{\partial \bar{u}'_j}{\partial x_m} \right)}_{(III)} - \underbrace{2v \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_m \partial x_j} \bar{u}'_k \frac{\partial \bar{u}'_i}{\partial x_j}}_{(IV)} - \underbrace{2v \frac{\partial \bar{u}'_i}{\partial x_m} \frac{\partial \bar{u}'_i}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{u}'_m}{\partial x_j}}_{(V)} - \underbrace{2v \left(\frac{\partial^2 \bar{u}'_i}{\partial x_m \partial x_j} \right)^2}_{(VI)} \\ & - v \left[\underbrace{\frac{\partial}{\partial x_m} \bar{u}'_m \left(\frac{\partial \bar{u}'_i}{\partial x_j} \right)}_{(VII)} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_m} \frac{\partial \bar{p}'}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{u}'_j}{\partial x_j}}_{(VIII)} - \underbrace{\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x_m^2}}_{(IX)} \right] \quad (39) \end{aligned}$$

Η παραπάνω εξίσωση με λόγια μπορεί να εκφρασθεί ως:

Όρος (I): Ρυθμός αλλαγής του ε :

Όρος (II): Μεταφορά του ε με συναγωγή

Όροι (III) και (IV) : Ρυθμός παραγωγής του ε από τη μέση ροή

Όρος (V) : Ρυθμός παραγωγής του ε με αυτοτέντωμα των στοιχείων στροβιλισμού

Όρος (VI): Ρυθμός ιξώδους απορρόφησης του ε

Όροι (VII), (VIII) και (IX): Μεταφορά του ε με διάχυση

Η ερμηνεία αυτής της εξίσωσης δεν δείχνει εύκολη όταν το ε θεωρηθεί ως ο ρυθμός ιξώδους απορρόφησης της ενέργειας της τύρβης. Η μοντελοποίηση της όμως μπορεί να γίνει κατ' αναλογία με την εξίσωση του Chou για το μέσο όρο του τετραγώνου των διακυμάνσεων στροβιλισμού $\left(\overline{w'_j w'_i} \right)$, που μοιάζει με την εξίσωση του ε .

Σε υψηλούς αριθμούς Reynolds το ε ορίζεται από τη σχέση:

$$\varepsilon = 2\nu \overline{e'_{ij} e'_{ij}} \cong \nu \overline{w'_i w'_i} \quad (40)$$

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

Σε αντίθεση με το ε που είναι μια παθητική βαθμωτή ποσότητα, ο διακυμαινόμενος στροβιλισμός W'_j μπορεί να θεωρηθεί ως μια ενεργητική βαθμωτή ιδιότητα της τύρβης μικρής κλίμακας ενώ το πλείστο του στροβιλισμού συνδέεται με την κίνηση μικρής κλίμακας. Με αυτές τις αρχές η εξίσωση για το ε ερμηνεύεται ευκολότερα σε όρους του $\overline{w'_j w'_j}$. Όμως η πλέον άμεση ερμηνεία της είναι ως μια εξίσωση για το ρυθμό με τον οποίο η κινητική ενέργεια της τύρβης μεταφέρεται διαμέσου του φάσματος από μεγάλες δίνες σε όλο και μικρότερες δίνες (Μαρκάτος, 1998). Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις οι Daly και Harlow (1970) προχώρησαν στη μοντελοποίηση της εξίσωσης με την μορφή και με τις σταθερές του μοντέλου στον Πίνακα 15:

$$\frac{Dk}{Dt} \equiv \frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} \cong \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{S_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \varepsilon \quad (41)$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} \equiv \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \cong \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (42)$$

$$P_k = -\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \cong \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = 2\nu_t S_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (43)$$

$$\nu_t \cong C_\mu \sqrt{k} L_k \cong C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (44)$$

Πίνακας 15: Οι σταθερές του κλασικού μοντέλου k-ε. (Πηγή : H.K Versteeg & W Malalasekera, 1995)

$C_\mu=0.09$	$\sigma_k=1.00$	$\sigma_\varepsilon=1.30$	$C_{1\varepsilon}=1.44$	$C_{2\varepsilon}=1.92$
--------------	-----------------	---------------------------	-------------------------	-------------------------

Η εφαρμογή των μοντέλων δύο εξισώσεων γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τις εξής παραδοχές:

1) Σχεδόν ομογενή τύρβη: Με αυτή τη παραδοχή στους όρους πηγής που περιέχουν διατμητικές τάσεις εφαρμόζεται η κάτωθι σχέση:

$$\overline{u'v'} = -\sqrt{k} L_k \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \quad (45)$$

2) Υψηλοί αριθμοί Reynolds: Μέσω αυτής της παραδοχής γίνεται δυνατή η χρήση της παραπάνω σχέσης.

3) Ομοιότης της φασματικής κατανομής των ιδιοτήτων της τύρβης: Με βάση αυτή τη παραδοχή
α) η διάχυση θεωρείται τύπου κλίσης και χρησιμοποιούνται σταθεροί ενεργοί αριθμοί Prandtl και
β) Η απορρόφηση του k μπορεί να εκφραστεί ως $\varepsilon = C_D k^{3/2} / L_k$, ενώ θεωρούνται αμελητέοι οι όροι ιξώδους διάχυσης.

Όπως γίνεται αντιληπτό, οι παραδοχές αυτές είναι τόσο πολλές ώστε να μην ισχύουν όλες στις ροές πρακτικού ενδιαφέροντος. Επομένως δεν πρόκειται για παγκόσμιες σταθερές αλλά συναρτήσεις χαρακτηριστικών παραμέτρων της κάθε ροής.

Τα πλεονεκτήματα του βασικού μοντέλου $k\sim\varepsilon$ είναι (Μαρκάτος 1998, Versteeg και Malalasekera, 1995):

- 1) Αποτελεί ένα απλό μοντέλο τύρβης για το οποίο απαιτούνται μόνο αρχικές και οριακές συνθήκες.
- 2) Έχει χρησιμοποιηθεί ευρύτατα με ιδιαίτερα και έχει δώσει ιδιαίτερα αξιόπιστα αποτελέσματα σε πλήθος εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων ανακυκλοφοριών, χωρίς να απαιτείται να απαιτείται η τροποποίηση των σταθερών του μοντέλου.
- 3) Υπάρχουν διαθέσιμες εκδόσεις του μοντέλου που περιλαμβάνει τις επιπτώσεις της άνωσης και βρίσκει εφαρμογές σε διασπορά ρύπων στην ατμόσφαιρα αλλά και σε θαλάσσιο περιβάλλον, καθώς και στην προσομοίωση πυρκαγιών.

Τα μειονεκτήματα του βασικού μοντέλου $k\sim\varepsilon$ είναι (Μαρκάτος 1998, Versteeg και Malalasekera, 1995):

- 1) Πιο δαπανηρό από μοντέλα μήκους ανάμιξης καθώς υπάρχουν δύο επιπλέον διαφορικές εξισώσεις.
- 2) Ανεπαρκής λειτουργία σε μερικές σημαντικές περιπτώσεις όπως:
 - i) Μερικές ελεύθερες ροές.
 - ii) Ροές με μεγάλες πρόσθετες παραμορφώσεις.
 - iii) Περιστρεφόμενες ροές.
 - iv) Πλήρως ανεπτυγμένες ροές σε μη-κυκλικούς αγωγούς.

5.6.3 Επανακανονικοποιημένο μοντέλο k~ε (RNG k~ε).

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το μοντέλο υπολογισμού τύρβης k~ε αποτελεί έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για το υπολογισμό της διασποράς ρύπων στην ατμόσφαιρα. Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το επανακανονικοποιημένο μοντέλο k~ε (Renormalization Group, RNG k~ε). Πιο συγκεκριμένα, η επανακανονικοποίηση αποτελεί μια μαθηματική μεθοδολογία μέσω της οποίας γίνεται συστηματική διερεύνηση των μεταβολών ενός φυσικού συστήματος σε ολοένα και μικρότερα κομμάτια ενός σχήματος τα οποία μεγεθύνονται στο πλήρες αρχικό μέγεθός τους. Μέσω διαδοχικών επαναλήψεων των μεγεθύνσεων και σμικρύνσεων σε διαφορετικές κλίμακες επιτρέπουν τη θέαση πανομοιότυπων εικόνων σε όλες τις κλίμακες που συνιστά και το βασικό χαρακτηριστικό της αυτό-ομοιότητας που διαθέτουν. Το συγκεκριμένο μοντέλο αναπτύχθηκε από τους Yakhot & Orszag (1986), Yakhot & Smith, (1992) και Yakhot et al.(1992). Το συγκεκριμένο μοντέλο αποτελεί εξέλιξη του συμβατικού μοντέλου k~ε και ακολουθεί μια διαδικασία σχολαστικής στατιστικής επεξεργασίας και διαφέρει από αυτό στο ότι περιλαμβάνει έναν πρόσθετο όρο στην εξίσωση του ε που βελτιώνει την ακρίβεια της πρόβλεψης σε περιοχές βίαιης καταπόνησης, χρησιμοποιεί αναλυτικές εξισώσεις υπολογισμού των τυρβωδών αριθμών Prandtl και λαμβάνει υπόψη περιοχές χαμηλού αριθμού Reynolds το οποίο γίνεται με την εισαγωγή μιας πρόσθετης διαφορικής εξίσωσης για τον υπολογισμό του τυρβώδους ιξώδους. Οι εξίσωση για την κινητική ενέργειας τύρβης (k) είναι :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + P_k + G_b - \varepsilon \quad (46)$$

Αντίστοιχα η εξίσωση για τον διασκεδασμό της τύρβης (ε) περιγράφεται από τη σχέση:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} + (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon + C_{\varepsilon 3} G_b) \frac{\varepsilon}{k} - \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \frac{\eta}{\eta_o})}{1 + \beta_1 \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (47)$$

όπου:

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

είναι το τυρβώδες κινηματικό ιξώδες,

και

$$P_k = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$$

ο όρος παραγωγής ή καταστροφής της τυρβώδους ενέργειας εξαιτίας των διατμητικών τάσεων, $G_b = -g\beta \frac{\nu_t}{\sigma_\tau} \frac{\partial T}{\partial y}$, ο όρος παραγωγής ή καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας λόγω των ανωστικών δυνάμεων, $n = S \frac{K}{\varepsilon}$, $S = (2S_{ij}S_{ij})^{1/2}$, $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$, ο ρυθμός παραμόρφωσης της μέσης χρονοροής και όπου \bar{u} είναι η ταχύτητα της μέσης ροής. Ενώ ο όρος $(C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon + C_{\varepsilon 3} G_b) \frac{\varepsilon}{k}$ συμβολίζεται και ως R.

Γενικά το μοντέλο RNG k-ε, σε σύγκριση με το συμβατικό μοντέλο k-ε οδηγεί σε μειωμένη τυρβώδη συνεκτικότητα, λόγω της μειωμένης τιμής του συντελεστή $C_{\varepsilon 2}$ και του όρου R. Μέσω του όρου R, γίνεται η εισαγωγή μηχανισμού που επηρεάζει το ισοζύγιο μεταξύ των όρων παραγωγής και απορρόφησης στην εξίσωση του ε. Έτσι επιτυγχάνεται αξιοσημείωτη βελτίωση προσομοίωσης σε περιοχές με παρουσία ανισοτροπικών δυνάμεων μεγάλης κλίμακας. Πιο συγκεκριμένα σε περιοχές με σχετικά μικρές τιμές του δείκτη η, ο όρος R τείνει να αυξήσει την τυρβώδη συνεκτικότητα, η οποία όμως υπολείπεται και πάλι της τιμής του k-ε. Ενώ σε περιοχές με μεγάλες τιμές του η, όπου παρατηρείται έντονη ανισοτροπία, ο όρος R αποτελεί πηγή παραγωγής του ε και κατά συνέπεια επιφέρει μείωση της τυρβώδους συνεκτικότητας.

5.7 Όροι πηγής θερμότητας και μάζας

5.7.1 Υπολογισμός ρυθμού έκλυσης θερμότητας και ρυθμού καύσης των καυσίμων.

Στην παρούσα εργασία ο όρος πηγής θερμότητας και μάζας προσομοιώνεται με ως ογκομετρική πηγή με απελευθέρωση θερμότητας με σταθερό ρυθμό. Ως εκ τούτου η πυρκαγιά στην επιφάνεια τις δεξαμενής χαρακτηρίζεται ως μεγάλη πυρκαγιά λίμνης (large Pool fire). Ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας (Heat Release Rate, HRR) αποτελεί ίσως τον σημαντικότερο παράγοντα και μπορεί να υπολογιστεί από τον ρυθμό απώλειας μάζας, \dot{m}'' , από τον τύπο (Zabetakis & Brugess, 1999; Babrauskas, 1983):

$$\dot{m}'' = \dot{m}''_{\infty} (1 - e^{-k\beta D}) \left[\frac{kg}{m^2} \right] \quad (47)$$

όπου k : συντελεστής μείωσης της φλόγας.

β : διορθωτής μήκους ακτίνας (mean beam length corrector).

\dot{m}'' : ρυθμός απώλειας μάζας για φωτιά λίμνης άπειρης ακτίνας.

D : διάμετρος λίμνης φωτιάς.

Οι συντελεστές k , β , και \dot{m}'' αποτελούν εμπειρικές σταθερές και είναι διαφορετικές για κάθε τύπο καυσίμου. Εφόσον υπολογιστεί ο ρυθμός απώλειας μάζας, \dot{m}'' , μπορεί να υπολογιστεί ο ρυθμός ροής θερμότητας (HRR), μέσω του παρακάτω τύπου:

$$\dot{q} = \Delta h_c \dot{m}'' A \quad [\text{KW}] \quad (48)$$

όπου Δh_c : θερμότητα καύσης και A η επιφάνεια της λίμνης φωτιάς.

Στην παρούσα εργασία οι συντελεστές που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της φωτιάς λίμνης στηρίζονται στις εργασίες των (Babrauskas, 1983; 1996; NFPA, 1997; McGrattan et al. 1997; Argyropoulos et al. 2010). Έτσι ο ρυθμός καύσης για το αργό πετρέλαιο (crude oil) λαμβάνεται ίσος με $0,035 \text{ kg/m}^2\text{s}$ έπειτα από προσαρμογή στην ενδιάμεση τιμή των $0,022$ - $0,045$ που δίνει η μελέτη του Babrauskas, 1983. Αντίστοιχα, για το Ντήζελ (diesel oil) ο ρυθμός καύσης λαμβάνεται ίσος με $0,051 \text{ kg/m}^2\text{s}$ που αποτελεί μέσο όρο των τιμών από τις εργασίες των Babrauskas (1983;1996) και NFPA (1997) με τιμή $0,035 \text{ kg/m}^2\text{s}$ και $0,067 \text{ kg/m}^2\text{s}$ που αποτελεί την αντίστοιχη τιμή στην εργασία McGrattan et al., 1997.

Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί πως η παραπάνω εξίσωση αποτελεί μια ιδανική συμπεριφορά καθώς γίνεται η παραδοχή πως ο ρυθμός καύσης του γίνεται σε μη-χρονικά μεταβαλλόμενο πεδίο αν και ο ρυθμός απώλειας λόγω καύσης μεταβάλλεται με το χρόνο. Η τιμή του συνολικού ρυθμού απώλειας θερμότητας (HRR) υπολογίζεται με χρήση της σχέσης (48) αφαιρώντας το κλάσμα το κλάσμα της θερμικής ακτινοβολία οποίο λαμβάνεται ίσο με 30%. Αυτό γίνεται γιατί σύμφωνα με τους McGrattan et al., 2000) το ποσοστό της θερμικής ακτινοβολίας κυμαίνεται μεταξύ του 30 % και 40 % για πυρκαγιές με διάμετρο μικρότερη των 4 m. Στις περιπτώσεις πυρκαγιών λίμνης με μεγαλύτερη διάμετρο το ποσοστό αυτό ενδέχεται να είναι μικρότερο λόγω του φαινομένου της συσκώτισης που δημιουργείται από τον παραγόμενο καπνό (McGrattan et al., 2000; Yang, 1994; Hahn, 1991).

5.7.2 Συντελεστές εκπομπών τοξικών ρύπων

Όπως αναφέρθηκε, ένας από τους σκοπούς της παρούσας εργασίας είναι και ο καθορισμός ζωνών ασφαλείας. Ο καθορισμός των ζωνών ασφαλείας γίνεται μέσου του υπολογισμού της συγκεντρώσεων των τοξικών ρύπων στο επίπεδο του εδάφους. Ως τοξικοί και επιβλαβείς για την υγεία του ανθρώπου θεωρούνται οι ρύποι (που συνοδεύουν τα προϊόντα καύσης) όπως ο καπνός, το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το διοξείδιο του θείου (SO₂) κ.α. Στην συγκεκριμένη εργασία τα υπό εξέταση καύσιμα είναι το αργό πετρέλαιο (crude oil) και το πετρέλαιο κίνησης (diesel oil), βενζίνη (gasoline) ενώ βάση των παραπάνω καυσίμων η συγκέντρωση των ρύπων που υπολογίζονται είναι ο καπνός, το μονοξείδιο του άνθρακα (SO₂), μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και των πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (Poly-Aromatic Hydrocarbons, PAHs).

Λόγω έλλειψης πειραματικών δεδομένων για τις εκπομπές ρύπων τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται προέρχονται από την βιβλιογραφία. Τα δεδομένα αυτά είναι αποτέλεσμα εργαστηριακών, μεσαίων αλλά και υπεράκτια πειράματα (Notarianni et al., 1993; Walton et al., 1994;1995; Booher and Janke, 1997; Koseki et al., 2000; Evans et al., 2001; Lemieux et al., 2004). Πιο συγκεκριμένα με χρήση αυτών των δεδομένων δύναται να υπολογιστεί ο όρος πηγής του κάθε ρύπου, όπου υπολογίζεται με την παρακάτω εξίσωση (Argyropoulos et al., 2010):

$$ST = \dot{m}'' \times EF \times A_f \quad (49)$$

όπου ST είναι ο όρος πηγής του παραγόμενου ρύπου, \dot{m}'' είναι ο ρυθμός απώλειας μάζας του καυσίμου, A_f η επιφάνεια της πυρκαγιάς λίμνης και EF ο συντελεστής εκπομπής ρύπου.

5.7.2.1 Αργό πετρέλαιο (crude oil)

Το αργό πετρέλαιο αποτελείται από υδρογονάνθρακες (κυρίως αλκάνια, κυκλοαλκένια και αρωματικούς υδρογονάνθρακες) ενώ τα λοιπά οργανικά συστατικά του είναι το άζωτο, το οξυγόνο, το θείο καθώς και ίχνη μετάλλων όπως σίδηρος, νικέλιο, χαλκός και βανάδιο. Η περιεκτικότητα του αργού πετρελαίου στα παραπάνω συστατικά εξαρτάται από σε πολύ μεγάλο βαθμό το ίδιο το κοίτασμα. Στην παρούσα μελέτη η ποσότητα αργού πετρελαίου που προσομοιώθηκε είναι ίση με την χωρητικότητα των δεξαμενών και ίση πυκνότητα ίση με $\rho = 880 \text{ kg / m}^3$ (Babrauskas, 1983).

Για τον υπολογισμό της παραγωγής καπνού, γίνεται χρήση δεδομένων από τις μελέτες των Evans et al. (2001) και των Walton et al. (1994; 1995) που κυμαίνεται από 10% μέχρι και 15%.

Για το λόγο αυτό επιλέγεται η τιμή 12.5% που αποτελεί μέσο όρο των παραπάνω τιμών.

Για τον υπολογισμό της παραγωγής του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) γίνεται χρήση των δεδομένων που προέρχονται από τις εργασίες των Evans et al. (1991), Evans (1991) και Haney (1973) και λαμβάνεται ίση με 0.09 kg CO/ kg καυσίμου.

Η συγκέντρωση του καυσίμου σε θείο ποικίλη και σχετίζεται με την προέλευση του καθώς και την επεξεργασία του. Γι' αυτό το λόγο για τον υπολογισμό της παραγωγής του διοξειδίου του θείου (SO₂), ορίζεται η τιμή των 0.04 kg SO₂ / kg καυσίμου.

Τέλος για τον υπολογισμό εκπομπής των ενώσεων των πολυκυκλικών Αρωματικών Υδρογονανθράκων (PAHs), χρησιμοποιείται η τιμή 0.0004 Kg PAHs/ kg καυσίμου η οποία χρησιμοποιείται στην μελέτη των Lemieux et al. (2004).

5.7.2.2 Πετρέλαιο Ντήζελ (diesel oil)

Τα ντήζελ ή αλλιώς petroleum diesel, είναι σύνθετα μίγματα υδρογονανθράκων που παρασκευάζονται με την κλασματική απόσταξη αργού πετρελαίου στην περιοχή των 150 °C και 380 °C σε ατμοσφαιρική πίεση. Η ποιότητα του ντήζελ καθορίζεται από τις εκάστοτε προδιαγραφές και όπως τοπικούς περιορισμούς, περιεκτικότητα σε θείο, επιτρεπόμενα όρια νερού υποσυστήματος και οξύτητας, τέφρα κ.α. Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί πως ως καύσιμο ντήζελ, στην παρούσα εργασία γίνεται αναφορά στο ντήζελ κίνησης και όχι στο ντήζελ θέρμανσης καθώς τα δύο αυτά καύσιμα παρουσιάζουν μεγάλη διαφορά στην περιεκτικότητα σε θείο.

Η ποσότητα του αργού πετρελαίου που χρησιμοποιείται στην αριθμητική προσομοίωση είναι ισοδύναμο με την χωρητικότητα τις δεξαμενής και με πυκνότητα ίση με $\rho = 840 \text{ kg/ m}^3$. Σύμφωνα με τους Walton et al., 1995, η παραγωγή καπνού κυμαίνεται από 15% έως 20%. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε η μέση τιμή του 17.5 % το οποίο μα δίνει Ο συντελεστής εκπομπής καυσίμου για το διοξείδιο του θείου (SO₂), ορίστηκε η τιμή 0.02 kg SO₂/ kg καυσίμου, ενώ ο συντελεστής εκπομπής για το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), λαμβάνεται ίσος με 0.03 kg CO/ kg καυσίμου σύμφωνα με την μελέτη των (Booher and Janke, 1997). Για τις χημικές ενώσεις των Πολυκυκλικών Αρωματικών Υδρογονανθράκων, ΠΑΥ (PAHs), ο συντελεστής εκπομπής λαμβάνεται ίσος με 0.0009 kg PAHs/ kg καυσίμου σύμφωνα με την μελέτη των Lemieux et al., 2004.

5.7.2.3 Βενζίνη (Petrol/ Gasoline)

Η βενζίνη που συναντάται ως gasoline ή petrol, είναι από συνηθέστερα καύσιμα που χρησιμοποιείται σε κινητήρες εσωτερικής καύσης. Παράγεται από την διύλιση αργού πετρελαίου μέσω κλασματικής απόσταξης στην περιοχή των 120 °C και 150 °C. Η βενζίνη έχει μεγαλύτερη πτητικότητα από το Ντίζελ όχι μόνο λόγω σύστασης αλλά και λόγω των πρόσθετων ενώσεων όπως οξυγονούχων ενώσεων (MeOH, EtOH, IPA, MTBE, TAME, ETBE) που στοχεύουν στην αύξηση των οκτανίων, περιορισμό των επικαθήσεων, αντι-οξειδωτικά, αντιπαγωτικά αλλά και χρώμα που αποσκοπεί στον εμπορικό διαχωρισμό. Στο εμπόριο κυκλοφορούν βενζίνες διαφόρων προδιαγραφών των οποίων οι διαφορές βρίσκονται στον αριθμό οκτανίων καθώς τα πρόσθετα που χρησιμοποιούνται και εξαρτώνται από την γεωγραφική περιοχή όπου διακινείται.

Η ποσότητα βενζίνης που χρησιμοποιείται στην αριθμητική προσομοίωση είναι ίση με την χωρητικότητα της δεξαμενής και με πυκνότητα $\rho = 740 \text{ kg/ m}^3$. Λόγω έλλειψης πειραματικών δεδομένων για την εκπομπή ρύπων από πυρκαγιά λίμνης όπου η καύσιμη ύλη είναι βενζίνη, ο υπολογισμός των ρύπων γίνεται βασιζόμενοι στις αντίστοιχες τιμές του ντίζελ. Συνεπώς γίνεται βασιζόμενοι στο γεγονός ότι η βενζίνη έχει περίπου 30 % περισσότερους πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAHs), ορίζεται ο συντελεστής εκπομπής ρύπου ίσος με 0.0017 kg PAHs/ kg καυσίμου. Ο συντελεστής ρύπου για το διοξείδιο του θείου (SO₂) είναι ίσος με αυτή του ντίζελ καθώς τα δύο καύσιμα έχουν σχεδόν ίδιες περιεκτικότητες. Ο συντελεστής παραγωγής καπνού θα είναι 30% περισσότερο σε σύγκριση με το ντίζελ λόγω της μεγαλύτερης περιεκτικότητας του σε PAHs. Στην περίπτωση του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) ο συντελεστής του ρύπου λαμβάνεται ίσος με 0.05 kg/ Kg καυσίμου. Η παραπάνω υπολογισμοί βασίστηκαν στις μελέτες των Lemieux et al., 2004; Booher and Janke, 1997 και Babrauskas, 1983.

Κεφάλαιο 6: Αριθμητική μέθοδος επίλυσης

6.1 Απαιτούμενες ιδιότητες αριθμητικής μεθόδου

Η μέθοδος επίλυσης που χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων ρευστομηχανικής για να θεωρείται σωστή απαιτεί να παρουσιάζει συγκεκριμένες ιδιότητες. Για να γίνει ευκολότερη η ανάλυση μιας μεθόδου βάση των συγκεκριμένων ιδιοτήτων μπορούμε να την διαιρέσουμε σε τέσσερα μέρη τα οποία πρέπει να τηρούν τις συγκεκριμένες ιδιότητες.

Αυτές έχουν ως εξής:

- Σύγκλιση (Convergence), δηλαδή την ιδιότητα μιας αριθμητικής μεθόδου να «παράγει» μία λύση που πλησιάζει την πραγματική λύση καθώς ο όγκος ελέγχου, μέγεθος πλέγματος τείνει στο μηδέν.
- Συνακολουθία (Consistency) που αφορά την ιδιότητα μιας αριθμητικής μεθόδου να παράγει αλγεβρικές εξισώσεις που να είναι ίσες με τις εξισώσεις που κυριαρχούν στο πρόβλημα. Πρόκειται δηλαδή για την ακρίβεια διακριτοποίησης του υπολογιστικού πλέγματος όταν αυτό τείνει στο μηδέν. Η διαφορά μεταξύ της διακριτοποιημένης και της αρχικής εξίσωσης ονομάζεται σφάλμα αποκοπής.
- Σταθερότητα (Stability) που σχετίζεται με την δυνατότητα της μεθόδου να αποβάλει τα σφάλματα καθώς η επίλυση εξελίσσεται.

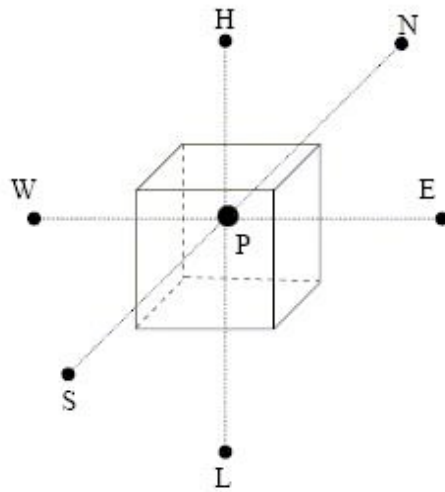
6.2 Μέθοδος πεπερασμένων όγκων (Finite Volume Method, F.V.M)

Οι μέθοδοι των πεπερασμένων όγκων σχετίζονται με τις μεθόδους πεπερασμένων διαφορών και είναι αρκετά νεότερες από αυτές που ανάγονται από την αρχή της δεκαετίας του '70 και αποτελούν μαζί με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών (Finite Difference Method, FDM) και τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method, FEM) αποτελούν τις διαδεδομένες μεθόδους διακριτοποίησης μερικών διαφορικών εξισώσεων. Μια βασική διαφορά ανάμεσα στις μεθόδους πεπερασμένων όγκων και πεπερασμένων διαφορών είναι ότι στις πεπερασμένες διαφορές η λύση βασίζεται μόνο στις τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής στους κόμβους του πλέγματος ενώ στους πεπερασμένους όγκους η λύση βασίζεται και στις υποθετικές κατανομές ανάμεσα στους κόμβους. Το πλεονέκτημα των μεθόδων πεπερασμένων όγκων έναντι των πεπερασμένων διαφορών είναι ότι προσφέρονται για την εύκολη κατασκευή σχημάτων διακριτοποίησης, και είναι εύκολο να χρησιμοποιηθούν σε καμπυλόγραμμα ή και σε μη-δομημένα

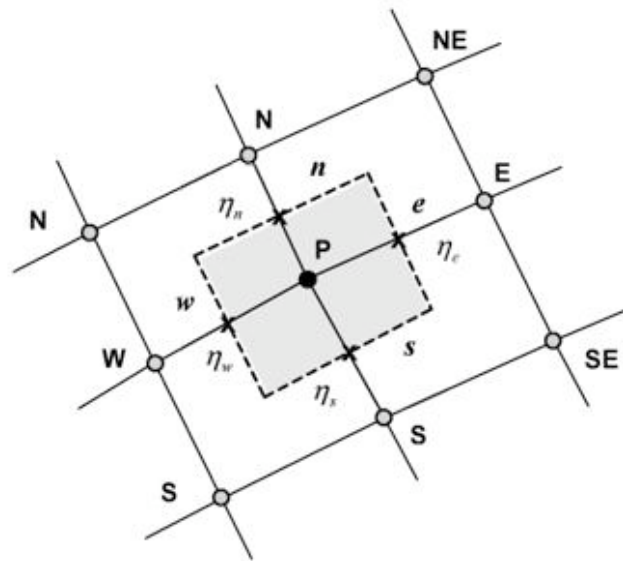
πλέγματα. Η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόζεται χωρίζοντας αρχικά το πεδίο ορισμού σε πεπερασμένους όγκους αναφοράς, έτσι ώστε κάθε κόμβος του πλέγματος να περιβάλλεται από έναν όγκο αναφοράς γνωστά και ως κελιά. Στην συνέχεια η μερική διαφορική εξίσωση ολοκληρώνεται στον όγκο αναφοράς και οι τιμές των μεταφερόμενων ποσοτήτων αποθηκεύονται σε κάθε κελί. Τα στάδια που ακολουθούνται στην μέθοδο πεπερασμένων όγκων είναι α) δημιουργία πλέγματος, β) διακριτοποίηση πλέγματος και τέλος γ) επίλυση εξισώσεων (Μαρκάτος, 1988).

6.2.1 Γεωμετρικό πλέγμα μεθόδου – Όγκοι ελέγχου

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το πρώτο στάδιο για την εφαρμογή της μεθόδου είναι η δημιουργία πλέγματος (grid), δηλαδή ο διαχωρισμός του υπολογιστικού χώρου σε όγκους ελέγχου. Το πλέγμα αποτελείται από ένα πεπερασμένο σύνολο σημείων τα οποία συνδέονται με ευθείες γραμμές. Στο δομημένο πλέγμα που χρησιμοποιείται και στην παρούσα διπλωματική εργασία, υπάρχει λογική αντιστοιχία μεταξύ των όγκων ελέγχου και των στοιχείων ενός τρισδιάστατου πίνακα. Ο κάθε όγκος ελέγχου αναγνωρίζεται από μία μοναδική τριάδα δεικτών (i, j, k) και οι γειτονικοί όγκοι ελέγχου (OE) είναι οι $(i-1, j, k)$, $(i+1, j, k)$, $(i, j-1, k)$, $(i, j+1, k)$, $(i, j, k-1)$ και $(i, j, k+1)$. Σημειώνεται πως οι όγκοι ελέγχου μπορούν να έχουν μη ορθογωνικό σχήμα, αλλά πάντα θα έχουν 6 πλευρές, 6 ακμές και τοπολογικά θα είναι καρτεσιανού σχήματος. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στο κέντρο κάθε κελιού βρίσκεται ο το σημείο P όπου εκεί γίνεται η «αποθήκευση» των βαθμωτών μεγεθών, ενώ οι τιμές των ταχυτήτων αποθηκεύονται στα μέτωπα-πλευρές των όγκων ελέγχου. Στην Εικόνα 14 που ακολουθεί απεικονίζεται ένας στοιχειώδης όγκος ελέγχου καθώς η απεικόνιση σε 2 διαστάσεις ενός όγκου ελέγχου με τους γειτονικούς.



Εικόνα 20: Στοιχειώδης όγκος ελέγχου. (Πηγή: www.cfd-online.com)



Εικόνα 21: Κάτοψη στοιχειώδους όγκου ελέγχου καθώς και τον γειτονικών του κόμβων. (Πηγή J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng. vol.30)

6.2.2 Ολοκληρωτική μορφή εξίσωσης μεταφοράς

Η ολοκλήρωση των εξισώσεων μεταφοράς πάνω στους όγκους ελέγχου πραγματοποιείται με σκοπό την εξαγωγή των τελικών μορφών της εξίσωσης διακριτοποίησης. Θεωρώντας πως όλες οι εξισώσεις μεταφοράς μπορούν να εκφραστούν με την παρακάτω μορφή:

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{u}\Phi) = \text{div}(\Gamma \cdot \text{grad } \Phi) + S_\phi \quad (48)$$

Ολοκληρώνοντας την παραπάνω διαφορική μορφή της εξίσωσης πάνω σε ένα στοιχειώδη όγκο ελέγχου, CV, έχουμε:

$$\int_{CV} \frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} dt + \int_{CV} \text{div}(\rho\mathbf{u}\Phi) dV = \int_{CV} \text{div}(\Gamma \cdot \text{grad } \Phi) dV + \int_{CV} S_\phi dV \quad (50)$$

Εν συνεχεία εφαρμόζοντας το θεώρημα απόκλισης του Gauss για μετασχηματίζεται ο όρος της συναγωγής και της διάχυσης ως επιφανειακό ολοκλήρωμα πάνω στην επιφάνεια του όγκου ελέγχου, που για άνυσμα $\tilde{\mathbf{a}}$ θα γίνει:

$$\int_{CV} \text{div}\tilde{\mathbf{a}} dV = \int_A \tilde{\mathbf{n}} \cdot \tilde{\mathbf{a}} dA \quad (51)$$

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

Συνεπώς προκύπτει:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{CV} \rho\Phi dV \right) + \int_A \mathbf{n} \cdot (\rho\Phi\mathbf{u}) dA = \int_{CV} \text{div}(\Gamma \cdot \text{grad}\Phi) dV + \int_{CV} S_\phi dV \quad (52)$$

6.2.3 Διακριτοποίηση

Το επόμενο βήμα μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας αριθμητικής επίλυσης γίνεται με τη μετατροπή της διαφορικής εξίσωσης σε αλγεβρική για κάθε εσωτερικό κόμβο του πλέγματος, καθώς και τη μετατροπή των αρχικών και οριακών συνθηκών της διαφορικής εξίσωσης σε αλγεβρικές εκφράσεις στους κόμβους που βρίσκονται πάνω στο όριο του πεδίου ροής. Η άγνωστη συνάρτηση Φ παίρνει διακριτή τιμή στη θέση (i,j,k) και συμβολίζεται με $\Phi_{i,j,k}$ ή Φ_P (Μπεργελές, 2006).

Έτσι με εφαρμογή της εξίσωση μεταφοράς (48) σε στοιχειώδη όγκο ελέγχου προκύπτει :

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho\Phi]V_P + (g_e - g_w) + (g_n - g_s) + (g_h - g_l) = [S_V] \quad (53)$$

Όπου :

$$g_i = \iint_{A_e} \left(\rho \tilde{u}_i \Phi - \Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) dA_i \quad (54)$$

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

Η διακριτοποίηση των διαφόρων μεγεθών γίνεται με τις παρακάτω τέσσερις παραδοχές:

1. Ομοιόμορφη κατανομή των διαφόρων μεγεθών στον όγκο ελέγχου

$$[\rho\Phi]V_P = \rho_P \Phi_P V_P \quad (55)$$

$$[S\Phi]V_p = S_{\phi,P} V_P \quad (56)$$

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

$$g_i = (\rho u)_i A_i \Phi_i - \Gamma_i A_i \left[\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right]_i \quad (57)$$

Όπου $i = e, w, s, n, h, l$.

3. Μόνιμες συνθήκες. Με αυτό το τρόπο επιτυγχάνεται η απαλοιφή της μερικής παραγωγού ως προς το χρόνο.

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

$$(CE + DE) - (CW + DW) + (CN + DN) - (CS + DS) + (CH + DH) - (CL + DL) = S_{\Phi,P} V_P \quad (58)$$

Όπου οι όροι CE, CW, CN, CS, CH και CL εκφράζουν τη ροή ποσότητας Φ λόγω συναγωγής από τις αντίστοιχες επιφάνειες του αντίστοιχου όγκου ελέγχου. Ενώ, όπου οι όροι DE, DW, DN, DS, DH, DL εκφράζουν τη ροή λόγω διάχυσης μέσω των αντιστοιχών επιφανειών του όγκου ελέγχου.

Οι αντίστοιχες σχέσεις για την διάχυση και την συναγωγή είναι οι κάτωθι:

$$C_i = (\rho u)_i A_i \Phi_i \quad (59)$$

$$D_i = \Gamma_i A_i \left[\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right]_i \quad (60)$$

όπου: $i = e, w, s, n, h, l$ ενώ οι τιμές της πυκνότητας και του συντελεστή Γ υπολογίζονται με γραμμική παρεμβολή (Spalding, 1972).

Για τον υπολογισμό των όρων συναγωγής και διάχυσης χρησιμοποιείται το υβριδικό σχήμα διακριτοποίησης για να γίνει δυνατή η εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων των κεντρικών και ανάντη διαφορών ενώ ταυτόχρονα να ελαχιστοποιηθούν τα μειονεκτήματά τους. Στο υβριδικό σχήμα η προσέγγιση των τιμών της Φ στα μέτωπα του Ο.Ε. είναι συναρτήσει της απόλυτης τιμής του τοπικού αριθμού Pe όπου έχει την ακόλουθη σχέση:

$$Pe_c = \frac{\rho u \Delta x}{\Gamma} \quad (61)$$

Και προκύπτει από τις κάτωθι σχέσεις:

Όρος συναγωγής :

$$F_i = (\rho u)_i \quad (62)$$

Όρος διάχυσης :

$$D_i = \left(\frac{\Gamma}{\Delta x} \right)_i \quad (63)$$

Όπου $i = w, s, e, n, h, l$.

Συνεπώς

$$Pe_c = \frac{F}{D} = \frac{(\rho u)_i}{\left(\frac{\Gamma}{\Delta x} \right)_i} = \frac{(\rho u)_i \Delta x_i}{\Gamma_i} \quad (64)$$

Από φυσική άποψη ο αριθμός Peclet εκφράζει τη σχετική ένταση της συναγωγής ως προς τη διάχυση. Μεγάλος αριθμός Peclet σημαίνει ότι η μεταφορά της Φ με συναγωγή είναι πιο σημαντική από εκείνη λόγω διάχυσης και ότι η ανάντη διαφορά είναι πιο πιθανή για την μεταφερόμενη τιμή της Φ .

Έτσι όταν :

- 1) $|Pe_c| \leq 2$ γίνεται χρήση των κεντρικών διαφορών
- 2) $|Pe_c| > 2$ γίνεται χρήση των ανάντη διαφορών και αφαιρείται ο όρος της διάχυσης

Οι εξισώσεις διακριτοποίησης για το υβριδικό σχήμα είναι για έναν οποιοδήποτε εσωτερικό κόμβο, P, θα είναι :

$$a_P \Phi_P = a_E \Phi_E + a_W \Phi_W + a_N \Phi_N + a_S \Phi_S + a_H \Phi_H + a_L \Phi_L \quad (65)$$

με κεντρικό συντελεστή :

$$a_p = a_w + a_e + a_s + a_n + a_l + a_h + \Delta F \quad (66)$$

Οι συντελεστές της παραπάνω εξίσωσης για το υβριδικό σχήμα διακριτοποίησης παίρνουν τις τιμές που αναφέρονται στον Πίνακα 11.

Πίνακας 16: Τιμές των συντελεστών της εξίσωσης του υβριδικού σχήμα.

a_w	$\max \left[F_w, \left(D_w + \frac{F_w}{2} \right), 0 \right]$
a_E	$\max \left[-F_e, \left(D_e - \frac{F_e}{2} \right), 0 \right]$
a_s	$\max \left[F_s, \left(D_s + \frac{F_s}{2} \right), 0 \right]$
a_n	$\max \left[-F_n, \left(D_n - \frac{F_n}{2} \right), 0 \right]$
a_l	$\max \left[F_l, \left(D_l + \frac{F_l}{2} \right), 0 \right]$
a_h	$\max \left[-F_h, \left(D_h - \frac{F_h}{2} \right), 0 \right]$
ΔF	$F_e - F_w + F_n - F_s + F_h - F_l$

Ενώ οι τιμές για τους συντελεστές διάχυσης (F) και συναγωγής (D) ορίζονται με βάση τις σχέσεις του Πίνακα 12.

Πίνακας 17: Οι σχέσεις σύμφωνα με τις οποίες καθορίζονται οι τιμές της διάχυσης και της συναγωγής.

Πλευρά	w	e	s	n	l	h
F	$(\rho u)_w A_w$	$(\rho u)_e A_e$	$(\rho v)_s A_s$	$(\rho v)_n A_n$	$(\rho w)_l A_l$	$(\rho w)_h A_h$
D	$\frac{\Gamma_w}{\delta x_{wp}} A_w$	$\frac{\Gamma_e}{\delta x_{pe}} A_e$	$\frac{\Gamma_s}{\delta y_{sp}} A_s$	$\frac{\Gamma_n}{\delta y_{pn}} A_n$	$\frac{\Gamma_l}{\delta z_{pl}} A_w$	$\frac{\Gamma_h}{\delta z_{ph}} A_h$

6.3 Επίλυση του διακριτοποιημένου αλγεβρικού συστήματος

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου, το τρίτο στάδιο της μεθόδου επίλυσης περιλαμβάνει την επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων. Αυτό γίνεται με χρήση αριθμητικών επαναληπτικών μεθόδων και στο τέλος προκύπτει ένα σύστημα «τυπικά» γραμμικών εξισώσεων. Κατά συνέπεια, γίνεται κατανοητό πως η επιλογή του συστήματος των εξισώσεων διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο ως προς την ταχύτητα επίλυσης του. Οι μέθοδοι επίλυσης γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων μπορούν να ταξινομηθούν σε α) Άμεσες μέθοδοι και β) Επαναληπτικές μέθοδοι. Η πιο γνωστές άμεσες μέθοδοι επίλυσης είναι η μέθοδος Gauss και η μέθοδος LU-παραγοντοποίησης, μέθοδος Thomas. Από τις επαναληπτικές μεθόδους επίλυσης είναι η μέθοδος επίλυσης σημείο προς σημείο, μέθοδος Jacobi, μέθοδος Gauss-Seidel, μέθοδος SIP (Strongly Implicit Procedure) κ.α.

Η βασική διαφορά των δύο μεθόδων είναι ο αριθμός των βημάτων που απαιτούνται για την επίτευξη της λύσης. Οι άμεσες μέθοδοι οδηγούν στην λύση (εφόσον αυτή υπάρχει) μετά από ένα σταθερό αριθμό συστηματικών βημάτων. Οι επαναληπτικές μέθοδοι οδηγούν στη λύση ασυμπτωτικά, μέσω μιας προκαθορισμένης επαναληπτικής διαδικασίας. Τα κριτήρια με τα οποία αξιολογούνται οι μέθοδοι επίλυσης συστημάτων γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων είναι η ακρίβεια, η αποτελεσματικότητα, η γενικότητα και η απλότητα (Μαρκάτος και Ασημακόπουλος, 1995).

Πιο συγκεκριμένα:

- Η ακρίβεια αναφέρεται στην ικανότητα της μεθόδου να παρέχει τη λύση με τον επιθυμητό αριθμό σημαντικών ψηφίων
- Η αποτελεσματικότητα αναφέρεται στην ποσότητα του υπολογιστικού έργου που απαιτείται για την επίτευξη της λύσης με την επιθυμητή ακρίβεια.
- Η γενικότητα αναφέρεται στην ικανότητα της μεθόδου να συμπεριφέρεται αποδοτικά σε ένα μεγάλο εύρος προβλημάτων και συνθηκών.
- Η απλότητα αναφέρεται στην ευκολία κατανόησης και εφαρμογής της μεθόδου.

6.4 Αλγόριθμος επίλυσης

6.4.1 Αλγόριθμος επίλυσης - Σύζευξη ταχύτητας-πίεσης (Εξίσωση διόρθωσης πίεσης)

Στην παρούσα εργασία για την επίλυση του φυσικού προβλήματος χρησιμοποιείται ο εμπορικός κώδικας υπολογιστικής ρευστοδυναμικής PHOENICS της εταιρείας CHAM Ltd. Ο αλγόριθμος επίλυσης του λογισμικού PHOENICS είναι ο SIMPLEST (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations Shortened) που επινοήθηκε από τον Dudley Brian Spalding το 1980 και αποτελεί εξέλιξη του αλγόριθμου SIMPLE. Η μέθοδος μπορεί να συνοψισθεί σε δύο στάδια τα οποία είναι : α) Το στάδιο εκτίμησης ενός αρχικού πεδίου πίεσης P^* και β) το στάδιο διόρθωσης αυτού μέχρι οι ταχύτητες να ικανοποιήσουν την εξίσωση συνέχειας και τις εξισώσεις ορμής.

Το βασικό επιχείρημα στο οποίο στηρίχθηκε ο Spalding για την περαιτέρω εξέλιξη του αλγορίθμου SIMPLE ήταν πως οι αναταράξεις σε μια κατάσταση καθαρής διάχυσης αλλά και καθαρής συναγωγής είναι ισοδύναμες με την αναπαραγωγή των σφαλμάτων σε όλο το πεδίο λύσεων. Στην περίπτωση της διάχυσης η αναπαραγωγή γίνεται προς όλες τις κατευθύνσεις και αποσβένονται γρήγορα ενώ στην περίπτωση της συναγωγής τα σφάλματα αναπαράγονται κατά μήκος της ροής χωρίς να υφίστανται καμία αλλαγή. Πιο συγκεκριμένα στο αλγόριθμο SIMPLEST οι όροι διάχυσης μαζί με του όρους πηγής διαχωρίζονται και αντιμετωπίζονται ως γνωστές σταθερές εν αντιθέσει με τον αλγόριθμο SIMPLE όπου οι όροι διάχυσης και συναγωγής χρησιμοποιούνται στην εξίσωση διόρθωσης των ταχυτήτων. Για το λόγο αυτό με τη χρήση του αλγορίθμου SIMPLEST υπάρχει ομαλότερη και ταχύτερη σύγκλιση αλλά και απαιτούνται μικρότερες υποχαλαρώσεις.

Ο αλγόριθμος SIMPLEST ακολουθεί τα ίδια βήματα επίλυσης με το αλγόριθμο SIMPLE τα οποία είναι τα εξής: Η μέθοδος μπορεί να συνοψισθεί σε δύο στάδια:

Τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα κάτωθι:

1. Εκτίμηση αρχικού πεδίου πίεσης P^*
2. Επίλυση των εξισώσεων ορμής, και εύρεση των u^* , v^* , w^* με χρήση των σχέσεων:

$$a_e u_e^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + b + (P_P^* - P_E^*) A_e$$
$$a_n v_n^* = \sum a_{nb} v_{nb}^* + b + (P_P^* - P_N^*) A_N$$

$$a_t w_t^* = \sum a_{nb} w_{nb}^* + b + (P_P^* - P_T^*) A_t$$

3. Επίλυση της εξίσωσης ως προς P'
4. Υπολογισμός της πίεσης P από την σχέση $P = P^* + P'$
5. Υπολογισμός των u,v,w με χρήση των σχέσεων

$$u_e = u_e^* + d_e(P'_p - P'_E)$$

$$v_n = v_n^* + d_n(P'_p - P'_N)$$

$$w_t = u_t^* + d_t(P'_p - P'_T)$$

6. Επίλυση της διακριτοποιημένης διαφορικής εξίσωσης για τα υπόλοιπα βαθμωτά μεγέθη.
7. Επανάληψη των παραπάνω βημάτων αντικαθιστώντας όπου $P^* = P'$ μέχρι όπου πραγματοποιηθεί σύγκλιση .

6.4.2 Σύγκλιση

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω μία από τις ιδιότητες που πρέπει να έχει μια αριθμητική μέθοδος είναι η σύγκλιση. Μία επαναληπτική μέθοδος θεωρείται ότι έχει συγκλίνει εφόσον η τιμή που παράγει είναι ίση με την αναλυτική λύση καθώς το μέγεθος του πλέγματος τείνει στο μηδέν. Στα περισσότερα προβλήματα όμως η αναλυτική λύση είναι πολύ να επιτευχθεί. Γι' αυτό το λόγο μια αριθμητική μέθοδος θεωρείται ότι έχει συγκλίνει εφόσον οι τιμές των μεταβλητών του αριθμητικού πεδίου κινούνται μεταξύ κάποιων σταθερών τιμών καθώς η μέθοδος επίλυσης εξελίσσεται. Αναλυτικότερα οι επαναληπτικές μέθοδοι είναι τέτοιες ώστε με την πρόοδο των επαναλήψεων το σφάλμα που εμφανίζεται να βαίνει διαρκώς μειούμενο και να σταθεροποιείτε γύρω από μία σταθερή τιμή. Η σύγκλιση παρατηρείται από τη πορεία του «υπολοίπου» κάθε μεταβλητής. Για την μεταβλητή Φ ενός φυσικού προβλήματος στο κελί P ορίζεται ως:

$$R_P = \frac{|a_P \Phi_P - \sum_{nb} a_{nb} \Phi_{nb} - b|}{|a_P \Phi_P|} \quad (67)$$

Ενώ το συνολικό «υπόλοιπο» μιας μεταβλητής σε ολόκληρο το αριθμητικό πεδίο είναι:

$$R^\Phi = \frac{\sum_{\text{σύνολο κελιών}} |a_P \Phi_P - \sum_{nb} a_{nb} \Phi_{nb} - b|}{\sum_{\text{σύνολο κελιών}} |a_P \Phi_P|} \quad (68)$$

Η συνήθης πρακτική για να θεωρηθεί ότι ένα πρόβλημα έχει συγκλίνει είναι το «υπόλοιπο» να είναι της τάξης $1E-3$ με $1E-4$. Αξίζει να σημειωθεί και να τονισθεί πως αν τα «υπόλοιπα» πληρούν τα κριτήρια, δεν σημαίνει ότι και η επίλυση έχει συγκλίνει, δηλαδή τα «υπόλοιπα» είναι μια ικανή αλλά όχι αναγκαία συνθήκη σύγκλισης. Ένα πρόβλημα είναι δυνατόν να θεωρηθεί ότι έχει συγκλίνει και στην περίπτωση που οι τιμές των «υπολοίπων» δεν πληρούν τα κριτήρια που έχει θέσει ο χρήστης αλλά παραμένουν σταθερά. Σε κάθε περίπτωση πάντως αποτελούν μία χρήσιμη ένδειξη της πορείας της επαναληπτικής μεθόδου.

Για το συγκεκριμένο πρόβλημα στην παρούσα εργασία οι συγκεκριμένες συνθήκες σύγκλισης που επιβάλλονται είναι οι εξής:

- Μάζα (P1): $\rho * W$
- Ταχύτητες (v,u,w): $\rho * W^2$
- Ενθαλπία (h): $\rho * W * h$

Επιπλέον, ως κριτήριο σύγκλισης και επιβεβαίωση της σύγκλισης λήφθηκε και η μεταβολή της κατανομής μεγεθών όπως ενθαλπία (h), συγκέντρωση (c) κ.α. σε διάφορα σημεία και επίπεδα του πεδίου ροής κατά την πρόοδο των υπολογιστών.

6.4.3 Συντελεστές υποχαλάρωσης

Για τον περιορισμό της επιρροής του αποτελέσματος της προηγούμενης αριθμητικής επανάληψης γίνεται η τεχνική της χαλάρωσης και πιο συγκεκριμένα η με χρήση συντελεστών υποχαλάρωσης. Η προσέγγιση της τεχνικής χαλάρωσης μπορεί να πάρει και την κάτωθι μορφή για μεταβλητή την Φ στο κελί P:

$$\Phi_p^{new,used} = \Phi_p^{old} + U(\Phi_p^{new,prediction} - \Phi_p^{old}) \quad (72)$$

Όπου U είναι ο συντελεστή χαλάρωσης και αναλόγως τις παρακάτω συνθήκες χαρακτηρίζεται ως::

- Συντελεστής υποχαλάρωσης εάν $U < 1$. Σε αυτές τις περιπτώσεις δύναται να επιβραδύνει την σύγκλιση με ταυτόχρονη όμως αύξηση της σταθερότητας της αριθμητικής επίλυσης.
- Συντελεστής υπερχαλάρωσης εάν $U > 1$. Σε αυτές τις περιπτώσεις επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ταχύτητα σύγκλισης με ταυτόχρονη μείωση της σταθερότητας των υπολογισμών.

Ο υπολογιστικός κώδικας PHOENICS κάνει χρήση δύο μεθόδων υποχαλάρωσης οι οποίες είναι:

- Συντελεστής υποχαλάρωσης ψευδοχρονικού βήματος (False Time Step Relaxation)

Με τη συγκεκριμένη μέθοδο γίνεται η υποχαλάρωση των μεταβλητών όπως οι ταχύτητες, ενθαλπία και συγκεντρώσεις του χημικού είδους. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο γίνεται η προσθήκη στο δεξιό μέλος της γενικής εξίσωσης, η διακριτοποίηση του ρυθμού ροής:

$$\frac{\rho_t V_p}{\delta t_{false}} (\Phi^* - \Phi_p) = \beta (\Phi^* - \Phi_p) \quad (73)$$

Όπου V_p ο όγκος κελιού, Φ^* η αποθηκευμένη τιμή της Φ και δt_{false} το ψευδές χρονικό βήμα.

Όταν επιτευχθεί η σύγκλιση θα ισχύει $\Phi^* = \Phi_p$ οπότε και η συνεισφορά του όρου πηγής εξαλείφεται.

- Συντελεστής γραμμικής υποχαλάρωσης (Linear Relaxation)

Με τη συγκεκριμένη μέθοδο έγινε η υποχαλάρωση των μεταβλητών όπως της πίεσης καθώς και για τα μεγέθη της τυρβώδους ροής. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο η μεταβλητή Φ καθορίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$\Phi^* = \alpha \Phi_{new} + (1 - \alpha) \Phi_{old} \quad (71)$$

όπου Φ^* η αποθηκευμένη τιμή της μεταβλητής Φ , Φ_{new} η τιμή που προήλθε από την τελευταία σάρωση, Φ_{old} η προηγούμενη αποθηκευμένη τιμή και α ο συντελεστής γραμμικής υποχαλάρωσης που είναι πάντα μικρότερος από τη μονάδα.

6.4.4 Υπολογιστικές παράμετροι και χρόνοι προσομοίωσης

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 6.2.2 η αριθμητική επίλυση του προβλήματος έγινε με τη χρήση του εμπορικού κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής PHOENICS έκδοσης του 2003 της εταιρείας CHAM ltd. Το λειτουργικό πρόγραμμα των Η/Υ είναι Unix με επεξεργαστές 2.8 GHz και μνήμη 3 GB RAM.

Τα σενάρια που εξετάστηκαν αφορούσαν 3 διαφορετικές ταχύτητες (8 m/s, 10 m/s και 12 m/s), δύο διαφορετικά μεγέθη δεξαμενών (70 m και 85 m) και τέλος τρία διαφορετικά είδη καυσίμων (αργό πετρέλαιο και ντήζελ κίνησης, βενζίνη).

Για την επίλυση του κάθε σεναρίου απαιτούντο περί τις 12000 επαναλήψεις το οποίο μεταφράζεται χρονικά σε ένα μέσο όρο 288 ωρών ανά εξεταζόμενο σενάριο. Το κάθε σενάριο πραγματοποιήθηκε με την επίλυση του προβλήματος σε δώδεκα «παρτίδες» των 1000 επαναλήψεων και το μέγεθος του κάθε αποτελέσματος ήταν περίπου 650 MB. Σκοπός αυτής της διαδικασίας ήταν παρακολούθηση του φαινομένου και η εξέταση της σύγκλισης όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα –Συζήτηση αποτελεσμάτων

7.1 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων για κάθε παραμετρική εφαρμογή. Τα σενάρια-παραμετρική εφαρμογή γίνεται για δύο όμοιες δεξαμενές σε κάθε σενάριο με διαφορετικού τύπου καυσίμου και διαφορετικές ταχύτητες ανέμου. Τα σενάρια αυτά συνοψίζονται στον Πίνακα 18 ενώ στον Πίνακα 19 απεικονίζονται η έκλυση θερμότητας από κάθε όρο πηγής, η συνολική έκλυση πηγής καθώς και ο ρυθμός απώλειας καυσίμου για κάθε σενάριο.

Πίνακας 18: Σενάρια – παραμετρικές εφαρμογές.

Σενάριο	Διάμετρος πρώτης δεξαμενής (m)	Διάμετρος δεύτερης δεξαμενής (m)	Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Τύπος Καυσίμου
No 1	70	70	8	Crude Oil
No 2	70	70	10	Crude Oil
No 3	70	70	12	Crude Oil
No 4	70	70	8	Diesel Oil
No 5	70	70	10	Diesel Oil
No 6	70	70	12	Diesel Oil
No 7	70	70	8	Gasoline
No 8	70	70	10	Gasoline
No 9	70	70	12	Gasoline
No 10	85	85	8	Crude Oil
No 11	85	85	10	Crude Oil
No 12	85	85	12	Crude Oil
No 13	85	85	8	Diesel Oil
No 14	85	85	10	Diesel Oil
No 15	85	85	12	Diesel Oil
No 16	85	85	8	Gasoline
No 17	85	85	10	Gasoline
No 18	85	85	12	Gasoline

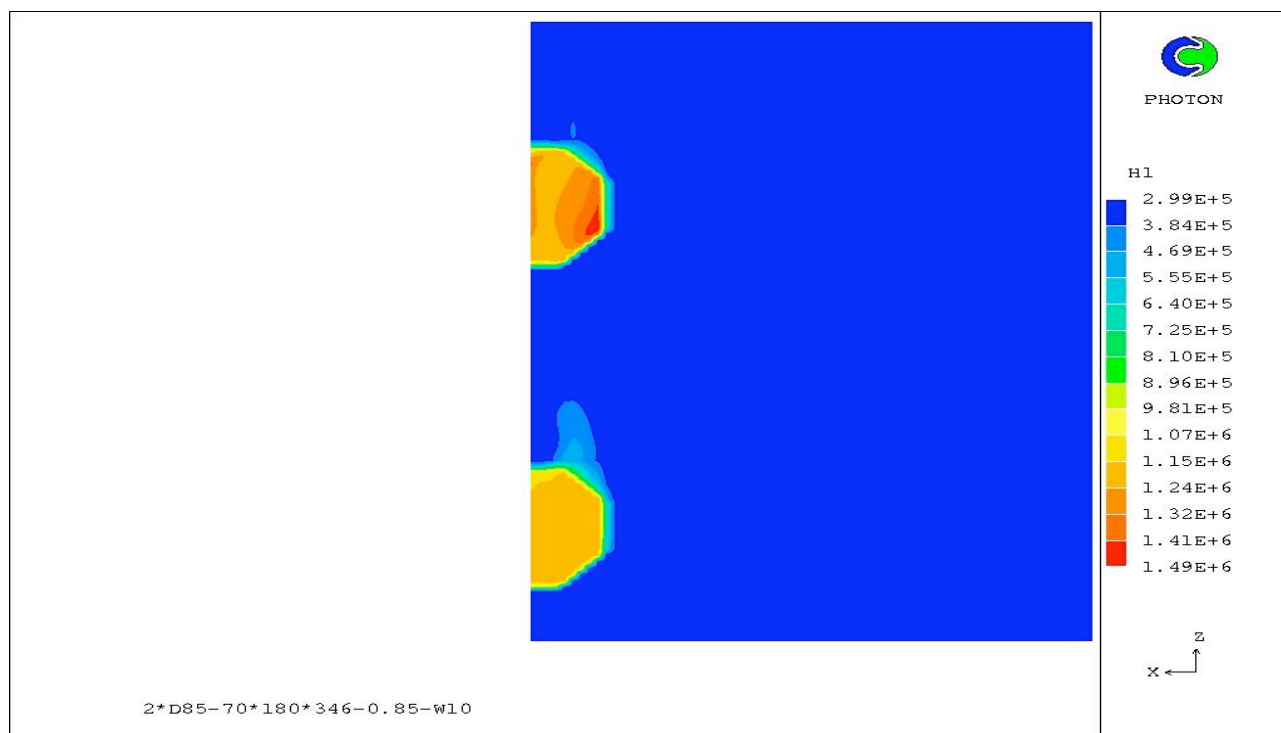
Πίνακας 19: Εκκλίσεις θερμότητας όρων πηγής των παραμετρικών εφαρμογών.

Σενάριο	HRR πρώτης δεξαμενής (MW/m^2)	HRR δεύτερης δεξαμενής (MW/m^2)	HRR συνολικά (MW/m^2)	Ρυθμός απώλειας μάζας καυσίμου ($kg/m \cdot s^2$)	Τύπος καυσίμου
No 1	1	1	2	0.035	Crude Oil
No 2	1	1	2	0.035	Crude Oil
No 3	1	1	2	0.035	Crude Oil
No 4	1.3	1.3	2.6	0.051	Diesel Oil
No 5	1.3	1.3	2.6	0.051	Diesel Oil
No 6	1.3	1.3	2.6	0.051	Diesel Oil
No 7	1.5	1.5	3	0.048	Gasoline
No 8	1.5	1.5	3	0.048	Gasoline
No 9	1.5	1.5	3	0.048	Gasoline
No 10	1	1	2	0.035	Crude Oil
No 11	1	1	2	0.035	Crude Oil
No 12	1	1	2	0.035	Crude Oil
No 13	1.3	1.3	2.6	0.051	Diesel Oil
No 14	1.3	1.3	2.6	0.051	Diesel Oil
No 15	1.3	1.3	2.6	0.051	Diesel Oil
No 16	1.5	1.5	3	0.048	Gasoline
No 17	1.5	1.5	3	0.048	Gasoline
No 18	1.5	1.5	3	0.048	Gasoline

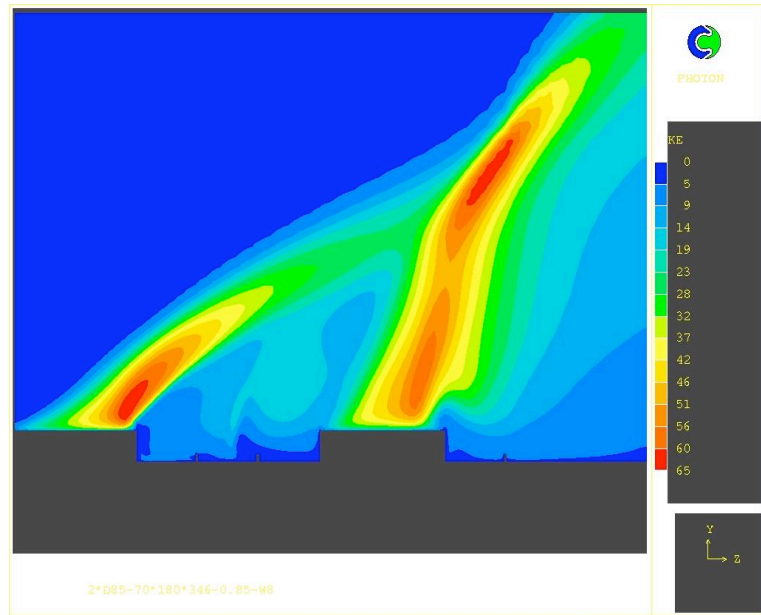
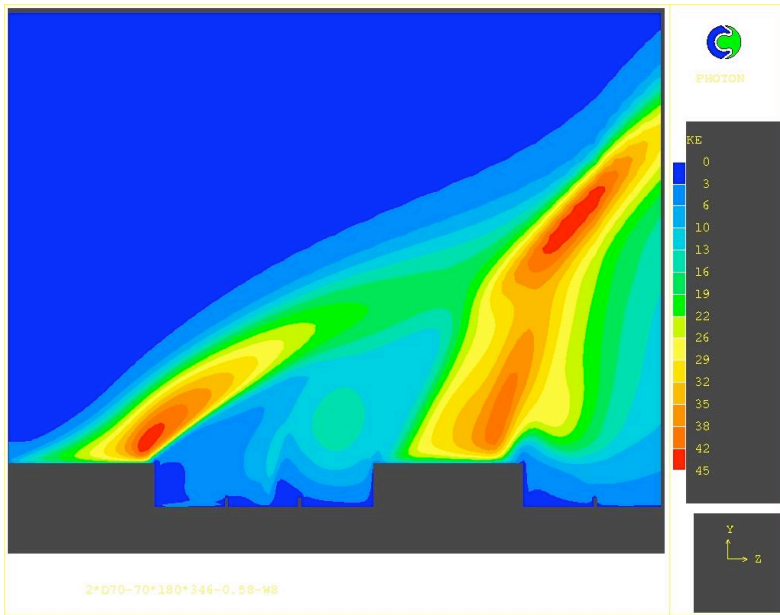
7.2 Απεικόνιση του πεδίου ροής - πρώτη εκτίμηση

Η προσομοίωση της πλάγιας όψης και κάτοψης των δύο δεξαμενών καθώς και πως αυτές απεικονίζονται φαίνονται στην Εικόνα 22. Επιπλέον οι όροι πηγής και των δύο δεξαμενών απεικονίζονται στην Εικόνα 23.

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, στην περίπτωση πυρκαγιάς δύο δεξαμενών που βρίσκονται στην ίδια ευθεία αναμένεται να παρατηρηθούν δύο σημαντικά φαινόμενα. Πρώτον, ο καπνός-πλούμιο της πρώτης δεξαμενής να απορροφάει σημαντικό ποσό της δυναμικής ενέργειας του ανέμου με αποτέλεσμα το πλούμιο που αναδύεται από την δεύτερη δεξαμενή να βρίσκεται υπό την επίδραση μικρότερης ταχύτητας. Αυτό γίνεται εμφανές από τις Εικόνα 24 όπου διακρίνεται η κατανομή των ταχυτήτων V1 και W1. Δεύτερον μεταξύ των δύο δεξαμενών να αναπτύσσονται έντονα φαινόμενα ανακυκλοφορίας που δημιουργούνται αφετέρου λόγω της επίδρασης του όρου πηγής της δεύτερης δεξαμενής και αφενός της επίδρασης των τοιχίων ασφαλείας που βρίσκονται περιμετρικά της κάθε δεξαμενής. Αυτό γίνεται εμφανές από τα διανύσματα της ταχύτητας όπως αυτά απεικονίζονται στην Εικόνα 25 καθώς και την Εικόνα 26 όπου απεικονίζεται η κατανομή της κινητικής ενέργειας της τύρβης στην περιοχή πλησίον των δεξαμενών. Η δημιουργία των παρακάτω εικόνων γίνεται με την χρήση του προγράμματος γραφικών PHOTON το οποίο εμπεριέχεται στον πρόγραμμα PHOENICS.

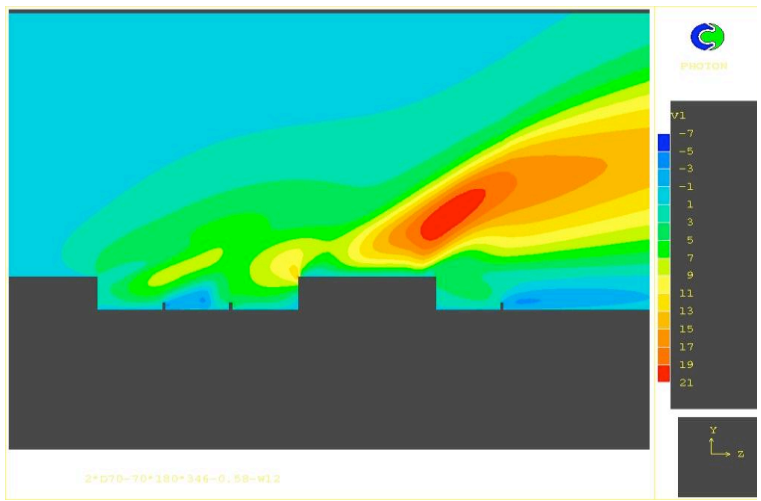
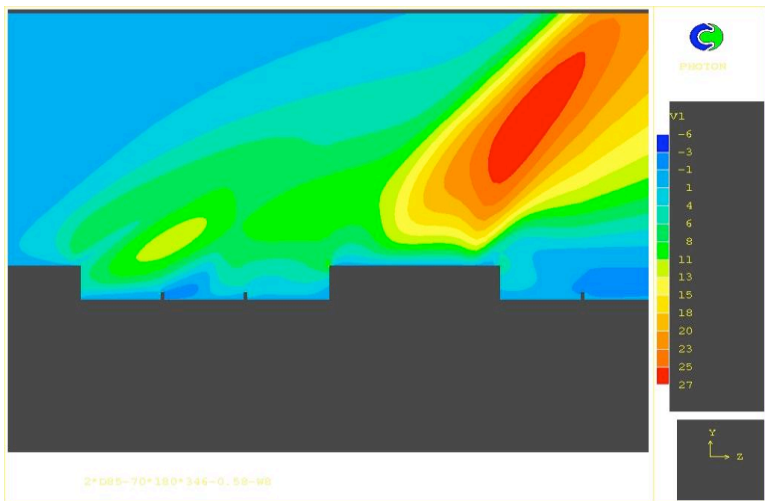


Εικόνα 22: Η απεικόνιση των όρων πηγής των δύο δεξαμενών.



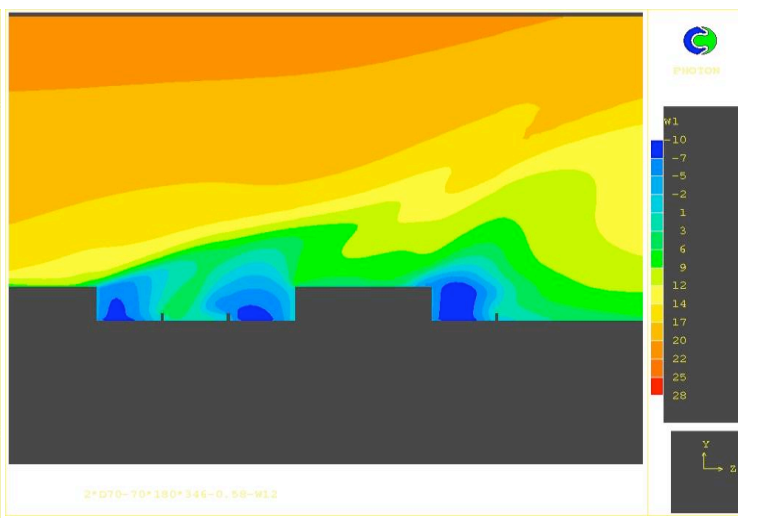
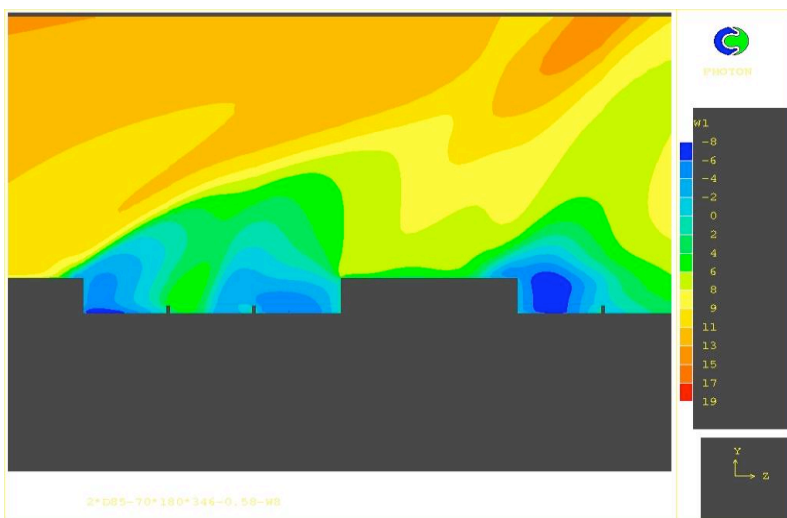
Εικόνα 23α: Κατανομή της KE στο σενάριο Νο1.

Εικόνα 23β: Κατανομή της KE στο σενάριο Νο 16.



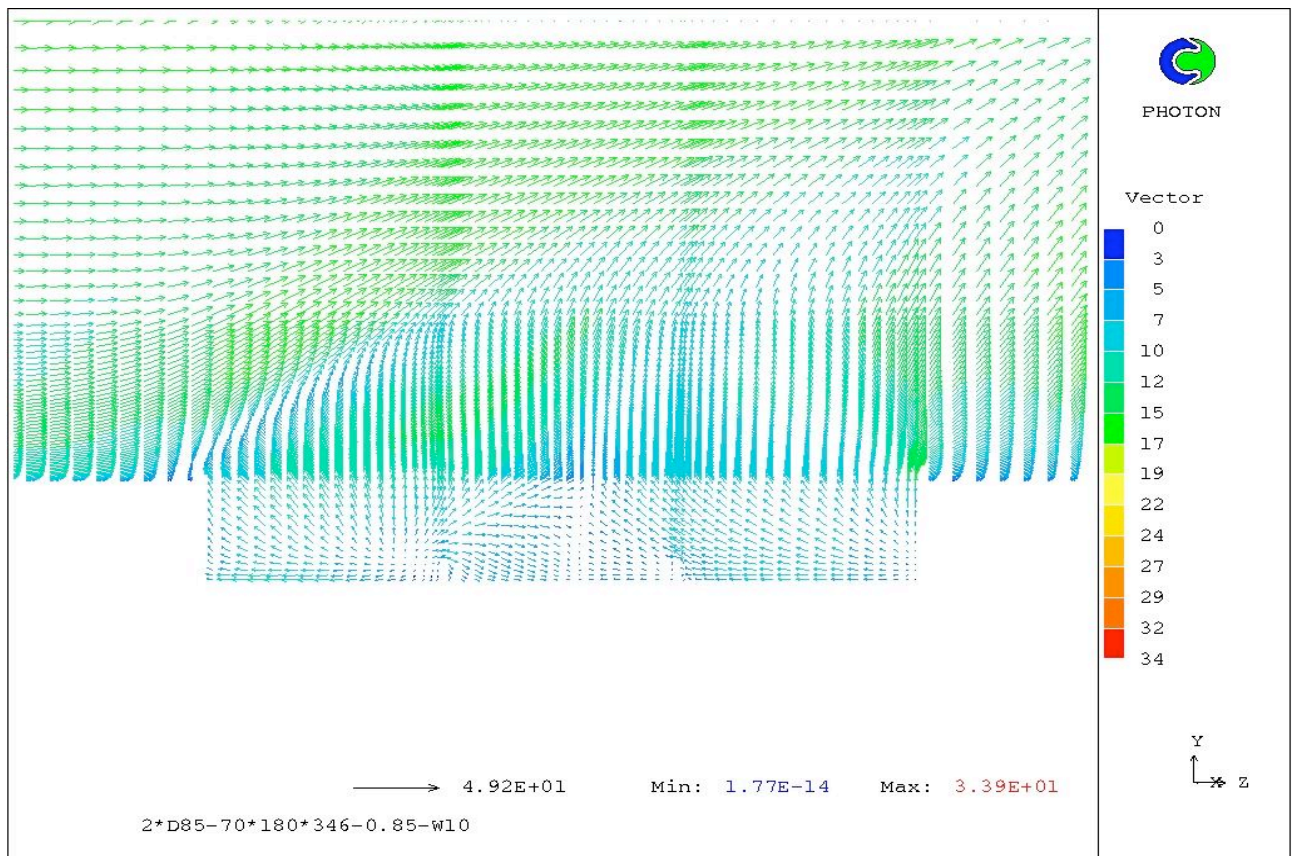
Εικόνα 24α: Κατανομή της V1 στο σενάριο Νο 10.

Εικόνα 24β: Κατανομή της V1 στο σενάριο Νο 3.



Εικόνα 25α: Κατανομή της W1 στο σενάριο Νο 10.

Εικόνα 25β: Κατανομή της W1 στο σενάριο Νο 3.



Εικόνα 26: Κατανομή των διανυσμάτων ταχύτητας στην περιοχή μεταξύ των δύο δεξαμενών.

7.3 Διασπορά των τοξικών ρύπων

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 4.4, το πεδίο ροής είναι μήκους 34521 m, 1200 m πλάτος και ύψους 3000 m. Η μελέτη για ως προς την διασπορά των τοξικών ρύπων εστιάζεται για το επίπεδο του εδάφους κατά μήκος (άξονας z) του επιπέδου συμμετρίας του πεδίου ροής για ύψος 1 m καθώς και η κατανομή τους ρύπων καθ' ύψος (άξονας y). Πιο συγκεκριμένα η απεικόνιση της διασποράς των ρύπων καθ' ύψος γίνεται με την επιλογή παράλληλων επιπέδων σε αποστάσεις που αντιστοιχούν με το τέλος κάθε περιοχής (regions). Με αυτόν τον τρόπο γίνεται μια καλύτερη εξήγηση ως προς την απουσία ρύπων σε συγκεκριμένα σημεία αλλά και της μεταφοράς τους σε μεγαλύτερες αποστάσεις.

7.3.2 Τοξικοί ρύποι

Οι τοξικοί ρύποι που υπολογίζονται στην συγκεκριμένη εργασία είναι το μονοξείδιο του Άνθρακα (CO), Διοξείδιο του Θείου (SO₂), Πολυκυκλικών Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες (PAHs) και καπνός (Smoke) και τα χαρακτηριστικά τους είναι τα κάτωθι:

- Μονοξείδιο του Άνθρακα (CO): Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) είναι ένα άοσμο, άγευστο, άχρωμο αέριο με πυκνότητα ελαφρώς μικρότερη του ατμοσφαιρικού αέρα, και είναι προϊόν ατελούς καύσης ύλης που περιέχει άνθρακες και θεωρείται δηλητηριώδες για τους έμβιους οργανισμούς. Η διάρκεια ζωής του στην ατμόσφαιρα είναι μικρή καθώς αντιδρά με το οξυγόνο (O) που υπάρχει στην ατμόσφαιρα σχηματίζοντας διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Επιπλέον αντιδρά ταχύτατα με το ακετυλένιο (C₂H₂), χλώριο (Cl), οξείδια του αζώτου (NO_x). Ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να προσβληθεί ο ανθρώπινος οργανισμός είναι μέσω της εισπνοής και τα συμπτώματα ποικίλουν αναλόγως του βαθμού έκθεσης. Τα συμπτώματα που παρατηρούνται από την εισπνοή του μονοξειδίου του άνθρακα είναι πονοκέφαλος, σύγχυση, ζαλάδα, ναυτία, αδυναμία και λιποθυμία. Η βραχυπρόθεσμη έκθεση οδηγεί σε καρδιακές και εγκεφαλικές διαταραχές ενώ η μακροπρόθεσμη έκθεση δύναται να έχει επιπτώσεις στο καρδιαγγειακό σύστημα καθώς και στο κεντρικό νευρικό σύστημα (Κ.Ν.Σ).
- Διοξείδιο του Θείου (SO₂): Το διοξείδιο του θείου είναι άχρωμο και με έντονη οσμή αέριο, μεγαλύτερης πυκνότητας του αέρα, το οποίο δημιουργείται από την καύση ύλης που περιέχει ενώσεις του Θείου (S). Η περαιτέρω οξείδωση του SO₂ στην ατμόσφαιρα οδηγεί στον σχηματισμό του τριοξειδίου του Θείου (SO₃) το οποίο αντιδρώντας με το νερό σχηματίζοντας θειικό οξύ το οποίο είναι ιδιαίτερα διαβρωτικό. Η έκθεση ενός έμβιου οργανισμού γίνεται είτε μέσω της εισπνοής είτε με την άμεση επαφή. Η

βραχυχρόνια έκθεση προκαλεί ερεθισμό στα μάτια και το αναπνευστικό σύστημα που μπορεί να οδηγήσει σε παροδικές ασθένειες σχετιζόμενες με την εκπνοή. Η μακροπρόθεσμη έκθεση αντιθέτως δύναται να οδηγήσει σε άσθμα καθώς και σε πρόωρο θάνατο.

- Πολυκυκλικοί Αρωματικοί Υδρογονάνθρακες (PAHs): Οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons), αποτελούν μια από τις σημαντικότερες κατηγορίες ρύπων και. Είναι οργανικές ενώσεις που εμπεριέχουν συμπυκνωμένους αρωματικούς δακτυλίους και εκλύονται πέρα από τις φυσικές πηγές (π.χ. γεωλογικά φαινόμενα) αλλά και από ανθρωπογενείς δραστηριότητες και παράγοντες όπως πυρκαγιές. Οι PAHs παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις στα υγρά καύσιμα και εκλύονται στην ατμόσφαιρα ως προϊόντα ατελούς καύσης ή πυρόλυσης οργανικών ενώσεων ενώ βρίσκονται στην ατμόσφαιρα σε σωματιδιακή κατάσταση, προσροφημένο σε αιωρούμενα σωματίδια. Οι συγκεκριμένοι ρύποι θεωρούνται ως ιδιαίτερα τοξικοί και έχουν ταχτοποιηθεί ως υπεύθυνοι για καρκινογένεσεις, μεταλλάξεις και τερατογένεσεις. Το πιο διαδεδομένο και γνωστό σύμπλοκο των PAHs είναι το βενζο(a)πυρένιο. Η έκθεση στον συγκεκριμένο γίνεται μέσω τις εισπνοής, επαφής με το δέρμα και την κατάποση.
- Καπνός (Smoke): Ο καπνός διακρίνεται σε λευκό, γαλάζιο, μαύρο και βρίσκεται στον αέρα υπό κolloειδή διασπορά και η διάκριση του γίνεται αναλόγως της διάμετρος των σωματιδίων του άνθρακα - σταγονιδίων. Έτσι, λευκός χαρακτηρίζεται ο καπνός του οποίου τα σταγονίδια είναι διαμέτρου μεγαλύτερης των 1 μm, ενώ όταν τα σταγονίδια είναι διαμέτρου μικρότερης των 1μm και μεγαλύτερης των 0.4 μm. Τέλος ο μαύρος καπνός ή αλλιώς αιθάλη ορίζονται εκείνα τα σωματίδια άνθρακα με μέγεθος μικρότερο των 0.2 μm. Ο καπνός οδηγεί σε ερεθισμούς σε δέρμα και μάτια, ασφυξία, δηλητηρίαση αναλόγως της σύστασης του καύσιμου της πυρκαγιάς ενώ μία από τις άμεσες επιπτώσεις που μπορεί να έχει ο καπνός είναι και η πρόκληση εγκαυμάτων λόγω της μεταφοράς θερμότητας μέσω των σωματιδίων του. Οι πυρκαγιές σε δεξαμενές καυσίμων όπως είναι φυσικό οδηγούν σε παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων καπνού. Αυτό οφείλεται στην ατελής καύση των οργανικών ενώσεων λόγω της έλλειψης επαρκούς οξυγόνου (O₂) στο εσωτερικό της πυρκαγιάς. Επιπλέον παρατηρείται το φαινόμενο της απορρόφησης αρκετής ενέργειας με την μορφή θερμότητας από τον καπνό με αποτέλεσμα την μείωση της θερμικής ακτινοβολίας.

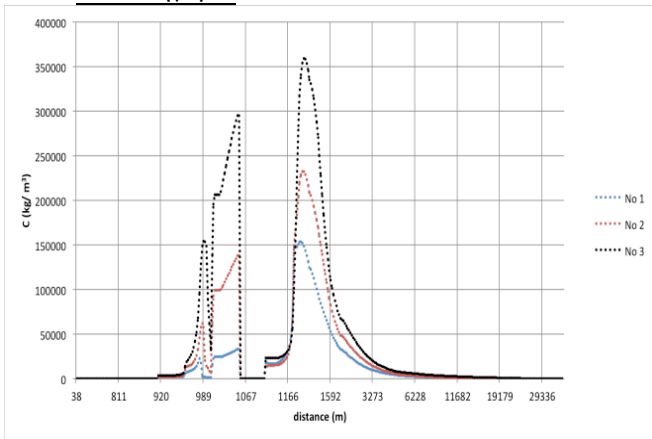
7.3.3 Διασπορά τοξικών ρύπων στο επίπεδο του εδάφους κατά μήκος του πεδίου ροής.

Σε κάθε διάγραμμα γίνεται απεικόνιση της διασποράς των ρύπων ως προς το πεδίο ροής συγκεντρωτικά για τα σενάρια με ίδιες διαμέτρους δεξαμενών, ίδιου τύπου καύσιμο αλλά διαφορετικές ταχύτητες. Εν συνεχεία η συγκέντρωση μετατρέπεται στην τελική συγκέντρωση με χρήση του συντελεστή εκπομπής του κάθε ρύπου όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 5 παράγραφο 7.

Όλα τα σενάρια εμφανίζουν όμοιες κατανομές των ρύπων οι οποίες εξαρτώνται κυρίως από την ταχύτητα του ανέμου αλλά και τις ανακυκλοφορίες που στο συμβαίνουν στο ενδιάμεσο των τοιχιών ασφαλείας και κυρίως της δεύτερης δεξαμενής. Η συγκέντρωση που παρατηρείται σύμφωνα με τα διαγράμματα περιμετρικά της πρώτης δεξαμενής εμφανίζεται χαμηλή ενώ στην απόσταση ενδιάμεσα των δύο δεξαμενών εμφανίζει κατακόρυφη αύξηση. Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί πως στα διαγράμματα εμφανίζονται περιοχές, ιδιαίτερα στις αποστάσεις από 917 m έως 1110 m, όπου οι συγκεντρώσεις διακρίνονται ως μηδενικές. Αυτό συμβαίνει καθώς εντός αυτής της απόστασης βρίσκονται τα τοιχία ασφαλείας και οι δεύτερη δεξαμενή. Επιπλέον, η μέγιστη συγκέντρωση βάση των διαγραμμάτων παρουσιάζεται για τα σενάρια εκείνα στα οποία η ταχύτητα του ανέμου είναι μέγιστη, αυτό εξηγείται καθώς οι ρύποι λόγω της δυναμικής του ανέμου δεν διαχέονται υψηλότερα αλλά οδηγούνται σε χαμηλότερο ύψος και πλησιέστερα στο επίπεδο του εδάφους.

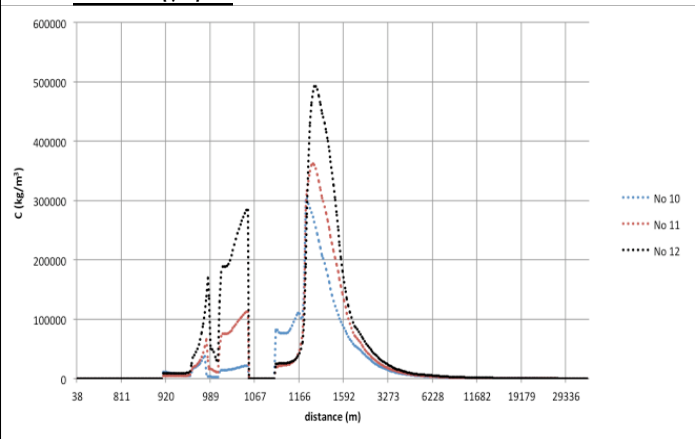
Η παρουσίαση των διαγραμμάτων ακολουθεί την παρακάτω δομή. Στην πρώτη κατηγορία παρουσιάζεται η κατανομή για δεξαμενές διαμέτρου 70 m ενώ στην δεύτερη κατηγορία παρουσιάζεται η κατανομή για δεξαμενές διαμέτρου 85 m. Κάθε διάγραμμα περιλαμβάνει τις κατανομές για ένα τύπο καυσίμου (Αργό πετρέλαιο, ντήζελ, βενζίνη) και για τις τρεις ταχύτητες (8m/s, 10 m/s, 12 m/s).

1^η Κατηγορία

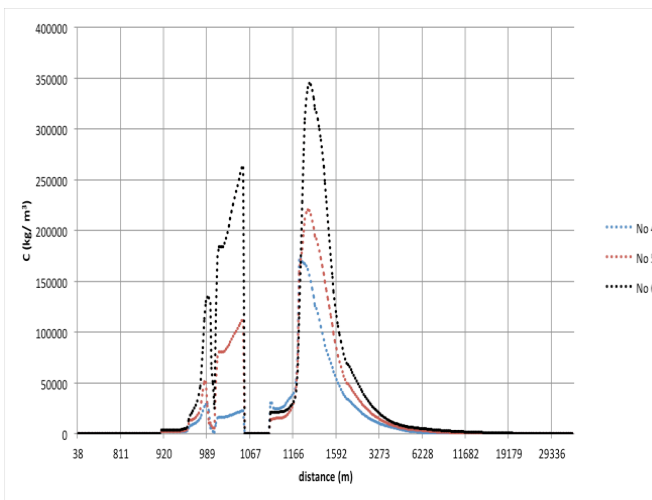


Διάγραμμα 3α: Κατανομή ρύπων από αργό πετρέλαιο ως προς πεδίο ροής για τα σενάρια No 1, No 2, No 3.

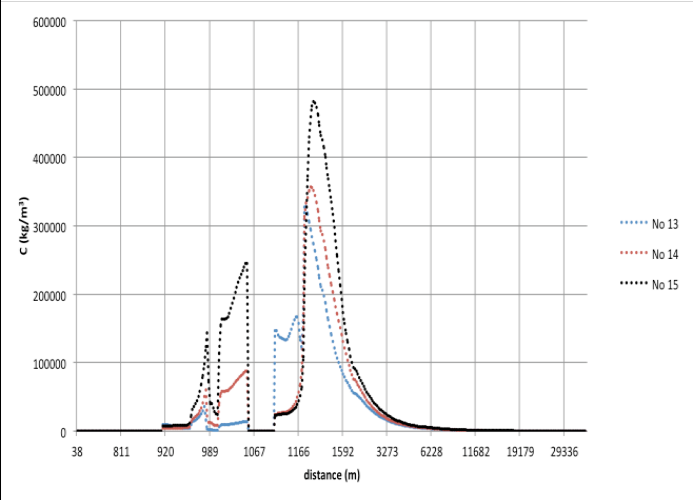
2^η Κατηγορία



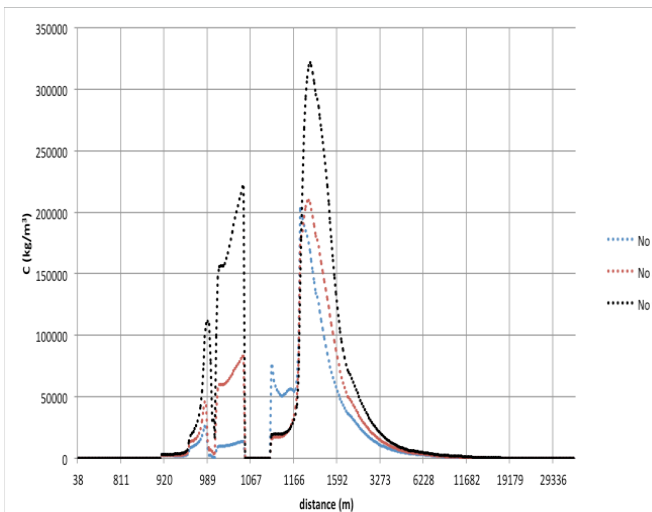
Διάγραμμα 4α: Κατανομή ρύπων από αργό πετρέλαιο ως προς το πεδίο ροής για τα σενάρια No 10, No 11, No 12.



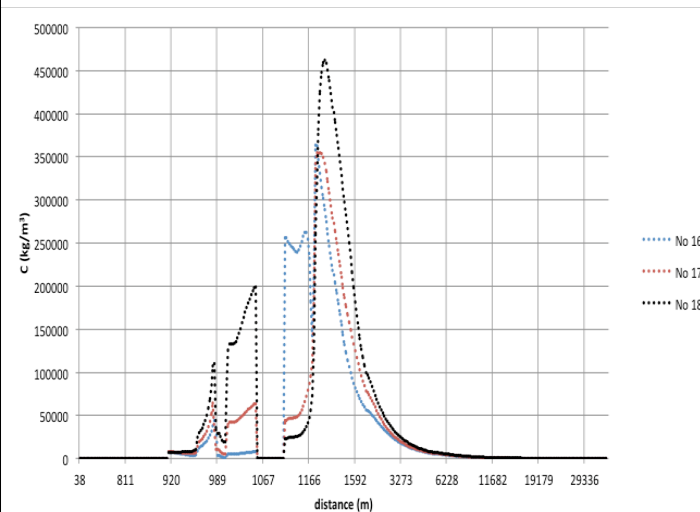
Διάγραμμα 3β: Κατανομή ρύπων από ντήζελ ως προς το πεδίο ροής για τα σενάρια No 4, No 5, No 6.



Διάγραμμα 4β: Κατανομή ρύπων από ντήζελ ως προς το πεδίο ροής για τα σενάρια No 13, No 14, No 15.

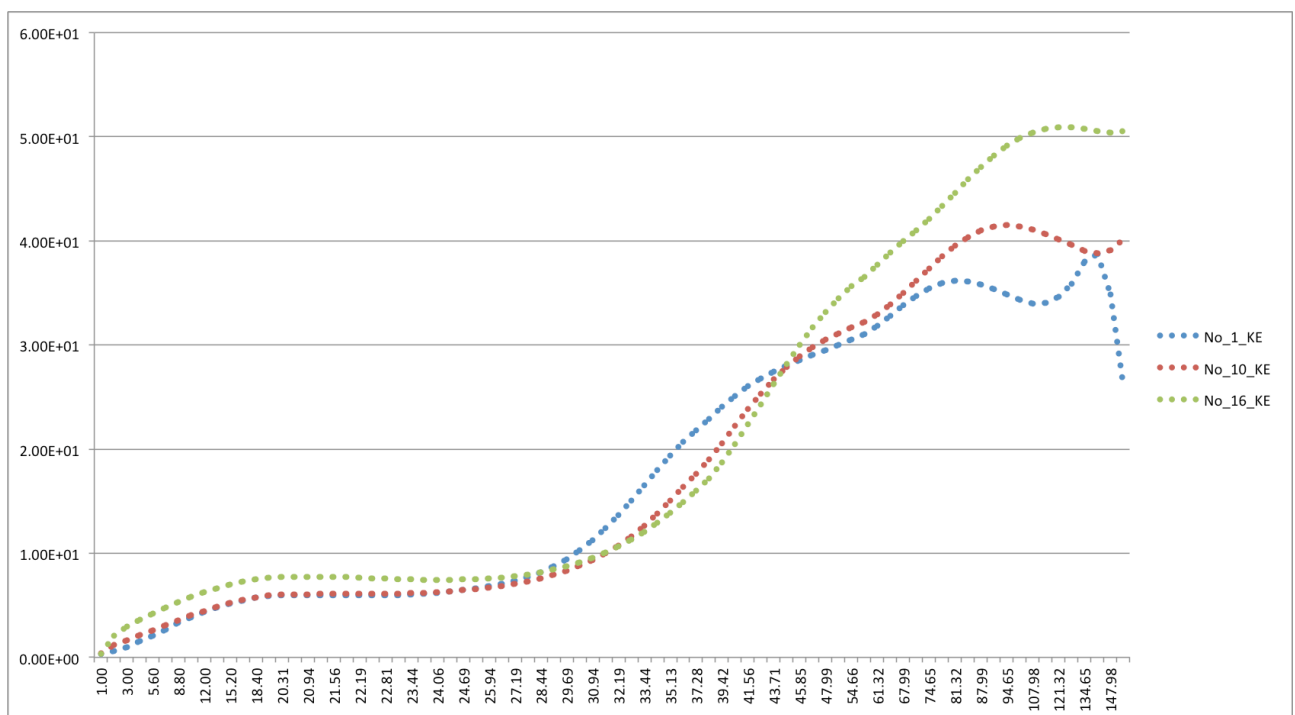


Διάγραμμα 3γ: Κατανομή ρύπων από βενζίνη ως προς το πεδίο ροής για τα σενάρια No 7, No 8, No 9.



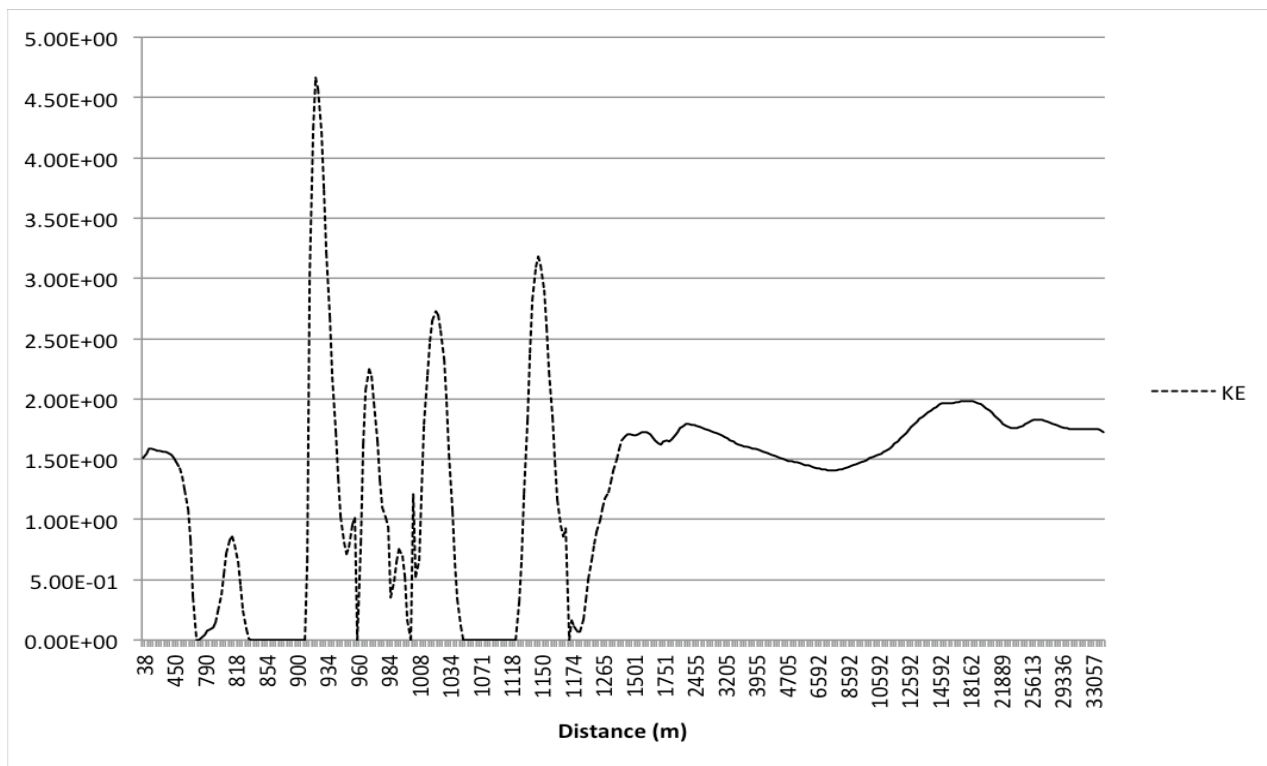
Διάγραμμα 4γ: Κατανομή ρύπων από βενζίνη ως προς πεδίο ροής για τα σενάρια No 16, No 17, No 18.

Στα διαγράμματα από 3γ έως 4γ παρατηρείται πως η συγκέντρωση στην ενδιάμεση περιοχή (buffer zone) παρουσιάζει μεγάλη αύξηση για τα σενάρια που αντιστοιχούν σε ταχύτητες ανέμου 8m/s. Στην συγκεκριμένη περιοχή δημιουργούνται έντονες ανακυκλοφορίες όπως αναφέρθηκε παραπάνω ενώ στο σενάριο 3γ, ο παράγοντας που αλλάζει αφορά τον τύπο καυσίμου που σε αυτήν την περίπτωση αφορά την βενζίνη που όπως φαίνεται και στον Πίνακα 19 εκλύει το μεγαλύτερο ποσό ενέργειας (1.3 MW/m^2). Το παραπάνω σε συνδυασμό με την χαμηλή ταχύτητα του ανέμου οδηγεί σε μεγαλύτερη ανάπτυξη της κινητικής ενέργειας της τύρβης καθ' ύψος με αποτέλεσμα την εντονότερη ανακυκλοφορία και μεγαλύτερη συγκέντρωση των ρύπων στο επίπεδο του εδάφους. Ενώ για τα σενάρια 4α έως 4γ, η παράμετρος που οδηγεί στο παραπάνω φαινόμενο είναι η διάμετρος τις δεξαμενής που επηρεάζει την συνολική εκπομπή θερμότητας. Το παραπάνω γίνεται εμφανές και από το Διάγραμμα 5 και την κατανομή της τύρβης μέχρι το ύψος των 150 μέτρων για την απόσταση ίση με 1127 m για τα σενάρια No 1, No 10 και No 16 που αποτελούν αντιπροσωπευτικά παραδείγματα.

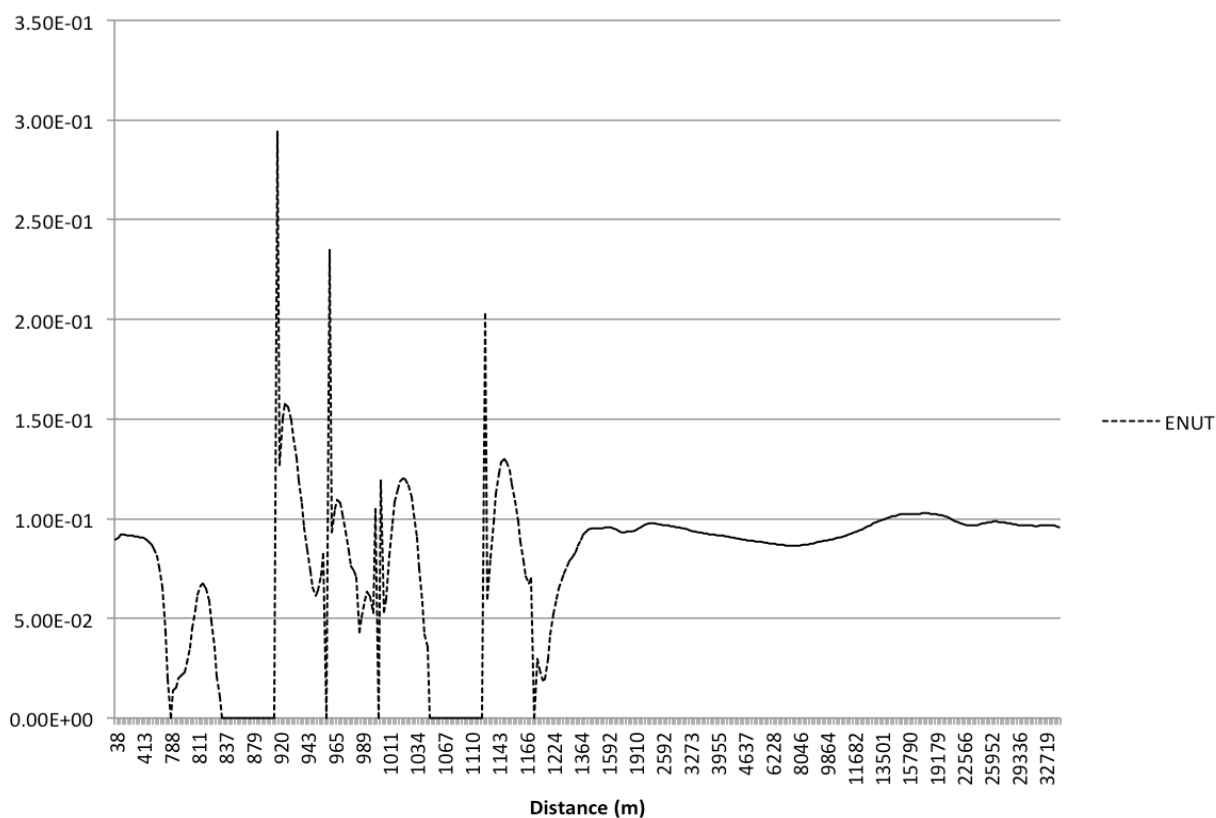


Διάγραμμα 5: Κατανομή της κινητικής ενέργειας τύρβης (ΚΕ) καθ' ύψος στην απόσταση 1127 m.

Επίσης, από την σύγκριση των τιμών για την κατανομή α) της κινητικής ενέργειας και β) κινηματικού ιξώδους της τύρβης κατά μήκος του πεδίου ροής στο επίπεδο του εδάφους δείχνει το πόσο σημαντικό είναι το φαινόμενο της τύρβης για την διασπορά των ρύπων. Όπως φαίνεται και στα Διαγράμματα 6 και 7 οι κατανομές των παραπάνω παρουσιάζουν έντονες αυξομειώσεις για τις περιοχές: πριν και μετά από κάθε δεξαμενή και τα τοιχεία ασφαλείας που την περικλείουν αλλά και στην περιοχή μεταξύ των δύο δεξαμενών.



Διάγραμμα 6: Κατανομή της κινητικής ενέργειας τύρβης (ΚΕ) στο επίπεδο του εδάφους.



Διάγραμμα 7: Κατανομή του κινηματικού ιξώδους (ENUT) στο επίπεδο εδάφους.

Οι μέγιστες συγκεντρώσεις των ρύπων στο επίπεδο του εδάφους για κάθε σενάριο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 20. Οι παραπάνω κατανομές και συγκεντρώσεις κάθε ρύπου για κάθε σενάριο παρατίθεται αναλυτικότερα στο Παράρτημα ΙΙ.

Πίνακας 20: Μέγιστες συγκεντρώσεις ρύπων κατά μήκος του πεδίου ροής.

Σενάριο	Μέγιστη συγκέντρωση Smoke (mg/ m ³)	Απόσταση (m)	Μέγιστη συγκέντρωση CO (mg/ m ³)	Απόσταση (m)	Μέγιστη συγκέντρωση SO ₂ (mg/ m ³)	Απόσταση (m)	Μέγιστη συγκέντρωση PAHs (mg/ m ³)	Απόσταση (m)
No 1	21.15	1207	15.73	1207	7	1207	0.0702	1207
No 2	31.94	1224	23.78	1224	10.56	1224	0.1056	1224
No 3	49.37	1232	36.75	1232	16.36	1232	0.1633	1232
No 4	2.99	1182	17.67	1182	7.85	1182	0.078	1182
No 5	3.8	1224	21.6	1224	10.016	1224	0.10016	1224
No 6	5.96	1232	34.85	1232	15.67	1232	0.1567	1232
No 7	4.16	1215	8.31	1182	4.15	1182	0.243	1182
No 8	6.3	1224	12.56	1215	6.28	1215	0.367	1215
No 9	9.74	1232	19.42	1218	9.71	1218	0.568	1218
No 10	50	1174	37.22	1191	16.53	1191	0.1654	1191
No 11	49.74	1215	37.02	1215	16.45	1215	0.1645	1215
No 12	67.73	1232	50.39	1232	22.4	1224	0.224	1224
No 13	5.68	1182	11.74	1182	8.89	1182	0.351	1182
No 14	6.17	1207	12.74	1207	9.15	1207	0.352	1207
No 15	8.32	1224	17.19	1224	11.31	1224	0.365	1224
No 16	9.86	1174	13	1174	9.84	1174	0.575	1174
No 17	9.61	1182	12.67	1182	9.27	1182	0.561	1182
No 18	12.53	1224	16.51	1224	12.42	1224	0.7263	1224

7.4 Προσδιορισμός ζωνών κινδύνου

Η θέσπιση ζωνών ασφαλείας τόσο για τις επίγειες δυνάμεις που θα κληθούν να αντιμετωπίσουν το BAME όσο και για τους κατοίκους του περιβάλλοντα χώρου ακολουθεί την μεθοδολογία των Argyropoulos et. al., (2008b). Στην συγκεκριμένη μεθοδολογία γίνεται η σύγκριση των συγκεντρώσεων στο επίπεδο του εδάφους και εν συνεχεία συγκρίνονται με τα όρια ασφαλείας (Immediately Dangerous to Life or Health, IDLH) που έχουν θεσπιστεί από το National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με την NIOSH η ερμηνεία του ορίου ασφαλείας IDLH είναι η έκθεση σε αέριο ρύπο ο οποίος είναι το πιθανότερο να προκαλέσει θάνατο, άμεσες ή έμμεσες μόνιμες δυσμενείς επιπτώσεις ή καθιστούν αδύνατη την διαφυγή από ένα τέτοιο περιβάλλον.

Επιπλέον γίνεται παράθεση δύο επιπλέον ορίων όπως του χρονικά σταθμισμένη έκθεση (Time-Weighted Average, TWA) και η ανώτατη τιμή βραχυχρόνιας έκθεσης (Short –Term Exposure Limits, STEL). Πιο συγκεκριμένα, η τιμή TWA αναφέρεται στην μέγιστη συγκέντρωση ρύπου διάρκεια 8 ωρών για συνεχόμενες 5 ημέρες, ενώ η τιμή STEL για έκθεση στον ρύπο για

χρονικό διάστημα περίπου 15 λεπτών. Η σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο τιμών έγκειται στο γεγονός πως στην χρονικά σταθμισμένη (TWA) δεν είναι πιθανή η εμφάνιση δυσμενών επιπτώσεων στην περίπτωση που γίνεται επαναλαμβανόμενη έκθεση, ενώ στην περίπτωση της STEL, για την αποφυγή δυσμενών επιπτώσεων δεν πρέπει να γίνεται έκθεση στον ρύπο περισσότερες από τέσσερις φορές την ίδια ημέρα. Όπως γίνεται κατανοητό τα τελευταία όρια ασφαλείας που αναφέρθηκαν παραπάνω (TWA και STEL), αφορούν κυρίως τις μονάδες αντιμετώπισης του ατυχήματος καθώς η αντιμετώπιση πυρκαγιών σε δεξαμενές είναι ένα βιομηχανικό ατύχημα που μπορεί να διαρκέσει αρκετές ημέρες. Αυτό συμβαίνει λόγω της έντασης της πυρκαγιάς, με αποτέλεσμα η δεξαμενή αφήνεται να καεί και ταυτόχρονα να γίνονται προσπάθειες περιορισμού πιθανής εξάπλωσής της αλλά και ψύξης της για την αποφυγή του φαινομένου boil-over.

Αναφορικά με το ζώνες ασφαλείας, αυτές καθορίζονται με βάση το πεδίο ροής της αριθμητικής προσομοίωσης σε δύο ζώνες, όπου η πρώτη ζώνη ορίζεται σε απόσταση έως 1000 m από το τέλος της δεύτερης δεξαμενής. Ως δεύτερη ζώνη ορίζεται η απόσταση από το τέλος της πρώτης ζώνης έως το τέλος του πεδίου ροής.

Πίνακας 21: Συγκεντρώσεις ρύπων στο επίπεδο του εδάφους.

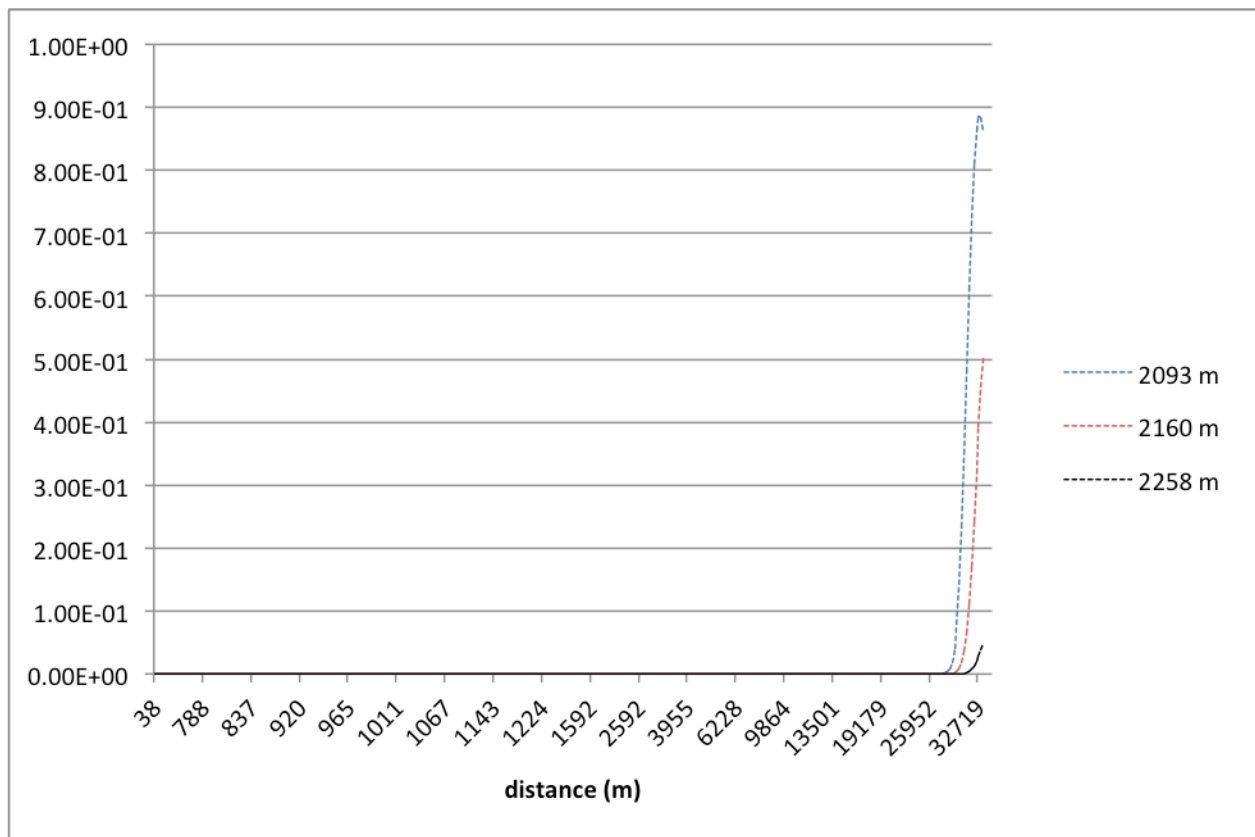
Ρύπος	IDLH (mg/m ³)	LC (mg/m ³)	STEL (mg/m ³)	TWA (mg/m ³)
SO ₂	262	2525.97	13	5
CO	1374.23	9190.18	220	55
Smoke	2500	25000	3.5	3.5
PAHs	80	3840	16	3.2

Συγκρίνοντας τους Πίνακες 20 και 21 φαίνεται πως πουθενά στο πεδίο δεν παρουσιάζονται συγκεντρώσεις αρκετά υψηλές ώστε να συνιστούν άμεσες ή θανατηφόρες συγκεντρώσεις όπως φαίνεται και από τις τιμές των IDLH και LC. Στην περίπτωση όμως των STEL και TWA παρατηρείται ότι υπάρχουν τιμές για τις οποίες η παρατεταμένη παραμονή δύναται να δημιουργήσει κινδύνους για στην ανθρώπινη υγεία και για το λόγο αυτό γίνεται προφανές, από τις παραπάνω τιμές, ότι μόνο κατάλληλα εξοπλισμένες μονάδες μπορούν να προσεγγίσουν. Από τις τιμές των STEL και TWA παρατηρείται ότι πρόκειται για ιδιαίτερα χαμηλές τιμές σε σχέση με τις τιμές που υπάρχουν για τις IDLH και τις LC. Αυτό οφείλεται στο ότι ο ορισμός για την IDLH βασίζεται σε μία γενικότερη αντίληψη σχετικά με την συγκέντρωση χωρίς να λαμβάνει υπόψη την έλλειψη οξυγόνου, σε αντίθεση με τις STEL και TWA.

7.5 Μέγιστα ύψη ανύψωσης πλουμίου

Η εύρεση του μέγιστου σημείου ανύψωσης του καπνού-πλουμίου γίνεται με την μελέτη της συγκέντρωσης σε διαφορετικά επίπεδα καθ' ύψος. Αναλυτικότερα, ως μέγιστο ύψος ανύψωσης του καπνού-πλουμίου επιλέγεται το επίπεδο σε ύψος όπου η συγκέντρωση παρουσιάζεται πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με επίπεδο που βρίσκεται υψηλότερα. Ο παραπάνω τρόπος μπορεί να απεικονιστεί στο Διάγραμμα 8 που αφορά την περίπτωση το σενάριο Νο 12. Αυτό γίνεται γιατί η διασπορά των ρύπων σε μικρό ή ελάχιστο βαθμό μπορεί να διαχυθεί και σε υψηλότερα σημεία αλλά ο «κυρίως κορμός» του καπνού να βρίσκεται χαμηλότερα. Αξίζει εδώ να σημειωθεί πως η πορεία του πλουμίου ακολουθεί λογαριθμική και το μέγιστο ύψος παρατηρείται όπως φαίνεται και από το παρακάτω διάγραμμα το μέγιστο ύψος εμφανίζεται σε αποστάσεις κοντά στο τέλος του πεδίου.

Το μέγιστο ύψος ανύψωσης για όλα τα σενάρια που εξετάστηκαν συνοψίζονται στον Πίνακα 22.



Διάγραμμα 8: Μέγιστο ύψος ανύψωσης καπνού-πλουμίου για το σενάριο Νο 12.

Πίνακας 22: Μέγιστο ύψος ανύψωσης καπνού-πλούμιου για κάθε σενάριο.

Σενάριο	Συνολική έκλυση θερμότητα (MW/m ²)	Τύπος καυσίμου	Μέγιστο ύψος (m)
No 1	2	Crude Oil	2324
No 2	2	Crude Oil	2158
No 3	2	Crude Oil	1992
No 4	2.6	Diesel Oil	2420
No 5	2.6	Diesel Oil	2307
No 6	2.6	Diesel Oil	2141
No 7	3	Gasoline	2573
No 8	3	Gasoline	2250
No 9	3	Gasoline	2100
No 10	2	Crude Oil	2301
No 11	2	Crude Oil	2093
No 12	2	Crude Oil	2093
No 13	2.6	Diesel Oil	2373
No 14	2.6	Diesel Oil	2265
No 15	2.6	Diesel Oil	2095
No 16	3	Gasoline	2620
No 17	3	Gasoline	2540
No 18	3	Gasoline	2480

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα το πλούμιο φθάνει στο μεγαλύτερο ύψος για το σενάριο No 16 ενώ η χαμηλότερη ανύψωση παρουσιάζεται για το σενάριο No 3.

Στην περίπτωση του σεναρίου No 16, το μεγάλο υψόμετρο που φθάνει το πλούμιο οφείλεται στην μεγάλη έκλυση θερμότητας (3 MW/m²) το οποίο είναι αποτέλεσμα του τύπου του καυσίμου καθώς και της μεγάλης επιφάνεια της δεξαμενής, και στην χαμηλή ταχύτητα του ανέμου. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι να κυριαρχούν οι ανωστικές δυνάμεις για μεγαλύτερο χρόνο και κατά συνέπεια το πλούμιο να οδηγείται σε μεγαλύτερο ύψος μέχρι ότου εξασθενήσουν οι αδρανειακές δυνάμεις.

Στην περίπτωση του σεναρίου No 3, το πλούμιο ανυψώνεται στο χαμηλότερο ύψος σε σύγκριση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις λόγω της υψηλής έντασης του ανέμου που δεν επιτρέπουν την ανάπτυξη των ανωστικών δυνάμεων για μεγάλη διάρκεια. Επιπλέον η διάμετρος και κατ' επέκταση η επιφάνεια της δεξαμενής στο συγκεκριμένο σενάριο είναι μικρότερη, το οποίο σε συνδυασμό με τον τύπο καυσίμου (Crude Oil), οδηγεί σε μικρότερης έντασης ανωστικές δυνάμεις σε σύγκριση πάντα με τα υπόλοιπα σενάρια.

7.6 Τελικά συμπεράσματα

Η διασπορά τοξικών ρύπων από πυρκαγιές σε πάνω από μία δεξαμενές είναι ένα αρκετά πολύπλοκο φαινόμενο, το οποίο με χρήση μεθόδων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής μπορεί να περιγραφεί και προσομοιωθεί σε εύλογο βαθμό με τις κατάλληλες παραδοχές. Στην συγκεκριμένη αριθμητική προσομοίωση η θερμική ακτινοβολία, η οποία αντιπροσωπεύει περίπου το 30 % της συνολικής εκλυόμενης θερμότητας και θα αποτελεί μία σημαντική παραμέτρο για την ασφάλεια του προσωπικού, δεν λαμβάνεται υπόψη λόγω του ότι εστιάζομαστε στην επικινδυνότητα των ρύπων. Η ευστάθεια της ατμόσφαιρας λαμβάνεται ουδέτερη, καθώς σύμφωνα με τις κλάσεις ευστάθειας Pasquil συναρτήση των ταχυτήτων ανέμου που εξετάζονται η στρωματοποίηση της ατμόσφαιρας θεωρείται ουδέτερη. Επιπλέον, ως προς την ταχύτητα του ανέμου, θεωρείται πως κατά την διάρκεια της προσομοίωσης δεν υπάρχει μεταβολή της φοράς του ανέμου που θα είχε ως αποτέλεσμα διαφορετικές μέγιστες συγκέντρωσεις και στους υπόλοιπους άξονες (x, y, z).

Σημαντική επίπτωση στην διασπορά διαδραματίζουν και οι έντονες ανακυκλοφορίες που παρατηρούνται στην ενδιάμεση απόσταση (buffer zone) αλλά και μεταξύ των δεξαμενών και των τοιχίων ασφαλείας κάθε δεξαμενής. Το παραπάνω γίνεται εμφανές πρωτίστως από μια γενικότερη απεικόνιση της κινητικής ενέργειας τύρβης όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 7 αλλά και πιο συγκεκριμένα από την κατανομή των ταχυτήτων V1 και W 1 στην ενδιάμεση περιοχή. Στην παραπάνω αύξηση της κινητικής ενέργειας τύρβης (KE), συντελεί η μεγάλη έκλυση θερμότητας που εξαρτάται άμεσα το μέγεθος της επιφάνειας της δεξαμενής και του καυσίμου που καίγεται. Σε ορισμένα σενάρια, ο συνδυασμός των παραπάνω με την χαμηλή ταχύτητα ανέμου οδηγεί σε υψηλές συγκεντρώσεις στην ενδιάμεση περιοχή.

Τέλος σημειώνεται πως το τελικό πλούμιο που προκύπτει από την συνένωση των δύο ξεχωριστών πλουμίων τα οποία στην συνέχεια συμπεριφέρονται ως εννιαίο, οδηγεί στην ανύψωσή του σε μεγάλο υψόμετρο (μέγιστο ύψος 2620 m) γεγονός που οφείλεται στην συνολική μεγάλη έκλυση θερμότητας που εμφανίζεται για το συγκεκριμένο σενάριο σε συνδυασμό με την χαμηλή ταχύτητα ανέμου (8 m/s).

Παράρτημα Ι

1. Άμεσες αιτίες ατυχημάτων

1.1 Λειτουργικά σφάλματα

- Υπερχείλιση δεξαμενής.
- Διαρροή αργού πετρελαίου από ανοιχτές βάνες αποστράγγισης.
- Απόφραξη καναλιού απορροής προς την κοινή λεκάνη ασφαλείας.
- Φράξη καναλιού απορροής προς την κοινή λεκάνη ασφαλείας.

1.2 Αστοχία εξοπλισμού ή οργάνων

- Βύθιση πλωτής οροφής.
- Διαρροή λόγω ρήξη βάνας.
- Λανθασμένη ένδειξη δείκτη βάνας.

1.3 Πτώση κεραυνού

- Ανεπαρκής γείωση
- Διαρροή καυσίμου από τη στεφάνη σφραγίσματος της οροφής
- Άμεσο κτύπημα δεξαμενής

1.4 Στατικός ηλεκτρισμός

- Κοπή της ελαστικής στεφάνης σφραγίσματος πλωτής οροφής
- Ροή αργού κατά την πλήρωση της δεξαμενής
- Ανεπαρκής γείωση
- Κακοί χειρισμοί κατά τη δειγματοληψία ή τη μέτρηση στάθμης

1.5 Σφάλματα συντήρησης

- Σπινθήρες (γενικά)
- Σπινθήρες από εργασίες συγκόλλησης
- Χρήση ακατάλληλων εργαλείων σε εκρηκτικό περιβάλλον
- Υπερφόρτωση ηλεκτρικής εγκατάστασης (βραχυκύκλωμα)

- Σπινθήρας από μετασχηματιστές
- Ανεπαρκής γείωση μηχανημάτων συντήρησης

1.6 Ρηγμάτωση ή ρήξη δεξαμενών

- Αστοχία συγκόλλησης
- Αστοχία κατασκευής δεξαμενής (π.χ. στρέβλωση κελύφους)
- Διάβρωση κελύφους ή οροφής
- Καθίζηση εδάφους

1.7 Ρήξη ή θραύση σωληνώσεων

- Διαρροή από φλάντζα
- Διαρροή αντλιών
- Κακοτεχνία από εξωτερικό εργολάβο

1.8 Διάφορες αιτίες

- Σεισμική δόνηση
- Ακραία καιρικά φαινόμενα (π.χ. πλημμύρες, παγετός)
- Πυρκαγιές (φωτιές στον περιβάλλοντα χώρο)
- Ατύχημα σε γειτονική μονάδα
- Κακόβουλη ενέργεια (π.χ. δολιοφθορά)

2. Προστατευτικά μέτρα

2.1 Γενικά μέτρα

- Ασφαλής περίφραξη: Περιμετρική περίφραξη της μονάδας ενώ στην περιοχή των δεξαμενών τσιμεντένιο τοιχίο με αγκαθωτό ή λεπιδοφόρο συρματοπλέγμα (barbed wire)
- Φύλαξη εγκατάστασης: Εφαρμόζεται σύστημα συνεχούς φύλαξης με ηλεκτρονικά μέσα αλλά με κατάλληλα εκπαιδευμένο προσωπικό.

- Έλεγχος και συνοδεία επισκεπτών: Η είσοδος κάθε επισκέπτη καταχωρείται στο πρωτόκολλο και η πρόσβαση τους καθορίζεται με βάση κανόνες ασφαλείας της κάθε εγκαταστάσεις.
- Ηλεκτρική εγκατάσταση υψηλής ασφαλείας: Ο βαθμός ασφαλείας της ηλεκτρικής εγκατάστασης είναι καθορισμένος σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία. Επιπλέον ο ηλεκτρολογικός εξοπλισμός θα πρέπει να είναι αντιακρηκτικού τύπου για αποφυγή ανάφλεξης τυχόν διαρροής.
- Απαγόρευση καπνίσματος: Το κάπνισμα απαγορεύεται αυστηρά καθώς και η χρήση γυμνής φλόγας αλλά και πυροδοτικών συσκευών. Στο χώρο επίσης υπάρχουν ενημερωτικές πινακίδες.
- Αποψίλωση περιβάλλοντος χώρου: Η συνεχής και συστηματική αποψίλωση του περιβάλλοντος χώρου και έκτακτη εάν αυτό απαιτείται. Επίσης πρέπει εάν χρησιμοποιείται ζιζανιοκτόνο θα πρέπει να μην περιέχει χημικά (π.χ. χλωρικό νάτριο) που μπορεί να προκαλέσουν εστία έναυσης και κίνδυνο πυρκαγιάς.
- Σήμανση: Η σήμανση ασφαλείας των εγκαταστάσεων γίνεται σύμφωνα με το Π.Δ 105/95 (ΦΕΚ 67 Α'), όπου ορίζονται οι ελάχιστες προδιαγραφές για την σήμανση ασφαλείας ή/ και υγείας στην εργασία.
- Κυκλοφοριακή σήμανση και διαγραμμίσεις: Οι διαγραμμίσεις αλλά και σήμανση για τα οχήματα που κινούνται εντός των εγκαταστάσεων γίνεται σύμφωνα με τον Κώδικα Οδικής Κυκλοφορίας.
- Προστασία από κρούσεις οχημάτων: Όπου κριθεί απαραίτητο γίνεται τοποθέτηση ειδικών φραγμάτων για την προστασία εξοπλισμού. Η κίνηση των οχημάτων γίνεται σε προκαθορισμένες διαδρομές και τηρείται αυστηρά το όριο ταχύτητας.
- Αντισεισμική προστασία: Ο σχεδιασμός και κατασκευή των δεξαμενών γίνεται στον Ελλαδικό χώρο με βάση τον με βάση των Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό και τον Ευρωκώδικα 8 (EN 1998).
- Αντιπλημμυρική προστασία: Η φορά και η ένταση των ανέμων, οι πιθανές θύελλες και το ύψος της βροχής στην περιοχή είναι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη για τον ασφαλή σχεδιασμό της εγκατάστασης.

- Αντιμετώπιση διαρροών αργού πετρελαίου: Στην περίπτωση διαρροής αργού πετρελαίου, η συνήθης τακτική είναι η απομόνωση της περιοχής σε απόσταση ακτίνας 100 m τουλάχιστον, η παύση οποιαδήποτε εργασίας και η απομάκρυνση όλων των πιθανών πηγών ανάφλεξης.
- Διαχείριση πετρελαιοειδών αποβλήτων: Γίνεται πάντα σύμφωνα με την Κ.Υ.Α 12044/613/2007 (Φ.Ε.Κ.376/Β' / 19.3.2007).
- Διαχείριση τοξικών νερών πυρόσβεσης: Η συνήθης τακτική είναι η ελεγχόμενη διοχέτευση τους στο δίκτυο όμβριων ή στο υπόγειο αποχετευτικό σύστημα ελαιωδών προϊόντων όταν περιέχονται ελαιώδη.
- Διαχείριση όμβριων υδάτων: Στις περισσότερες περιπτώσεις υπάρχει ανεξάρτητο δίκτυο όμβριων υδάτων.
- Καθαριότητα – Ευταξία: Όλα τα μέρη της εγκατάστασης πρέπει να διατηρούνται καθαρά με τάξη και ελεύθερα από άχρηστα αντικείμενα.
- Ενημέρωση για το βαθμό πλήρωσης δεξαμενών: Προβλέπεται περιοδικός έλεγχος των σταθμών σταθμών, παρακολούθηση του δείκτη στάθμης στο Θάλαμο Ελέγχου και τοπικά.
- Μονάδα παροχής α' βοηθειών: Σε μεγάλες εγκαταστάσεις πρέπει να υπάρχει σταθμός α' βοηθειών στον οποίο και πρέπει να παρίσταται ιατρός επί 24ώρου βάσεως.

2.1. Σχεδιασμός δεξαμενών

- Συμμόρφωση με πρότυπα και κανονισμούς: Ο σχεδιασμός και η κατασκευή των δεξαμενών γίνεται βάση την ισχύουσα νομοθεσία Κ.Υ.Α 34458/ 1990 (Φ.Ε.Κ. Β' 846) και σε διεθνώς αποδεκτούς κώδικες των οποίων κυριότεροι είναι : Ευρωκώδικας 8 (EN 1998), API standards (American Petroleum Industry), ASME (American Society of Mechanical Engineering), κ.α. Επίσης κατά τον σχεδιασμό λαμβάνονται οι απαιτήσεις των αναλύσεων HAZOP (Hazard and Operability) και HAZAN (Hazard Analysis).

- Αποτύπωση τυπικών συνθηκών: Κατά το σχεδιασμό, λαμβάνονται υπόψη τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής.
- Τήρηση αποστάσεων ασφαλείας: Η χωροθέτηση των δεξαμενών καθώς και η τήρηση των αποστάσεων ασφαλείας μεταξύ των δεξαμενών πρέπει να υπερκαλύπτουν τις αποστάσεις που αυτές ορίζονται από την εκάστοτε νομοθεσία.
- Ασφαλής θεμελίωση: Για την ασφαλή θεμελίωση των δεξαμενών απαιτείται η διεξαγωγή εδαφολογικής μελέτης για την καταλληλότητα του χώρου και εξυγίανση του εδάφους εφόσον απαιτείται.
- Αναχώματα (bunds): Σύμφωνα με την ελληνική νομοθεσία αλλά και των διεθνών αποδεκτών κωδίκων απαιτείται η κατασκευή τσιμεντένιων προστατευτικών αναχωμάτων για την ανάσχεση τυχόν διαρροών.
- Προστασία από δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας/ καυσίμων: Γίνεται προσπάθεια τα καλώδια παροχής ηλεκτρικής ενέργειας να είναι υπόγεια. Ενώ όταν δεν είναι δυνατό να είναι υπόγεια, αποφεύγεται να περνάνε πάνω από δεξαμενές.

2.2. Συντήρηση

- Συντήρηση δεξαμενών: Οι δεξαμενές συντηρούνται σύμφωνα με τους διεθνείς κώδικες. Περιοδικά οι δεξαμενές αδειάζονται για (α) καθαρισμό και οπτικό έλεγχο των εσωτερικών τοιχωμάτων, οροφής και πυθμένα και (β) παχυμέτρηση των τοιχωμάτων και έλεγχο ραφών.
- Διαχείριση θερμών εργασιών: Συνήθως περιλαμβάνεται ειδική άδεια θερμής εργασίας που εκδίδεται από τις αρχές ασφαλείας της εγκατάστασης.
- Διαχείριση εξωτερικών εργολάβων: Στις περισσότερες περιπτώσεις ακολουθείται διαδικασία επιλογής εργολάβων, ενώ παράλληλα υπάρχει και γραπτή διαδικασία οδηγιών ασφαλείας για το προσωπικό των εργολάβων.
- Επιθεωρήσεις τακτικές: Προβλέπεται περιοδικός έλεγχος των δεξαμενών, βάσει των υφιστάμενων διεθνών πρακτικών επιθεωρήσεις εξοπλισμού (API 653).
- Επιθεωρήσεις σε σημεία υψηλού κινδύνου: Πέρα από τις τακτικές επιθεωρήσεις, προβλέπονται στα σημεία που χαρακτηρίζονται ως υψηλού κινδύνου

πραγματοποιούνται επιπλέον επιθεωρήσεις σύμφωνα με διαδικασίες που προβλέπονται στις υπάρχουσες εγκαταστάσεις.

- Χρήση εργαλείων αντιακρηκτικού τύπου: Η εργαλεία χειρός που χρησιμοποιούνται θα πρέπει να είναι αντιακρηκτικού τύπου, δηλαδή μπρούτζινα σφυριά, σφυρόκλειδα και αερόκλειδα ώστε να μην προκαλείται σπινθήρας.

2.3 Εξοπλισμός

- Συμμόρφωση με πρότυπα και κανονισμούς: Ο σχεδιασμός αλλά και η προμήθεια του εξοπλισμού πρέπει πάντα να πληρεί τα διεθνή πρότυπα και του διεθνείς κώδικες.
- Αντικεραυνική προστασία: Προβλέπεται η γείωση των δεξαμενών αλλά και περιοδικός έλεγχος της σύμφωνα με τους κώδικες της American Petroleum Institute (API).
- Προστασία από υπερχείλιση δεξαμενής: Η μέτρηση της στάθμης του καυσίμου εντός της δεξαμενής γίνεται με όργανο μέτρησης τύπου radar, συνδεδεμένο με τον Θάλαμο Ελέγχου. Σε περίπτωση υψηλής και πολύ υψηλής στάθμης γίνεται αυτόματη ενεργοποίηση των ηλεκτροκίνητων βανών ως μέτρο πρόληψης της υπερχείλισης.
- Προστασία από διαστολή ρευστού σε σωληνώσεις: Στις γραμμές μεταφοράς αργού που είναι μεγάλου μήκους (>30 m), πολλές φορές τοποθετούνται ασφαλιστικές βάνες για την προστασία από θερμική διαστολή του εγκλωβισμένου υγρού.
- Προστασία από διάβρωση: Τα μέτρα προστασίας από την διάβρωση αποτελούνται από: Εξωτερική βαφή σύμφωνα με διεθνείς κώδικες(GP, εσωτερική βαφή πυθμένα και μέρους του κελύφους με ειδική αποξειδική βαφή καθώς και έλεγχος παχυμετρήσεων. Επιπλέον ο πυθμένας της δεξαμενής είναι υπερυψωμένος κατά ~ 0.5 m, όπου τοποθετείται στρώμα ελαιωδούς άμμου και καθοδική προστασία.
- Έλεγχοι και μετρήσεις: Συνήθως αποτελούνται από γραπτές διαδικασίες όπου οι δεξαμενές ελέγχονται περιοδικά από έμπειρο προσωπικό του διωλιστηρίου,

σύμφωνα με τις υπάρχουσες διαδικασίες και το πρόγραμμα επιθεώρησης/ελέγχου (παχυμέτρηση τοιχωμάτων, έλεγχος οργάνων εξοπλισμού, οπτικός έλεγχος κ.α.)

- Εξοπλισμός αντιμετώπισης στατικού ηλεκτρισμού: Προβλέπεται η γείωση των δεξαμενών καθώς και η ηλεκτρική συνέχεια μεταξύ πλωτής οροφής- κελύφους κατόπιν μελέτης.
- Βαλβίδες απομόνωσης έκτακτης ανάγκης: Στα στόμια εισόδου και εξόδου των δεξαμενών είναι εγκατεστημένες τηλεχειριζόμενες βάνες. Ο χρόνος απόκρισης των ηλεκτροκίνητων τηλεχειριζόμενων βανών άμεσης απομόνωσης, είναι τέτοιος ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος υδραυλικού πλήγματος.
- Παρακολούθηση σημείων ενδεχόμενου αναβρασμού (boil-over). Γίνεται προσπάθεια αποστράγγισης του νερού που είναι συγκεντρωμένο στα κατώτερα τμήματα της δεξαμενής. Επίσης παρακολουθείται συνεχώς το κέλυφος της δεξαμενής για πιθανή αλλαγή του χρώματος λόγω της θερμοκρασίας καθώς και η φλόγα της πυρκαγιάς. Η διαύγαση της φλόγας είναι ένδειξη ενδεχόμενου αναβρασμού και εμφανίζεται μετά από κάποιες ώρες (8-36) ανάλογα 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 από ποσότητες νερού της τάξης των 1000 m^3 εκτινάσσεται και συμπαρασύρει καύσιμο και μεταλλικά εξαρτήματα σε μεγάλη απόσταση. Η ένταση του φαινομένου δεν μπορεί να προβλεφθεί ακριβώς, ιστορικά στοιχεία όμως από σχετικά ατυχήματα δείχνουν ότι μπορεί να επηρεάσει μια περιοχή ακτίνας αρκετών μέτρων δεκάδων μέτρων.
- Επικοινωνίες στη διάρκεια BAME: Σε όλες τις εγκαταστάσεις της συγκεκριμένης κατηγορίας υπάρχει ο κατάλληλος εξοπλισμός με τις απαραίτητες μελέτες, σχέδια, διαδικασίες καθώς και ο κατάλληλος οπτικοακουστικός εξοπλισμός επικοινωνίας για την αντιμετώπιση οποιουδήποτε BAME.

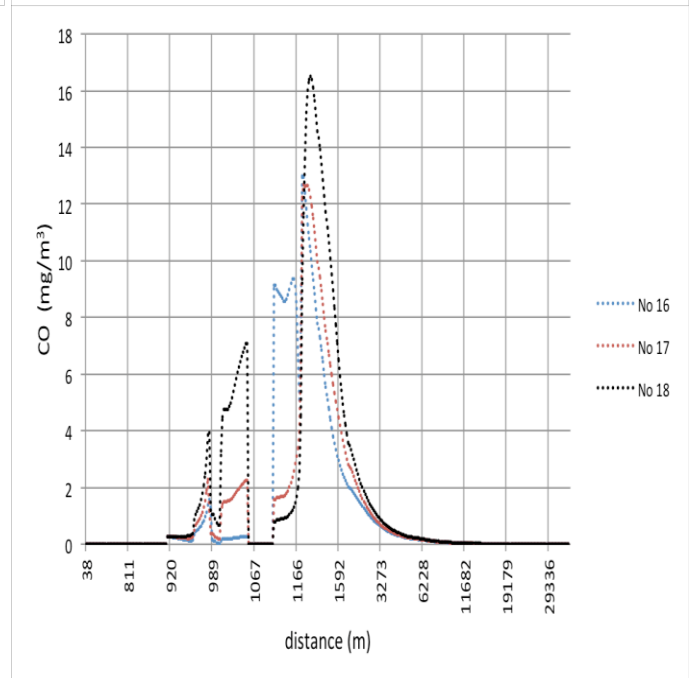
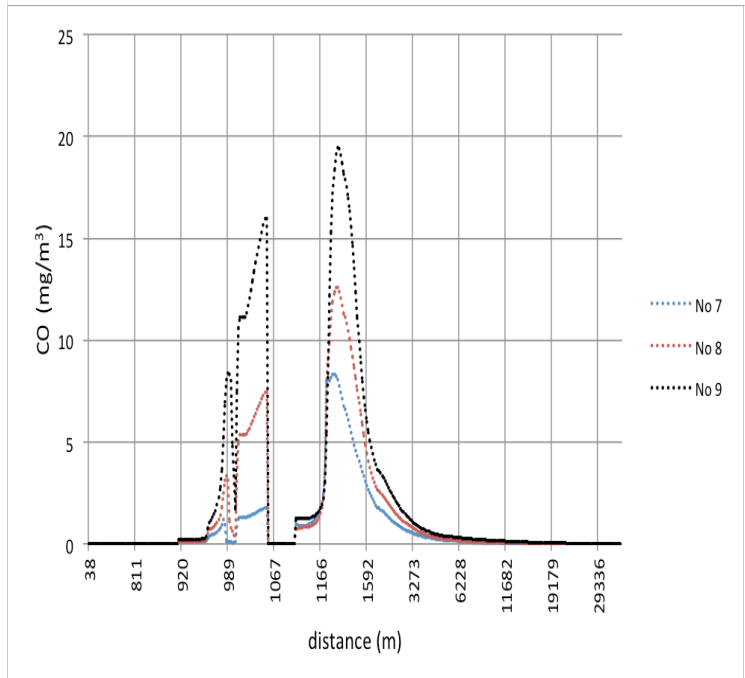
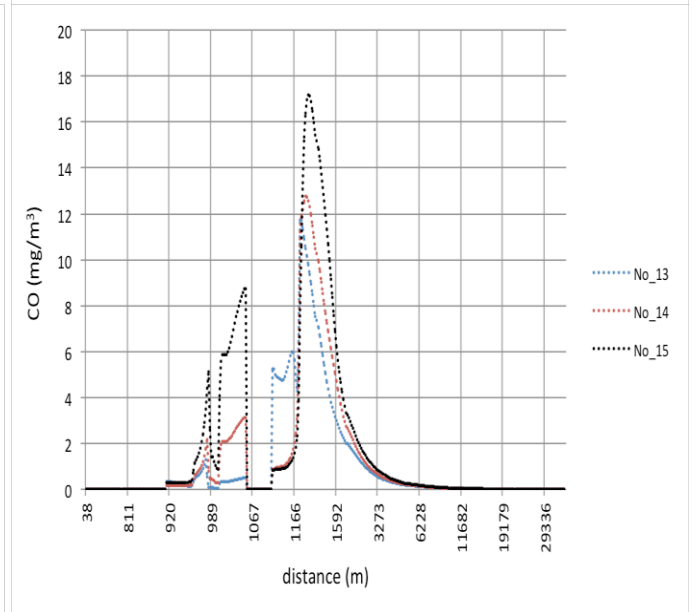
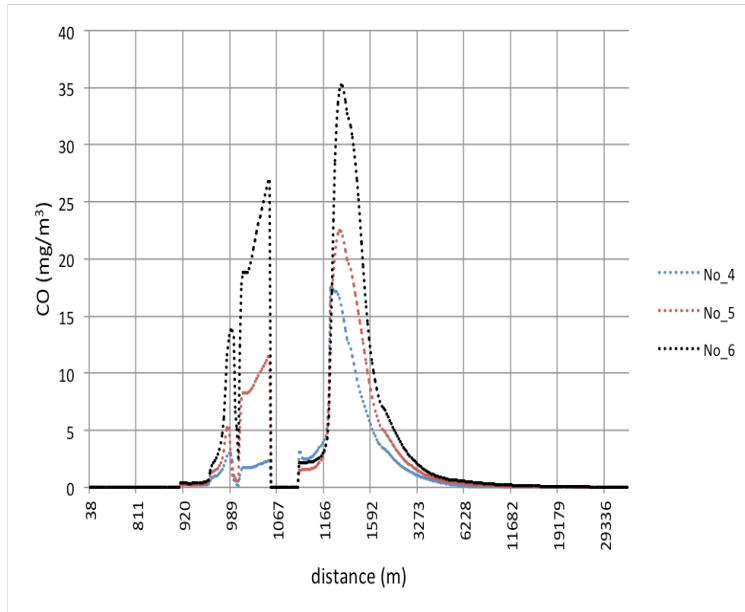
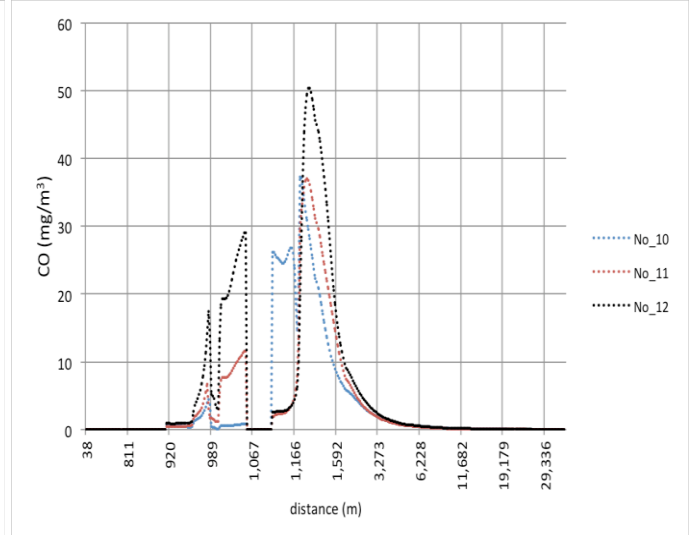
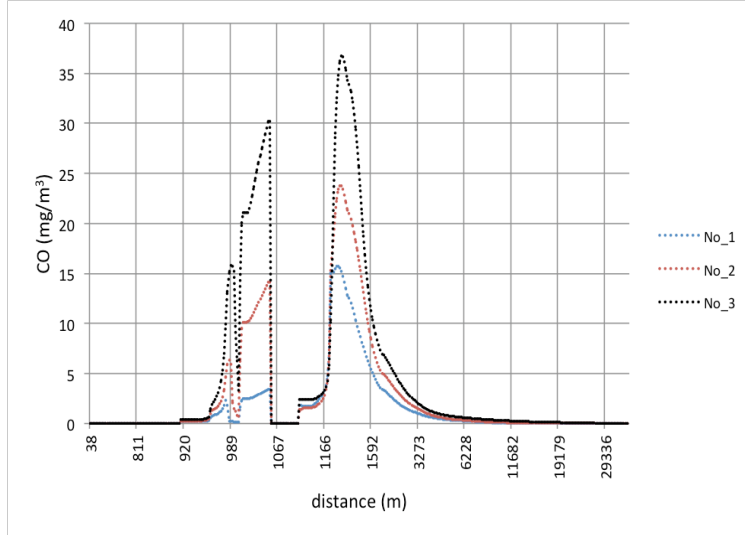
3. Υποστηρικτικά συστήματα ασφαλείας

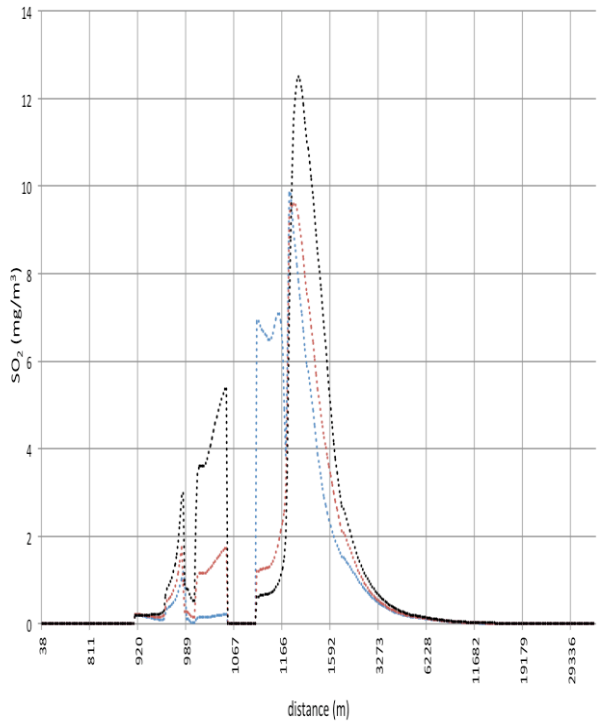
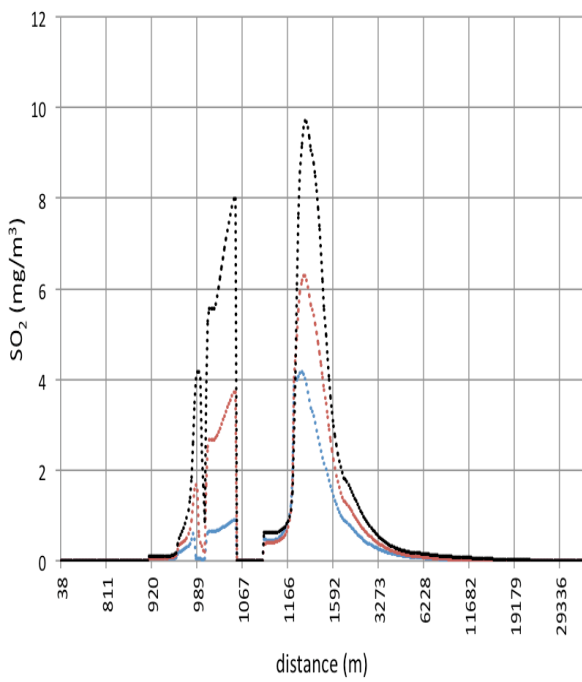
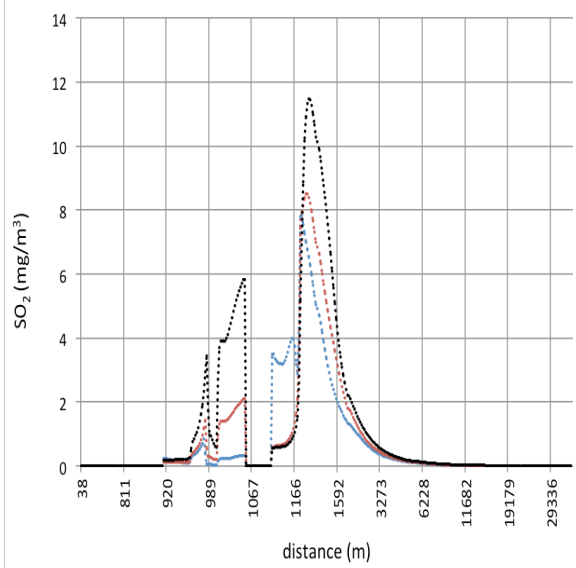
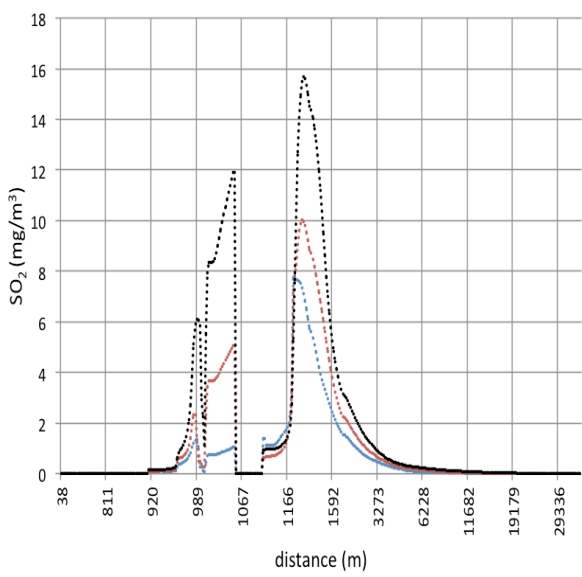
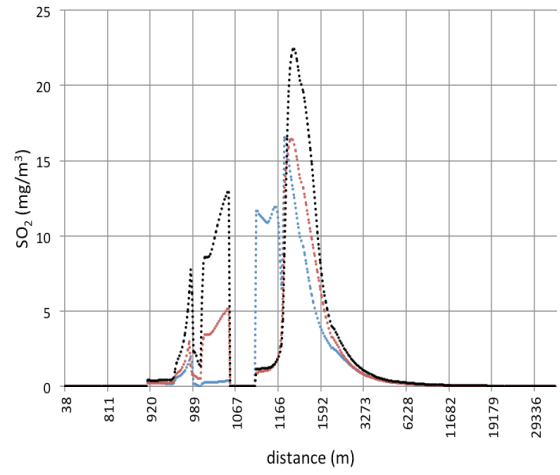
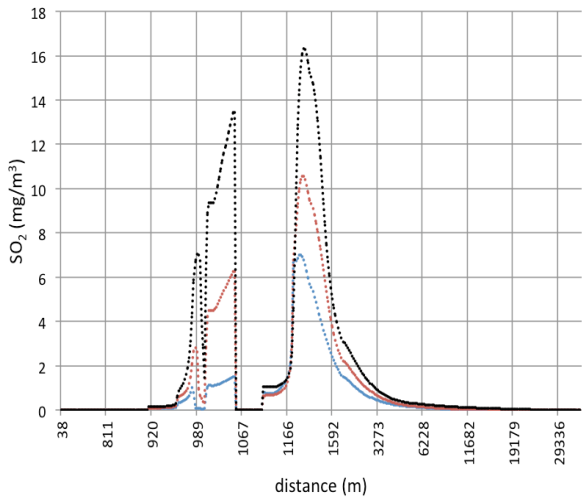
- Συστήματα πυρανίχνευσης και συναγερμού στις δεξαμενές: Προβλέπεται η εγκατάσταση συστήματα πυρανίχνευσης στην οροφή κάθε δεξαμενής. Σε

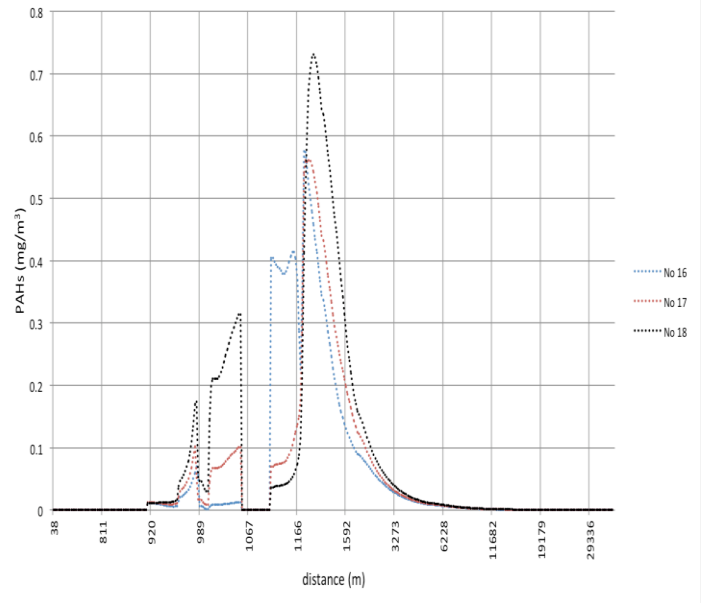
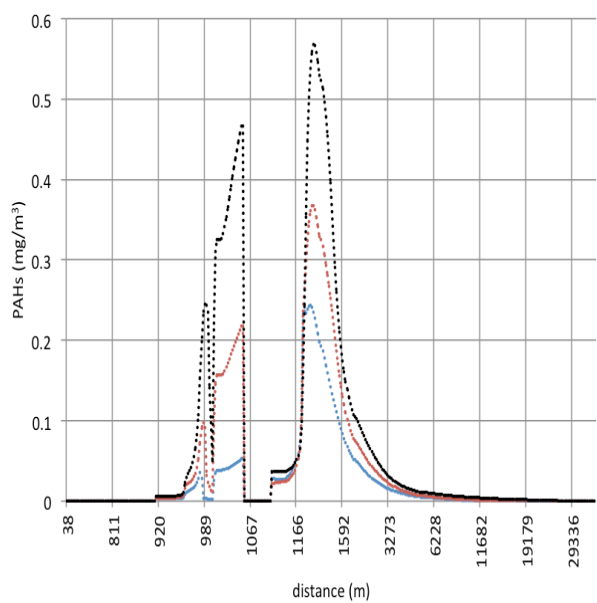
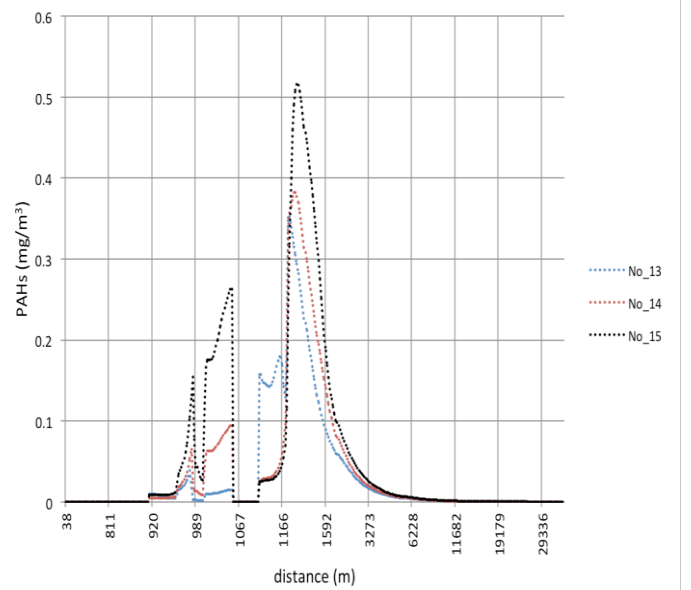
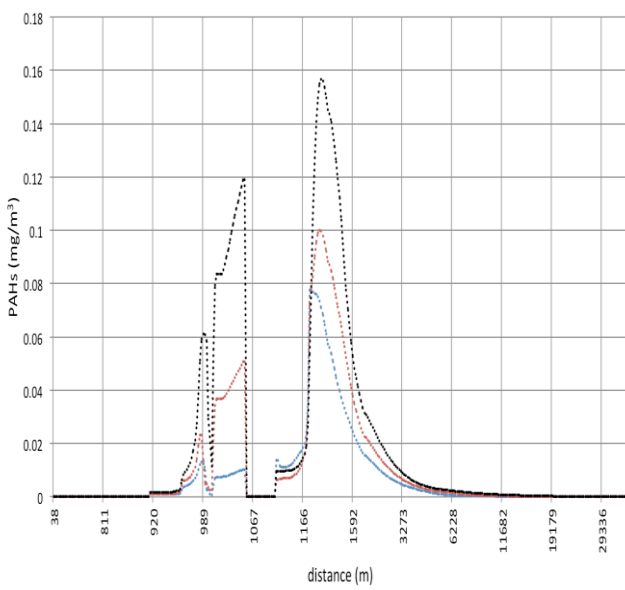
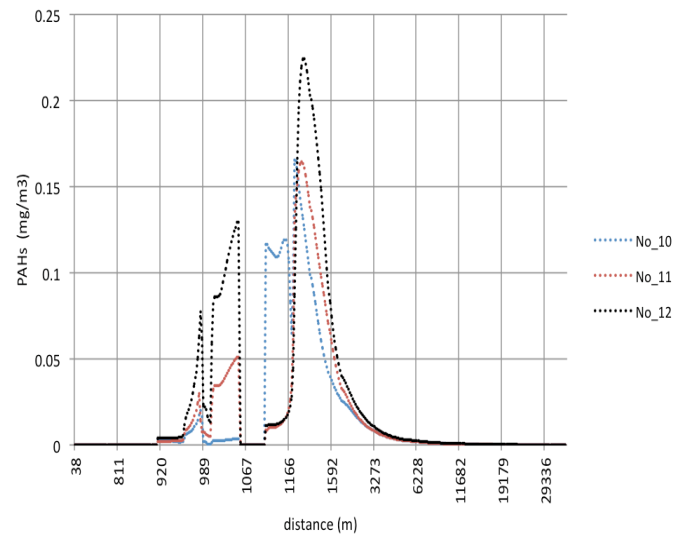
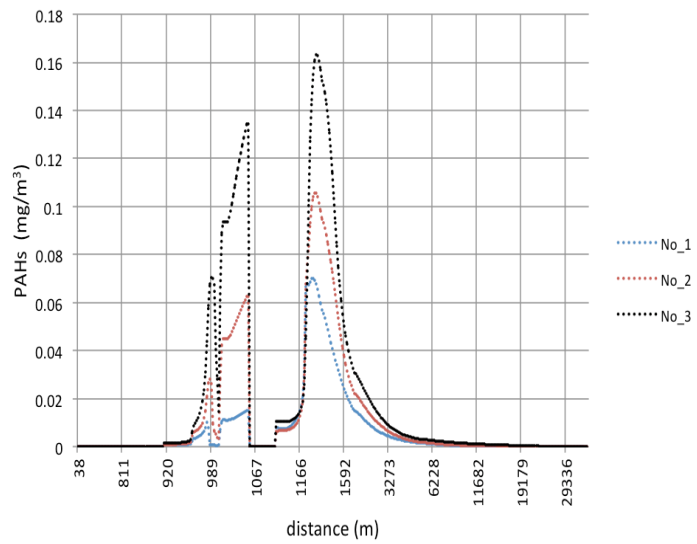
περίπτωση πυρκαγιάς, το σύστημα δίνει σήμα συναγερμού στο Θάλαμο Ελέγχου του Διυλιστηρίου.

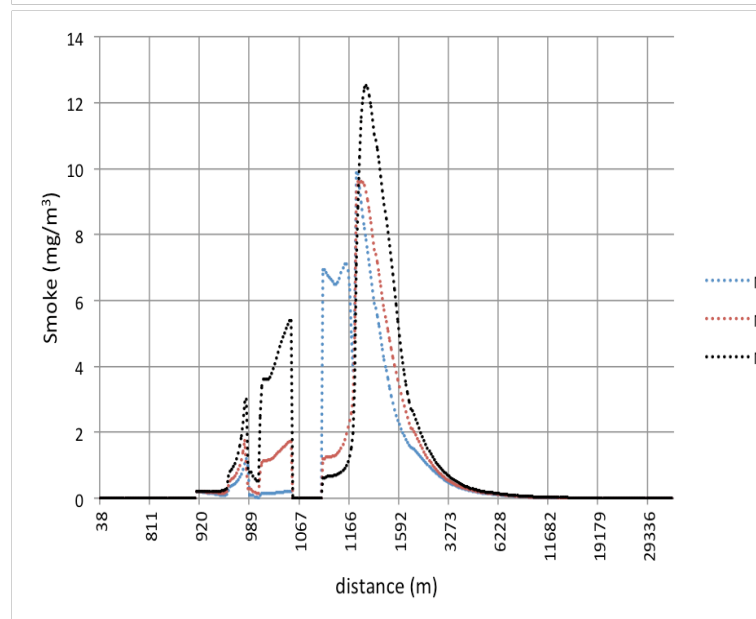
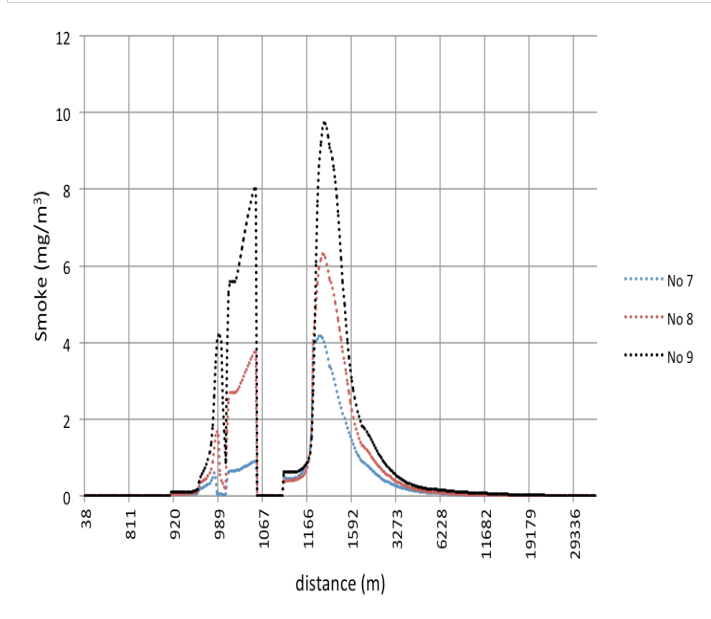
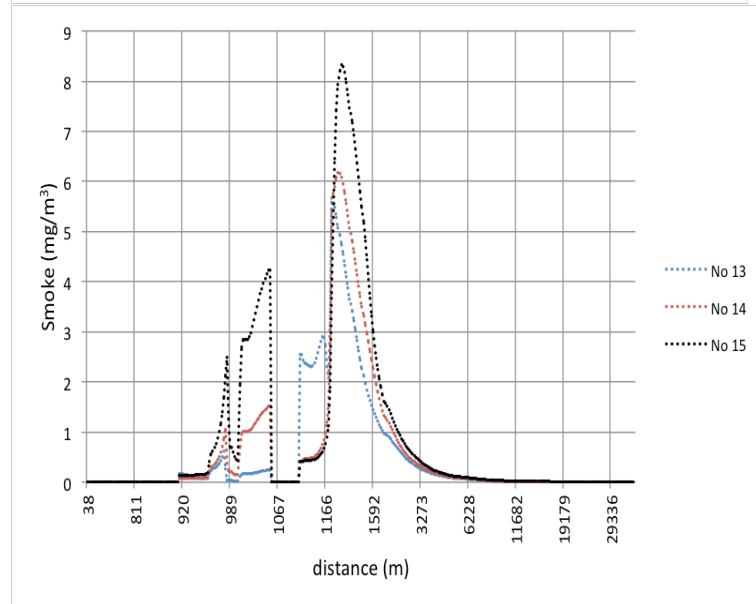
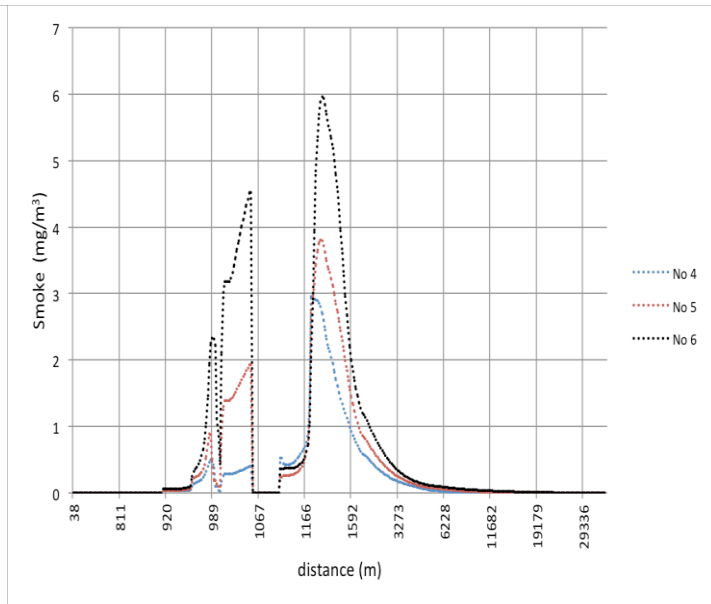
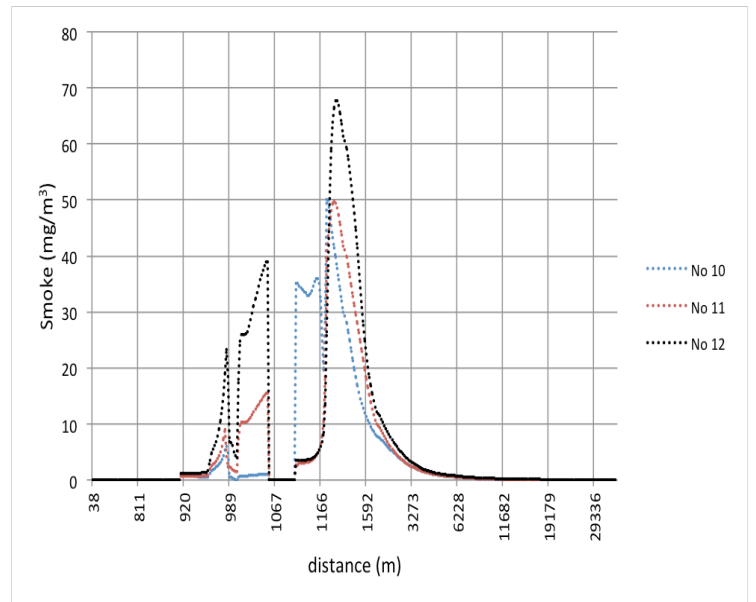
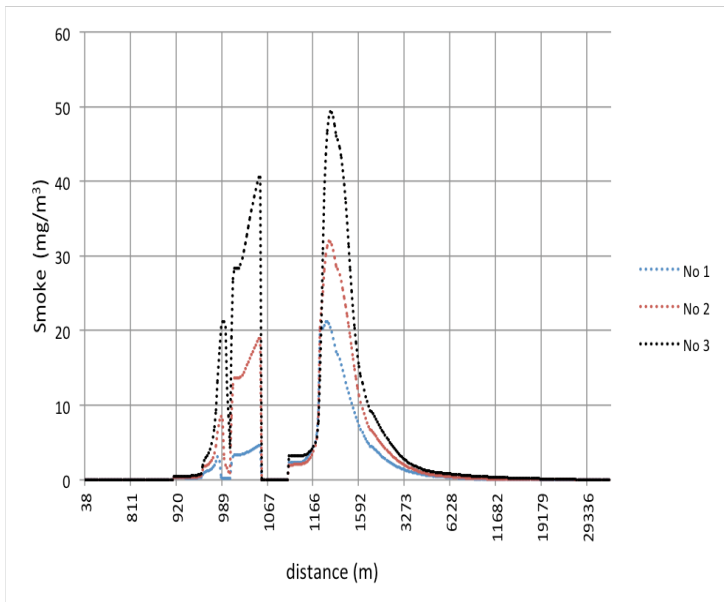
- Σύστημα πυρανίχνευσης και συναγερμού στην περίμετρο των δεξαμενών: Στην περιοχή περιμετρικά του χώρου των δεξαμενών υπάρχουν διάσπαρτα κομβία αναγγελίας πυρκαγιάς όπου ενεργοποιούν το σήμα συναγερμού στο Θάλαμο Ελέγχου.
- Πυροσβεστικό δίκτυο: Εκτενές πυροσβεστικό δίκτυο που καλύπτει περιμετρικά την περιοχή των δεξαμενών τόσο για την κατάσβεση της πυρκαγιάς όσο και για την ψύξη και αποτροπή επέκτασης της (κουρτίνες νερού).
- Σύστημα παροχής αφρού πυρόσβεσης: Προβλέπεται η ύπαρξη ημι-μόνιμων συστημάτων αφροκάλυψης των δεξαμενών που τροφοδοτούνται από τα πυροσβεστικά οχήματα του βιομηχανικού συγκροτήματος, καθώς και απευθείας ρίψης αφρού από τα κανόνια των πυροσβεστικών οχημάτων.
- Ακροφύσια έγχυσης αφρού πυρόσβεσης στον περιφερειακό μεταλλικό δακτύλιο πλωτής οροφής: Συνήθως υπάρχει εγκατάσταση ημι-δακτυλίων διανομής αφροδιαλύματος με ακροφύσια/ αφρογεννήτριες σε κάθε δεξαμενή και δακτύλιο συγκράτησης του αφρού στο δακτύλιο της οροφής.
- Πυροσβεστήρες στις πλατφόρμες εισόδου και στις διόδους των λεκανών: Προβλέπεται η εγκατάσταση μεγάλου αριθμού πυροσβεστήρων κόνεως.
- Σύστημα ψύξης δεξαμενών: Προβλέπεται εγκατάσταση μόνιμου συστήματος νερού ψύξης με δακτυλίους ψύξης και πολλά ακροφύσια για κάθε δεξαμενή. Επιπλέον υπάρχει δυνατότητα ψύξης με σταθερά/ φορητά κανόνια και πυροσβεστικά οχήματα.
- Εφεδρική πετρελαιοκίνητη αντλία: Συνίσταται η ύπαρξη εφεδρικών αντλιών για τη τροφοδοσία της δεξαμενής νερού που χρησιμοποιείται για την κατάσβεση.
- Σύστημα αντιμετώπισης παγετού: Συνήθως για την αποφυγή εναρκτήριου γεγονότος ατυχήματος από παγετό, το δίκτυο πυρόσβεσης είναι υπόγειο, τα υδροληπτικά είναι αυτοστραγγιζόμενα και τα συστήματα ψύξης δεξαμενής είναι αποστραγγιζόμενα αυτόματα ή χειροκίνητα.

Παράρτημα II









Κεφάλαιο 8: Βιβλιογραφία

- 1) A Thirty-Yer Review, Trends and Analysis, Nineteenth Edition, February 2001.
- 2) Ahrens, C. D., (2006). Meteorology Today, Brooks Cole; 8th edition.
- 3) Argyropoulos, C.D, Christolis, M.N, Nivolianitou, Z., Markatos, N.C., (2008 a,b). Numerical Simulation of the Dispersion of Toxic Pollutants from Large Tank Fires, Proceeding of the Sixth International Conference on Engineering Computational Technology, Paper 49.
- 4) Argyropoulos, C.D., Sideris, G.M., Christolis, M.N., Nivolianitou, Z., Markatos, N.C., (2010). Modeling pollutants dispersion and plume rise from large hydrocarbon tank fires in neutrally stratified atmosphere, Atmospheric Environment, Vol. 44, pp 803-813
- 5) Ashgriz, N. and Mostaghimi, J., An Introduction to Computational Fluid Dynamics, Chapter 20 in Fluid Flow Handbook, Department of Mechanical & Industrial Engineering, University of Toronto, Ontario.
- 6) Atherton W. and Ash, J.W., (2008). Review of Failures, causes & Consequences in the Bulk Storage Industry, Liverpool John Moores University, Faculty of Technology and Environment, School of the Built Environment.
- 7) Atkinson, G.. and Gant, S., Buncefield Investigation: Liquid flow and Vapour production HSL Report FS/06/09
- 8) Babrauskas, (1983). Estimatin large pool fire burning rates. Fire technology, Vol. 19, pp: 251-261.
- 9) Babrauskas, (1995). SFPE Handbook, chapter Burning Rates. 2nd Edition, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, U.S.A.
- 10) Bakker, A. (2012), The Colorful Fluid Mixing Gallery: <http://www.bakker.org/cfm>
- 11) Baum, H.R. and McGrattan K.B., (1999). Simulation of oil tank fires, International interflam Conference, 8th Proceedings, Vol. 2, Edinburg, Scotland, pp: 1117-1128.
- 12) Blocken, B., Sthathopoulos, T., Carmeliet, J., 2007. CFD simulation of the atmospheric boundary function problems. Atmospheric Environment Vol 41 No 2 pp: 238-252.
- 13) Booher, L.E., and Janke, B., (1997). Air emissions from petroleum hydrocarbon fires during controlled burning. American Industrial Hygiene Association Journal, Vol. 58, pp 359-365.
- 14) Bradshaw, P., Turbulence: the chief outstanding difficulty of our subject, Experiments in fluids, Vol. 16, No. 3-4, pp: 203-216, 1994.
- 15) Carter, D.A., (1989). Methods for estimating the dispersin of toxic combustion products from large fires. Chemical Engineering Research Design, Vol. 67, pp 348-352.

- 16) Chang, J.I., Lin, C.C., (2006). A study of storage tank accidents, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 19, pp 51–59.
- 17) Concentration Heat and Momentum Ltd. Engineering Software Company: www.cham.co.uk, (2012).
- 18) Craft, T. J., (2011). Lecture notes “Advanced Turbulence Modelling”. M.Sc. -Thermal Power and Fluid Engineering, School of Mechanical Aerospace and Civil Engineering, University of Manchester.
- 19) Daly, B. J., and F. H. Harlow (1970), Transport equations in turbulence. *Physics of fluids*, Vol. 13, pp 2634.
- 20) Davidov, B.I (1961). On the statistical dynamics of an incompressible turbulence fluid. *Dokl. ANSSR* 136, pp 47-50.
- 21) Devenish, B.J. and Edwards, J.M., (2009) Large-eddy simulation of the plume generated by the fire at the Buncefield oil depot in December 2005, *Proceedings of the Royal society*, pp 397-419.
- 22) Evans, D.D., (1991). *Combustion of Oil Spills on Water*. OCS Study MMS 88-0057). Reston, VA: Environment Canada, pp 169-179.
- 23) Evans, D.D., Mulholland, G.W., Baum, H.R., Walton, W.D. and McGrattan, K.B., (2001). In situ burning of oil spills. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, Vol. 106, pp 231-278.
- 24) Evans, D.D., Mulholland, G.W., Lawson, J.R. and Tennyson, E.J., (1991). Burning of Oil Spills. In *proceedings of the 1991 Oilspill Conference*. Washington, D.C.: American Petroleum Institute, pp 677-680.
- 25) Federal Public Service – Employment Labour & Social Dialogue, Safety Alert: Rupture of and (Atmospheric) Crude Oil Storage Tank, Document No CRC/ONG/013-E. Vol. 1, 2006.
- 26) Fire protection private company: www.firesecurity.gr. (2012)
- 27) Fisher, B.E.A, Metcalfe, E., Vince, I., Yates, A., (2001). Modelling plume rise and dispersion from pool fires. *Atmospheric Environment*, Vol. 35, pp 2101-2110.
- 28) Fisher, B.E.A., Metclafe, E., Vince, I., Yates, A., (2001). Modelling plume rise and dispersion from pool fires, *Atmospheric Environment*, Vol. 35, pp 2101-2110,
- 29) Fletcher, C.A.J., (1991). *Computational Techniques for Fluid Dynamics 1*, Second Edition, Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- 30) G. Atkinson, L. Cusco, Buncefield, (2011). A violent, episodic vapour cloud explosion, *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 89, pp 360-370.
- 31) Gant, S.E., Atkinson, G.T., (2011). Dispersion of the vapour cloud in the cloud in the

- Buncefield Incident, Process Safety and Environmental Protection, Vol. 89, pp 391-403.
- 32) Ghoniem, A.F., Zhang, X., Knio, Baum, H.R., Rehm, R.G., (1993). Dispersion and deposition of smoke plume generated in massive fires, Journal of Hazardous Materials, Vol. 33, pp 275-293.
 - 33) Hahn, J., (1991). Environmental effect of the Kuwaiti oil field fires, Environmental Science and Technology, Vol. 25, pp1530-1532.
 - 34) Haney, J.T., (1973). Quantitative Evaluation of Smoke Abatement System for Crash/Rescue Training Fires. (Technical report no. AFWL-TR-73-106). Kirtland Air Force Base, NM: Air Force Weapons Laboratory, Air Force Systems Command.
 - 35) Hanna, S.R., Briggs, G.A, Hosker, R.P., (1982). Handbook on Atmosphere Diffusion. Technical Information Center, U.S Department of Energy.
 - 36) Harlow, F.H. and Nakayama, P., (1968). Transport of turbulence energy decay rate. University of California Report LA-3854, Los Alamos Science Laboratory.
 - 37) Health and Safety Commission, Official Buncefield Major Investigation:
 - 38) Herbert, I., The UK Buncefield incident- The view from a UK risk assessment engineer, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 23 (2010) 913-920.
 - 39) <http://cfd.mace.manchester.ac.uk/twiki/bin/view/CfdTm/WebHome>, (2012).
 - 40) <http://www.buncefieldinvestigation.gov.uk/index.htm> (2012).
 - 41) Huser, A., Nilsen, P.J. and Sketun, H., (1997). Application of $k\sim\varepsilon$ model to the stable ABL: Pollution in complex terrain. Journal
 - 42) Koseki, H., Iwata, Y., Natsume, Y., Takahashi, T. and Hirano, T., (2000). Tomakomai large scale crude oil fire experiments. Fire Technology, Vol. 36, pp 24-38.
 - 43) Lanzoni, J.A., (2008). Reducing the Risk of Floating Roof Tank Fires, Lighting Eliminators & Consultants, Inc.
 - 44) Large Property Damage Losses in the Hydrocarbon-Chemical Industries.
 - 45) Launder, B.E. and Sharma, B.I., (1974). Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc. Letter Heat and Mass Transfer, Vol. 1, pp 131-138.
 - 46) Launder, B.E. and Spalding, D.B., (1974). The numerical computation of turbulent flows. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 3, pp 269-289.
 - 47) Lemieux, P.M., Lutes, C.C. and Santoianni, D.A., (2004). Emissions of organic air toxics from open burning: a comprehensive review. Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 30, pp 1-32.
 - 48) Markatos, N.C and Malin M.R., (1982) Mathematical modelling of buoyancy-induced

- smoke flow in enclosures, *International Journal Heat Mass Transfer*, Vol. 25, No. 1, pp 63-75.
- 49) Markatos, N.C and Pericleus, K.A., (1984). Laminar and turbulent natural convection in an enclosed cavity, *International Journal Heat Mass Transfer*, Vol. 27, No. 5, pp 755-772.
- 50) Markatos, N.C., Christolis, C., Argyropoulos, C., (2009). Mathematical modelling of toxic pollutants dispersion from large tank fires and assessment of acute effects for the fire fighters, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp 4021-4030,
- 51) McGrattan, K.B., (2003). Smoke Plume Trajectory Modeling, *Spill Science & Technology Bulletin*, Vol. 8, No. 4, pp 367-372.
- 52) McGrattan, K.B., Baum, H.R., Rehm, R.G., (1996). Numerical simulation of smoke plums from large oil fires, *Atmospheric Environment* Vol. 30, No. 24, pp 4125-4136.
- 53) Moukalled, F., Darwish, M., Sekar, B., (2000), A Unified Formulation of the Segregated Class of Algorithms for Fluid Flow at All Speeds, *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals: An International Journal of Computation and Methodology*, Vol. 37, Issue 1, pp 99-137.
- 54) N.C. Markatos, M. R. Malin, (1982). Mathematical Modelling of Buoyancy-Induced Smoke Flow in Enclosures, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol 25, No.1. pp 63-75,
- 55) National Fire Protection Association (NFPA), (1997). *Fire Protection Handbook 18th Edition*, Quincy, Massachusetts.
- 56) National Fire Protection Association (NFPA), (2002). *Fire Protection Handbook 18th Edition*, Quincy, Massachusetts.
- 57) Notarianni, K.A., Evans, D.D., Walton, W.D., Madrzykowski, D. and Lawson, J.R., (1993). Smoke production from large oil pool fires. *Interflam '93, Fire Safety, Int'l Fire Conference, 6th*, Oxford, England; Interscience Communications Ltd., London, England (ed: Franks, C.A.), pp 111-119.
- 58) Occupational Safety and Health Administration: <http://www.osha.gov/>, (2012).
- 59) Online center for Computational Fluid Dynamics: www.cfd-online.com, (2012).
- 60) Online resource place for Compression and power industry :
<http://articles.compressionjobs.com/articles/oilfield-101/5130-storage-tanks-vessels-gas-liquids?start=2>. (2012)
- 61) Pasquill, F. and Smith, F.B., (1983). *Atmospheric Diffusion. Third Edition*. Ellis Horwood Ltd Publishers, Chichester. 437 pp.
- 62) Patankar, S.V., (1980). *Numerical heat transfer and fluid flow*. Hemisphere Publishing Corporation, New York.

- 63) Peric, M., A Finite Volume Method for the Prediction of Three Dimensional Fluid Flow in Complex Ducts, Ph.D. Thesis, Imperial College, Mechanical Engineering Department, London, 1985.
- 64) Persson, H., Lönnemark, A., (2004). Tank Fires, Review of fire incidents 1951-2003, SP Swedish National Testing and Research Institute.
- 65) Rasmussen, K., (1995). Natural events and accidents with hazardous materials. Journal of Hazardous Materials, Vol. 40, No. 1, pp 43-54.
- 66) Ritchie R., (2009), Preventing storage tank fires, Plant safety and environment, Special report. SGS North America Inc., Bartlesville, Oklahoma, U.S.A.
- 67) SEVESO I 82/501/EEC
- 68) SEVESO II 96/82/EC
- 69) Storage incident frequencies, Risk Assessment Data Directory, International Association of Oil & Gas Producers, Report No. 434-3, March 2010.
- 70) Stull, R.B., (2000). An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Atmospheric Sciences Library, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 666 pp.
- 71) Tennekes, H., (1973). The logarithmic wind profile. Journal of Atmospheric Science, Vol. 30, pp 234-238.
- 72) Tennekes, H., (1989). Two- and three-dimensional turbulence. In: Lecture Notes on Turbulence, J.R. Herring and J.C. McWilliams (eds.), pp 1-73.
- 73) The International Programme on Chemical Safety (IPCS): www.inchem.org, (2012)
- 74) Trelles, J., McGrattan, K.B., Baum, H.R., (1999). Smoke Dispersion from Multiple Fire Plumes, American Institute of Aeronautics and Astronautics Vol. 37, No. 12, 1999.
- 75) Turner D. B., (1994). Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates: An Introduction to Dispersion Modeling. Second Edition. Lewis Publishers, Florida.
- 76) Turner, D.B., (1985). Proposed pragmatic methods for estimating plume rise and plume penetration through atmospheric layers. Atmospheric Environment, Vol. 19, pp 1215-1218.
- 77) U.S Environmental Protection Agency:
<http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch07/final/c07s01.pdf> (2012)
- 78) United States Environmental Agency: www.epa.gov, (2012).
- 79) University Corporation for Atmospheric Research (UCAR): <https://www2.ucar.edu/>
- 80) Vautard, R., Ciais, P., Fisher, R., Lowry, D., Breon, F.M., Vogel, F., Levin, I., Miglietta, F., Nisbet, E., (2007). Atmospheric Environment, Vol. 41, pp 9506-9517, 2007.
- 81) Versteeg, H.K and Malalasekera, W., (1995). An introduction to computational fluid dynamics, The finite volume method. Longman Scientific & Technical.

- 82) Vilchez, J.A., Sevilla, S., Montiel, H., Casal, J., (1995). Historical analysis of accidents in chemical plants and in the transport of hazardous materials, *J. Loss Prev. Process Ind.*, Vol. 8, No. 2, pp 87-96.
- 83) Wallace, J.M., Hobbs P.V., (2006). *Atmospheric Science. An Introductory Survey*, Elsevier Academic Press, California, U.S.A.
- 84) Walton, W.D., Twilley, Putorti, A.D. and Hiltabrand, R.R., (1995). Smoke measurements using an advanced helicopter transported sampling package with radio telemetry. *Proceedings of the 18th Arctic and Marine Oilspill Program Technical Seminar*. Environment Canada, Ottawa, Ontario, pp 1053-1074.
- 85) Walton, W.D., Twilley, W.H., McElroy, J., Evans, D.D., and Tennyson, E.J., (1994). Smoke measurements using a tethered miniblomp at the Newfoundland Offshore Oil Burn Experiment. *Proceedings of the 17th Arctic and Marine Oilspill Program Technical Seminar*. Environment Canada, Ottawa, Ontario, pp 1083-1098.
- 86) Wilson, R.B., (1993). Review of development and application of CRSTER and MPTER models, *Atmopsheric Environment*, Vol 27 B, pp 41-57
- 87) World Health Organization (W.H.O):
http://www.who.int/environmental_health_emergencies/technological_incidents/en/ (2012)
- 88) World Meteorological Organization: <http://www.wmo.ch/>, (2012)
- 89) Yakhot, V. and Orszag S.A., (1986). Renormalization Group Analysis Turbulence. I. Basic Theory, *Journal of Scientific Computing*, 1, pp 3-51.
- 90) Yakhot, V. and Smith M.L., (1992). The Renormalzation Group, the ϵ -Expansion and Derivation of Turbulence Models. *Journal of Scientific Computing*, 7, pp 35-61.
- 91) Yakhot, V., Orsag S.A., Thangam, S., Gatski, T.B and Speziale C.G., (1992). Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics Fluids*, 4, pp 1510-1520.
- 92) Yang, J.C., Hamins, A. And Kashiwagi, T., (1994). Estimate of the effect of scale on radiative heat loss fraction and combustion efficiency. *Combustion Science and Technology*, Vol 96, pp 183-188.
- 93) Yasutaka, N., Yoshihiro, I., (1997). Renormalization group theory for turbulence: Assesment of the Yakhot-Orsag-Smith theory, *Fluid Dynamics Research*, Vol. 20, pp 157-172.

- 94) Zabetakis, M.G. and Burgess, D.S., (1961). Research of the Hazards Association with the production and Handling of Liquid Hydrogen. R.I 5707, Bureau of Mines, Pittsburgh.
- 95) Zhang, X. and Ahmed F. Ghoniem (1994b). A Computational model for the rise and dispersion of wind-blown, buoyance-driven plumes-III, Penetration of atmospheric inversion, Atmospheric Environment Vol. 28, No. 18, pp 3019-3032.
- 96) Zhang, X. and Ghoniem, A.F., (1993). A Computational model for the rise and dispersion of wind-blown, buoyance-driven plumes-I, Neutrally stratified atmosphere, Atmospheric Environment Vol. 27A, No. 15, pp 2295-2311,
- 97) Zhang, X. and Ghoniem, A.F., (1994a). A Computational model for the rise and dispersion of wind-blown, buoyance-driven plumes-II, Linearly stratified atmosphere, Atmospheric Environment Vol. 28, No. 15, pp 3015-3018.
- 98) Zonato, C., Vidili, A., Pastorino, R., De Faveri, D.M., (1993). Plume rise of smoke coming from free burning fires. Journal of Hazardous Materials, Vol. 34, pp 69-79.
- 99) Γεωργιάδου, Ε., (2008); Βιομηχανικά Ατυχήματα Μεγάλης Έκτασης, Ελληνικό Ινστιτούτο Υγιεινής και Ασφάλειας της Εργασίας. Α' Έκδοση, Αθήνα.
- 100) Ελληνικό Ινστιτούτο Υγιεινής και Ασφάλειας της Εργασίας, Πυρασφάλεια, Σειρά: Τεκμηρίωση ΥΑΕ; 7, Αθήνα 2008.
- 101) Ζυμάρης, Α.Σ., Συζυγείς μέθοδοι για το σχεδιασμό μορφών με βέλτιστη αεροδυναμική συμπεριφορά σε στρωτές και τυρβώδεις ροές, Διδακτορική διατριβή, Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, 2010.
- 102) Κατσαφάδος, Π., και Μαυροματίδης, Η., (2010). Αρχές μετεωρολογίας-κλιματολογίας. Σημειώσεις μαθήματος προπτυχιακού μαθήματος Μετεωρολογία-Κλιματολογία, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο.
- 103) Λέκκας, Αθ., (1997). Μετεωρολογία, Εκδόσεις Έλλην, Αθήνα.
- 104) Μαρκάτος, Ν. Χ και Ασημακόπουλος, Δ., (1995). Υπολογιστική Ρευστοδυναμική. Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- 105) Μαρκάτος, Ν.Χ., (1998). Τυρβώδη φαινόμενα μεταφοράς και μαθηματικά πρότυπα προσομοίωσής τους. Σημειώσεις μαθήματος «Μεταφορά ορμής, θερμότητας και μάζας», Δ.Π.Μ.Σ. – Υπολογιστική Μηχανική, Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
- 106) Μελάς, Δ., (2003). Το Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα. Σημειώσεις για ΜΤΠ Φυσικής Περιβάλλοντος του Τμήματος Φυσικής, Α.Π.Θ.

- 107) Μπεργελές, Γ.Χ., (2006). Πηγές, Διασπορά και Έλεγχος Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις, Ε.Μ.Π, Αθήνα.
- 108) Μπεργελές, Γεώργιος (2006). Υπολογιστική Ρευστομηχανική. Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
- 109) Σαχσαμάνογλου, Χ.Σ., Μακρογιάννη Τ.Ι., (1998). Γενική μετεωρολογία, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- 110) Σταυρακάκης, Γ., Μαθηματική μοντελοποίηση της θερμικής άνεσης και της ποιότητας εσωτερικού αέρα και προχωρημένες τεχνικές βελτιστοποίησης του κτιριακού σχεδιασμού: Εφαρμογές σε φυσικά αεριζόμενα, Διδακτορική διατριβή, Μονάδα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής της Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, 2010.
- 111) Στούρνας, Σ., Ζαννίκος Φ., (2001). Σημειώσεις μαθήματος «Τεχνολογία καυσίμων και λιπαντικών», Σχολή Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
- 112) Υπουργείο Προστασίας του Πολίτη, Αρχηγείο Πυροσβεστικού Σώματος, Εγχειρίδιο Εκπαίδευσης Εθελοντών Πυροσβεστών, Αθήνα 2009.
- 113) Χριστόλης Μ., Αργυρόπουλος Χ., Σταυρακάκης Γ., Κολυφέτης Ε., Λυγερός Α. και Μαρκάτος Ν.Χ., (2008). Αξιολόγηση μελέτης ασφάλειας για το έργο «Δεξαμενισμός αργού πετρελαίου χαμηλού θείου» της εταιρείας Ελληνικά Πετρέλαια Α.Ε. –Βιομηχανικές Εγκαταστάσεις Θεσσαλονίκης (ΕΛ.ΠΕ./ΒΕΘ)». Μονάδα Υπολογιστής Ρευστοδυναμικής, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.