

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA



ΓΚΟΛΕΜΙ ΑΛΕΣΙΑ

Εκτίμηση επιπτώσεων στο περιβάλλον από πυρκαγιά υγρών
καυσίμων σε δεξαμενή αποθήκευσης

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Ακαδημαϊκό Έτος: 2021 - 2022

Επιβλέπων: Δρ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΣ
Επιβλέπων: Δρ. ΙΩΑΝΝΗΣ ΣΑΡΡΗΣ

Αιγάλεω, Μάρτιος 2022

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Ακαδημαϊκό Έτος: 2021- 2022

ΓΚΟΛΕΜΙ ΑΛΕΣΙΑ

Εκτίμηση επιπτώσεων στο περιβάλλον από πυρκαγιά υγρών
καυσίμων σε δεξαμενή αποθήκευσης

Επιβλέπων: Δρ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Ι. ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΣ
Επιβλέπων: Δρ. ΙΩΑΝΝΗΣ ΣΑΡΡΗΣ

Αιγάλεω, Μάρτιος 2022

© UNIVERSITY OF WEST ATTICA
2022. All rights reserved. No part of this publication may be
reproduced without the written permission of the copyright owner.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Εκτίμηση επιπτώσεων στο περιβάλλον από πυρκαγιά υγρών καυσίμων σε δεξαμενή αποθήκευσης

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

A/α	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	Δρ. Ιωάννης Σαρρής	Καθηγητής	
2	Δρ. Κωνσταντίνος Ιωάννης Βασιλόπουλος	Διδάκτορας ΕΣΠΑ	
3	Δρ. Απόστολος Γκούντας	Διδάκτορας ΕΣΠΑ	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη ΓΚΟΛΕΜΙ ΑΛΕΣΙΑ του ΣΚΕΝΤΕΡ, με αριθμό μητρώου 46146256, φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Η Δηλούσα
Αλέσια Γκολέμι



ABSTRACT

Accidental releases of flammable hydrocarbons in chemical process industries can trigger severe hazards, considering incidents of fires as the most common accidental events that may lead to catastrophic consequences in terms of life and property losses. In order to analyse the influence of the wind speed on the fire characteristics and hazards of large crude oil storage tank, this thesis initially investigated the behaviour of air flow around a cylindrical geometry, using Computational Fluid Dynamics methods (CFD) and experimental data on a scaled-down model, to ensure the validation of the numerical results. The simulation was conducted with the Fire Dynamics Simulator (FDS), which is a Large Eddy Simulation (LES) code. Then, a real scale test was carried out, to simulate the fire of a real scale crude oil storage tank under a specific wind speed. The fire characteristics such as flame, smoke, and temperature distributions of the tank were studied. Finally, an environmental impact assessment took place by extracting the risk zones from the concentration of the spread toxic pollutants.

Keywords: crude oil pool fire; Fire Dynamics Simulator (FDS); LES method; industrial accident; storage tank; toxic exposure limit; risk zones

Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας δεν θα ήταν δυνατή, φυσικά, χωρίς την συμβολή και την υποστήριξη κάποιων ατόμων. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Ιωάννη Σαρρή για την ανάθεση και επίβλεψη του θέματος, καθώς και την διάθεση υπολογιστικών πόρων. Τον Δρ. Ιωάννη Λεκάκη, που βρισκόταν στο χώρο του εργαστηρίου ανά πάσα στιγμή, πάντα με διάθεση να λύσει οποιαδήποτε απορία και κυρίως, γιατί, παρά τον λιγοστό χρόνο γνωριμίας μας, ήταν πρόθυμος να με βοηθήσει ακαδημαϊκά στα επόμενα βήματα μου.

Όλα αυτά, όμως, δεν θα ήταν εφικτά χωρίς την συμβολή του Δρ. Κωνσταντίνου Βασιλόπουλου, που με την υπομονή και την επιμονή του, με βοήθησε να ξεπεράσω τα εμπόδια που επέφερε η κατάσταση του κορωνοϊού και μου εμπιστεύθηκε το θέμα της διπλωματικής εργασίας. Πάντα βοηθητικός και πρόθυμος να επικοινωνήσει ανά πάσα ώρα και στιγμή, τον ευχαριστώ, γιατί με δική του παρότρυνση με έκανε να οραματιστώ το ακαδημαϊκό μου μέλλον και να βάλει ένα λιθαράκι για να ανοίξω τα φτερά μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, τον καθένα τους ξεχωριστά. Τον πατέρα μου, Σκεντέρ Γκολέμι, που με μύησε με τον τρόπο του στο κόσμο του μηχανικού και γενικότερα για την υποστήριξη του. Την μητέρα μου, Μακμπούλε Γκολέμι, για την απεριόριστη στήριξη και αγάπη της όλα τα χρόνια των σπουδών μου και την αδερφή μου, Έρτα Γκολέμι, που ήταν και είναι πάντα εκεί για εμένα. Δεν θα τα είχα καταφέρει χωρίς εσάς.

Τις φίλες μου Μυρτώ Καλιανιώτη και Μαρία Κατελάνου για την κατανόηση τους, ειδικά τους τελευταίους μήνες της εργασίας, ήταν πάντα εκεί για να με ακούσουν και να μου φτιάξουν το κέφι. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον σύντροφο μου και συνεργάτη, Ανάργυρο Παλάμπιγικ, για την πολύτιμη και ανεκτίμητη βοήθεια του για την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας μου. Τον ευχαριστώ που με εμπιστεύτηκε από την πρώτη στιγμή, που μου μεταλαμπαδεύει τις γνώσεις του και που με βοήθησε να σχεδιάσω το ακαδημαϊκό μέλλον μου.

Σας ευχαριστώ.

Στην μνήμη του συνάδελφου, Ελίζ Γκέλι.

Περιεχόμενα

ABSTRACT	i
Ευχαριστίες	ii
Κατάλογος Σχημάτων	vi
Κατάλογος Πινάκων	x
Κατάλογος Εξισώσεων	xi
Λίστα Συντομογραφιών	xii
1 Εισαγωγή	13
2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	15
2.1 Ροή γύρω από κύλινδρο	15
2.2 Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα (ΑΟΣ)	23
2.3 Βιομηχανικά Ατυχήματα Φωτιάς σε Δεξαμενές Αποθήκευσης Καυσίμων	27
2.4 Δεξαμενές Καυσίμων	29
2.4.1 Κατηγοριοποίηση Δεξαμενών	30
2.5 Βασικές έννοιες για καύση, φωτιά και καύσιμα	33
2.5.1 Σύσταση και ιδιότητες αργού πετρελαίου	33
2.5.2 Χαρακτηριστικά φωτιάς λίμνης αργού πετρελαίου	37
2.6 Ανάλυση των παραμέτρων του ατυχήματος	41
3 Μεθοδολογία	45
3.1 Αριθμητική προσέγγιση	45
3.1.1 Κατηγορίες μοντέλων διασποράς	45
3.1.2 Μαθηματικό μοντέλο	47
3.1.3 Αριθμητική μέθοδος επίλυσης	49
3.2 Πειραματική προσέγγιση	51
3.2.1 Εργαστηριακός εξοπλισμός	51
4 Ανάλυση υπό κλίμακας μοντέλου	56
4.1 Υπολογιστικό χωρίο	56
4.2 Οριακές συνθήκες	58
4.3 Εδραιοποίηση πεδίου ροής	60
4.4 Ανεξαρτησία Πλέγματος	63
4.5 Κατακόρυφα ισοϋψής γραφήματα	68
4.6 Οριζόντια ισοϋψή γραφήματα	74
4.7 Ποιοτική ανάλυση	78
4.7.1 Υπολογισμός αδιάστατου συντελεστή πίεσης	78
4.7.2 Κατακόρυφα γραφήματα αδιάστατων ταχυτήτων κατόντη του κυλίνδρου	80
5 Προσομοίωση ατυχήματος	83
5.1 Κατακόρυφα ισοϋψής γραφήματα	84
5.2 Οριζόντια ισοϋψής γραφήματα	86
5.3 Ισοϋψή γραφήματα θερμοκρασιακού πεδίου	88

5.4 Κατακόρυφα ισοϋψής γραφήματα τοξικών ρύπων.....	90
5.5 Διασπορά καπνού.....	92
5.6 Ζώνες επικινδυνότητας	93
6 Συμπεράσματα	98
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	101

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1 Σχηματική αναπαράσταση τοπολογίας μιας μέσης ροής (Frederich et al. 2008).....	16
Σχήμα 2-2 Ροϊκές γραμμές ροής πλησίον βάσης και τοιχωμάτων κυλίνδρου. Δεξιά: φωτογραφικό στιγμιότυπο ροής λαδιού (Rödiger, Knauss et al. 2008).	18
Σχήμα 2-3 Σχηματική αναπαράσταση ροής σε κύλινδρο χαμηλού ύψους (Pattenden, Bressloff et al. 2007).	18
Σχήμα 2-4 Φωτογραφικό στιγμιότυπο ροής λαδιού πάνω σε βάση (Rödiger, Knauss et al. 2008).....	19
Σχήμα 2-5 Σχηματική αναπαράσταση της ροής γύρω από κύλινδρο για την περίπτωση ψηλού κυλίνδρου (Sumner 2013).....	21
Σχήμα 2-6 Στο κάτω μέρος εμφανίζεται ο τρίτος τύπος δινών για $3 \leq h/D \leq 5$ (Zhang, Cheng et al. 2021).	22
Σχήμα 2-7 Σύγκριση τιμών διατμητικών τάσεων για $h/D=0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 6.0$ (Zhang, Cheng et al. 2021).....	22
Σχήμα 2-8 Με την αύξηση του λόγου $AR=h/D$, φαίνεται να κυριαρχούν ολοένα και περισσότερο οι δίνες Karman (Zhang, Cheng et al. 2021).	23
Σχήμα 2-9 Οι ζώνες της ατμόσφαιρας ως προς το ύψος και οι αντίστοιχες επικρατούσες θερμοκρασίες και πιέσεις (Γεντεκάκης 2010).	24
Σχήμα 2-10 Τυπική απεικόνιση της δομής του ΑΟΣ, κατά την διάρκεια της μέρας σε ξηρά και σε συνθήκες καθαρού ουρανού (Garratt 1994).	26
Σχήμα 2-11 Ταξινόμηση λιμνών φωτιάς (Miao, Wenhua et al. 2014).....	29
Σχήμα 2-12 Δεξαμενές Σταθερής Οροφής (Engineering).	31
Σχήμα 2-13 Δεξαμενή Πλωτής Οροφής (MTR (Thailand) Co. 2022).	32
Σχήμα 2-14 Δεξαμενή Ανοιχτής Οροφής (Water Storage Tanks).	32
Σχήμα 2-15 Χημικοί τύποι υδρογονανθράκων (Ανδρίτσος 2008).	36
Σχήμα 2-16 Χαρακτηριστικά φωτιάς, απουσία ανέμου (Hu 2017).	40
Σχήμα 2-17 Χαρακτηριστικά φωτιάς, παρουσία ανέμου (Hu 2017).	42
Σχήμα 2-18 Βήματα για μοντελοποίηση επιπτώσεων και για ανάλυση συνεργικών δράσεων σε λίμνες φωτιάς βάσει CFD (Li, Chen et al. 2021).....	43
Σχήμα 3-1 Ανοιχτός θάλαμος δοκιμών αεροσήραγγας.....	52
Σχήμα 3-2 Υπό κλίμακα γεωμετρία κυλίνδρου.....	53
Σχήμα 3-3 Η γεωμετρία του κυλίνδρου με τις φέρουσες οπές.	53

Σχήμα 3-4 Μικρομανόμετρο FCO560.....	54
Σχήμα 3-5 Χρήση spires για την δημιουργία οριακού στρώματος.	55
Σχήμα 3-6 Πειραματική διάταξη στην αεροδυναμική αεροσήραγγα.....	55
Σχήμα 4-1 Διαστάσεις υπολογιστικού χωρίου.	58
Σχήμα 4-2 Προφίλ ταχύτητας στην είσοδο.....	59
Σχήμα 4-3 Ένταση της τύρβης α) για τις τρεις συνιστώσες της ταχύτητας και β)για τις διακυμάνσεις της κινητικής ενέργειας.....	60
Σχήμα 4-4 Χρονοσειρά του πεδίου ταχύτητας στην θέση 3.	62
Σχήμα 4-5 Χρονοσειρά του πεδίου ταχύτητας στην θέση 5.	62
Σχήμα 4-6 Χρονοσειρά του πεδίου ταχύτητας στην θέση 12.....	63
Σχήμα 4-7 Χρονοσειρά του πεδίου ταχύτητας στην θέση 19.	63
Σχήμα 4-8 Υπολογισμός σφαλμάτων διακριτοποίησης για το κατακόρυφο προφίλ της U/Uref στην θέση X/D 5,5.....	67
Σχήμα 4-9 Υπολογισμός σφαλμάτων διακριτοποίησης για το κατακόρυφο προφίλ της U/Uref στη θέση X/D 6,5.....	68
Σχήμα 4-10 Απεικόνιση του υπολογιστικού πλέγματος στο κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας.....	70
Σχήμα 4-11 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα του πεδίου ροής στο επίπεδο συμμετρίας.....	71
Σχήμα 4-12 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα με ροϊκές γραμμές του πεδίου ροής στο επίπεδο συμμετρίας.	72
Σχήμα 4-13 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα του πεδίου ροής στο επίπεδο συμμετρίας για τη χρονική στιγμή $t=2s$	73
Σχήμα 4-14 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα του πεδίου ροής στο επίπεδο συμμετρίας για τη χρονική στιγμή $t=7s$	73
Σχήμα 4-15 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα του πεδίου ροής στο επίπεδο συμμετρίας για τη χρονική στιγμή $t=15s$	74
Σχήμα 4-16 Οριζόντιο γράφημα διακριτοποίησης του πεδίου ροής για $Z/D=0,5$	75
Σχήμα 4-17 Οριζόντιο ισοϋψές γράφημα του πεδίου ροής για $Z/D=0,5$	76
Σχήμα 4-18 Οριζόντιο ισοϋψές γράφημα με ροϊκές γραμμές του πεδίου ροής για $Z/D=0,5$	77
Σχήμα 4-19 Οριζόντιο ισοϋψές γράφημα του πεδίου ροής για $Z/D=0,5$ για τη χρονική στιγμή $t=2s$	77

Σχήμα 4-20 Οριζόντιο ισοϋψές γράφημα του πεδίου ροής για $Z/D=0,5$ για τη χρονική στιγμή $t=7s$	78
Σχήμα 4-21 Οριζόντιο ισοϋψές γράφημα του πεδίου ροής για $Z/D=0,5$ για τη χρονική στιγμή $t=15s$	78
Σχήμα 4-22 Σύγκριση αδιάστατου συντελεστή πίεσης υπολογιστικής προσομοίωσης και πειραματικών δεδομένων.	80
Σχήμα 4-23 Προφίλ ταχυτήτων κατά το οριζόντιο άξονα του πεδίου ροής στο επίπεδο συμμετρίας.....	82
Σχήμα 5-1 Υπολογιστικό χωρίο προσομοίωσης ατυχήματος.	83
Σχήμα 5-2 Κατακόρυφη τομή υπολογιστικού πλέγματος στο επίπεδο συμμετρίας.	84
Σχήμα 5-3 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα στο επίπεδο συμμετρίας.	85
Σχήμα 5-4 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα ροϊκών γραμμών στο επίπεδο συμμετρίας.....	86
Σχήμα 5-5 Οριζόντια τομή υπολογιστικού πλέγματος για $Z/D = 0,5$	86
Σχήμα 5-6 οριζόντιο ισοϋψές γράφημα αδιάστατων ταχυτήτων για $Z/D = 0,5$. ..	87
Σχήμα 5-7 Οριζόντιο ισοϋψές γράφημα ροϊκών γραμμών για $Z/D = 0,5$	88
Σχήμα 5-8 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα θερμοκρασιακού πεδίου στο επίπεδο συμμετρίας.....	89
Σχήμα 5-9 Οριζόντιο ισοϋψές γράφημα θερμοκρασιακού πεδίου για $Z/D=1$	89
Σχήμα 5-10 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα διασποράς διοξειδίου του άνθρακα στο επίπεδο συμμετρίας.	90
Σχήμα 5-11 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα διασποράς μονοξειδίου του άνθρακα στο επίπεδο συμμετρίας.	91
Σχήμα 5-12 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα διασποράς καπνού στο επίπεδο συμμετρίας.....	91
Σχήμα 5-13 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα διασποράς καπνού στο επίπεδο συμμετρίας για $t=100s$	92
Σχήμα 5-14 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα διασποράς καπνού στο επίπεδο συμμετρίας για $t=200s$	93
Σχήμα 5-15 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα διασποράς καπνού στο επίπεδο συμμετρίας για $t=250s$	93
Σχήμα 5-16 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα ζώνης επικινδυνότητας καπνού στο επίπεδο συμμετρίας.....	95

Σχήμα 5-17 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα ζώνης επικινδυνότητας CO στο επίπεδο συμμετρίας.....	96
Σχήμα 5-18 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα ζώνης επικινδυνότητας CO ₂ στο επίπεδο συμμετρίας.....	97

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1 Ταξινόμηση του αργού πετρελαίου σε σχέση με την πυκνότητα του (Ανδρίτσος 2008).....	37
Πίνακας 4-1 Διαστάσεις κυλίνδρου υπολογιστικής προσομοίωσης.	57
Πίνακας 4-2 Αδιάστατες συντεταγμένες και μέσες τιμές ταχυτήτων των σημείων δειγματοληψίας.....	61
Πίνακας 4-3 Αριθμός κελιών ανά κατηγορία πλέγματος.	66
Πίνακας 4-4 Πίνακας με τις συντεταγμένες του κέντρου της θολωτής δίνης.	72
Πίνακας 5-1 Κλίμακα έντασης ανέμου (Zhou 2019).....	84

Κατάλογος Εξισώσεων

(2-1).....	36
(3-1).....	47
(3-2).....	48
(3-3).....	48
(3-4).....	48
(3-5).....	48
(3-6).....	49
(3-7).....	49
(3-8).....	49
(3-9).....	50
(3-10).....	50
(3-11).....	50
(3-12).....	51
(3-13).....	54
(4-1).....	58
(4-2).....	59
(4-3).....	59
(4-4).....	65
(5-1).....	94

Λίστα Συντομογραφιών

ΑΟΣ	Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα
CFD	Computational Fluid Dynamics
LES	Large Eddy Simulation
FDS	Fire Dynamics Simulator
NIST	National Institute of Standards and Technology
PIV	Particle Image Velocimetry
DNS	Direct Numerical Simulation
RAM	Random-Access Memory
SFM	Solid Flame Model
RANS	Reynolds-Averaged Navier Stokes
LC ₅₀	Lethal Concentration 50
LC ₁	Lethal Concentration 1
IDLH	Immediately Dangerous to Life and Health
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
ARIS	Advanced Research Information System

1 Εισαγωγή

Το ζήτημα της βιομηχανικής ασφάλειας είναι ένα από τα πιο σημαντικά και πάντοτε επίκαιρα θέματα σε παντός τύπου εγκαταστάσεις και ιδιαίτερα σε εγκαταστάσεις διυλιστηρίων, όπου, λόγω της φύσης των ουσιών και των διεργασιών, οι συνέπειες ενός ατυχήματος μπορεί να αποβούν μοιραίες. Παρά το γεγονός ότι οι μεθοδολογίες αποτίμησης και διαχείρισης του κινδύνου εφαρμόζονται εδώ κι αρκετές δεκαετίες, με αποτέλεσμα οι πιο επικίνδυνες και ανεξέλεγκτες καταστάσεις να θεωρούνται πλέον γνωστές και αντιμετωπίσιμες, σοβαρά ατυχήματα συνεχίζουν να λαμβάνουν χώρα. Ατυχήματα εκρήξεων και διασποράς τοξικών νεφών είναι ικανά να βλάψουν ανθρώπους, ακόμη και σε μεγάλη ακτίνα από το σημείο του συμβάντος. Όμως, τα ατυχήματα φωτιάς εξακολουθούν να είναι τα πιο συχνά περιστατικά ατυχημάτων, με καταστροφικές συνέπειες, όπως απώλειες ζώων και καταστροφή βιομηχανικών εγκαταστάσεων.

Για την κατανόηση της εξελικτικής πορείας μιας πυρκαγιάς σε δεξαμενή αποθήκευσης υγρών καυσίμων, εξετάστηκε η περίπτωση ατυχήματος φωτιάς σε μία μεμονωμένη δεξαμενή αργού πετρελαίου, παρουσία ανέμου. Επιλέχθηκε να μελετηθεί μια απλοποιημένη περίπτωση, διότι πρόκειται για ένα πολυσύνθετο ζήτημα, το οποίο είναι αναγκαίο να επιμεριστεί σε συγκεκριμένα σημεία ενδιαφέροντος, τα οποία ερευνήθηκαν ενδελεχώς.

Ένα από αυτά τα σημεία είναι τα χαρακτηριστικά της ροής του αέρα γύρω από την γεωμετρία της δεξαμενής. Η συνήθης γεωμετρία των δεξαμενών είναι κυλινδρική, με διάφορες παραλλαγές στην οροφή της (κωνική οροφή, θολωτή οροφή). Όπως προαναφέρθηκε επιλέχθηκε η πιο απλή περίπτωση δεξαμενής (ανοιχτής οροφής), διότι σκοπός είναι να αναδειχθεί ποια είναι η μορφολογία της ροής, ουσιαστικά, γύρω από ένα κυλινδρικού σχήματος δοχείο σε συνδυασμό με τις συνθήκες του ατυχήματος. Η συμπεριφορά μιας φωτιάς αλλάζει δραματικά από την παρουσία ή μη ανέμου. Άλλα χαρακτηριστικά εμφανίζει σε συνθήκες νηνεμίας (π.χ. ύψος φωτιάς) και άλλα σε συνθήκες ανέμου (π.χ. γωνία κλίσης φλόγας). Για αυτό, η μελέτη και η κατανόηση της ροής γύρω από κύλινδρο αποτελεί από τα πιο σημαντικά κομμάτια της παρούσας έρευνας.

Σε δεύτερο στάδιο, εφόσον έχουν ξεκαθαριστεί τόσο η επίδραση του ανέμου περίξ της δεξαμενής όσο και των συνθηκών που επικρατούν, όπως η ταχύτητα του ανέμου, οι επιλεχθείσες διαστάσεις της γεωμετρίας και το υλικό καύσης, πραγματοποιήθηκε δοκιμή πυρκαγιάς στην οροφή της δεξαμενής. Κατ' αυτόν τον τρόπο, κατέστη, πλέον, δυνατή η μελέτη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από μια απλουστευμένη περίπτωση ατυχήματος φωτιάς δεξαμενής, η οποία μπορεί να εδραιώσει κάποια βασικά χαρακτηριστικά του ατυχήματος, που δύνανται να βρίσκουν εφαρμογή και σε πιο πολύπλοκα γεγονότα. Η αξιολόγηση της επίδρασης ενός τέτοιου συμβάντος στο περιβάλλον επετεύχθη μέσω της εξαγωγής της κατανομής των σωματιδίων καπνού, που παράγονται κατά την διάρκεια της καύσης λόγω της επιρροής του ανέμου, καθώς και των ζωνών επικινδυνότητας.

Όσον αφορά τα εργαλεία, που επιστρατεύθηκαν για την επιτέλεση όλων των παραπάνω ενεργειών, διαπιστώθηκε, ύστερα από έρευνα, πως η χρήση μοντέλων Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (Computational Fluid Dynamics CFD), έχει καταδειχτεί ως η πλέον κατάλληλη μέθοδος για την μοντελοποίηση και την προσομοίωση ασυμπίεστων ροών με ύπαρξη φωτιάς. Στην παρούσα διπλωματική, ο κώδικας ο οποίος χρησιμοποιήθηκε είναι το Fire Dynamics Simulator (FDS). Το FDS πραγματοποιεί προσομοίωση μεγάλης δίνης (Large Eddy Simulation LES), προκειμένου να λύσει τις μερικές διαφορικές εξισώσεις ροής του ρευστού και ο υπολογισμός της τυρβώδους ροής υπολογίζεται από εξισώσεις αναλυτικής μορφής σε μεγάλης κλίμακας χωρία. Ωστόσο, για την πραγματοποίηση του LES απαιτείται η κατασκευή πυκνού πλέγματος, επομένως, αυτή η μέθοδος απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ, η οποία παρέχεται από το υπερ-υπολογιστικό σύστημα (cluster), με την ονομασία ARIS (Advanced Research Information System), του Εθνικού Δικτύου Υποδομών Τεχνολογίας & Έρευνας (Ε.Δ.Υ.Τ.Ε.).

Τέλος, για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων των υπολογιστικών προσομοιώσεων, όσον αφορά την φυσική και την μορφολογία της ροής γύρω από την κυλινδρική δεξαμενή, πραγματοποιήθηκε πείραμα σε υπό κλίμακα γεωμετρία, στο εργαστήριο Ρευστο-Θερμικών Συστημάτων του ΠΑ.Δ.Α..

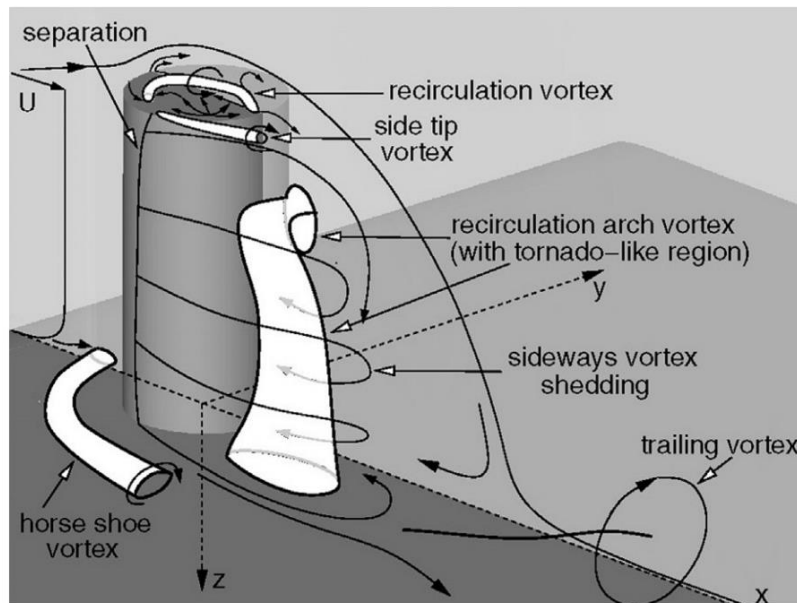
2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Ροή γύρω από κύλινδρο

Οι Palau-Salvador, Stoesser et al. (2009) μελέτησαν την ροή του αέρα γύρω από κύλινδρο πεπερασμένου ύψους σε κατακόρυφη τοποθέτηση. Η συγκεκριμένη απλή διάταξη αποτελεί θεμελιώδες κομμάτι της Μηχανικής Ρευστών, δεδομένου ότι παρουσιάζει πρακτικό ενδιαφέρον, καθώς βρίσκει εφαρμογή σε κυλινδρικά κτήρια, δεξαμενές υγρών καυσίμων, καπνοδόχους ή πύργους ψύξης, που βρίσκονται τοποθετημένα εντός του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος.

Η τρισδιάστατη μελέτη της ροής γύρω από κατακόρυφη κυλινδρική γεωμετρία είναι ιδιαίτερα περιπλοκή, καθώς εμφανίζονται διαφορετικά φυσικά φαινόμενα, σε μια ροή, εξαιρετικά ασταθή, που περιλαμβάνει διαφορετικά συστήματα δινών που αλληλοεπιδρούν. Η περιδίνηση (vortex shedding), που προκαλείται στο πίσω μέρος του κυλίνδρου, είναι από μόνη της πολύ περίπλοκη στη μελέτη ροής, πόσο μάλλον όταν έρχεται σε επαφή με τα φαινόμενα που λαμβάνουν μέρος αριστερά και δεξιά της βάσης του κυλίνδρου, καθώς και στην ελεύθερη άνω επιφάνεια του. Οι παράμετροι, που παίζουν καθοριστικό ρόλο στην περίπτωση της ροής σε κύλινδρο, είναι ο αριθμός Reynolds (Re), που εξάγεται βάσει της διαμέτρου του κυλίνδρου και της εκτιμώμενης ταχύτητας, ο λόγος ύψους- διαμέτρου (h/D) και το σχετικό πάχος του οριακού στρώματος (δ/h).

Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές πειραματικές μελέτες με στόχο τον προσδιορισμό της ροής του αέρα γύρω από την γεωμετρία του κατακόρυφου κυλίνδρου (Agui and Andreopoulos 1992, Sumer, Christiansen et al. 1997, Pattenden, Bressloff et al. 2007, Frederich, Scouten et al. 2009). Εκτός όμως, από τις πειραματικές δοκιμές, η εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων, όπως οι προσομοιώσεις μεγάλων δινών (LES), έχουν γίνει ιδιαίτερα δημοφιλείς, διότι προσεγγίζουν το φυσικό πρόβλημα με μεγάλη ακρίβεια, ενώ στον αντίποδα βρίσκονται πλέον τα στατιστικά μοντέλα τύρβης.



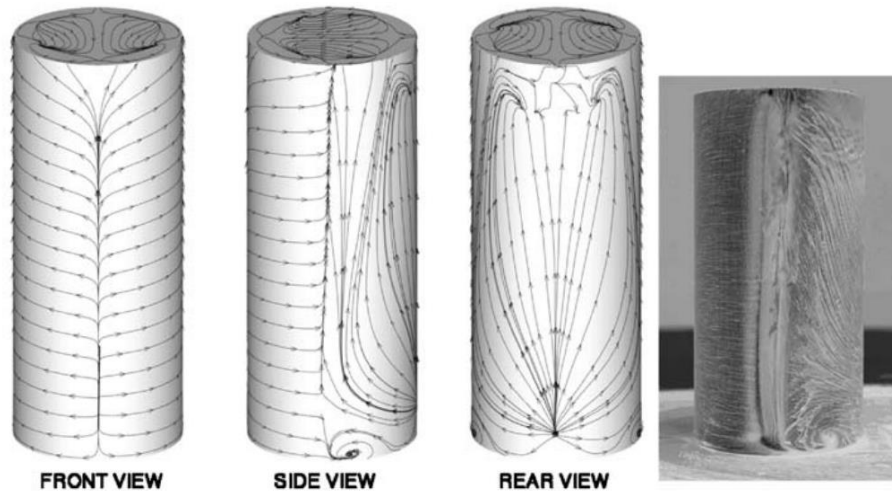
Σχήμα 2-1 Σχηματική αναπαράσταση τοπολογίας μιας μέσης ροής (Frederich et al. 2008).

Εν συνεχεία, από την έρευνα των Palau-Salvador, Stoesser et al. (2009) η ροή που προσεγγίζει το λεπτό οριακό στρώμα πάνω από το έδαφος, που είναι και η βάση του κυλίνδρου, εκτρέπεται προς τα πάνω. Έπειτα, λόγω του ότι η πίεση ανακοπής ανάντη του κυλίνδρου είναι υψηλότερη από αυτή ακριβώς πάνω από το ελεύθερο άκρο του, η ροή ακολουθεί την άνω επιφάνεια του κυλίνδρου, διατηρώντας εν μέρει το ύψος που έχει αποκτήσει από την εκτροπή. Στην περιοχή του κατώτερου οριακού στρώματος, το ρεύμα εκτρέπεται καθοδικά και δημιουργείται η επανομαζόμενη δίνη σε σχήμα πετάλου αλόγου (horse-shoe vortex). Έπειτα, αυτές οι δίνες «τυλίγονται» γύρω από τον κύλινδρο και προεκτείνονται με δύο συμμετρικά σκέλη αριστερά και δεξιά του απόρρου, αλληλοεπιδρώνοντας με αυτόν σε κάποιο βαθμό. Μία πρωτεύουσα και ιδιαίτερα ισχυρή δίνη εξελίσσεται. Παράλληλα με αυτήν, όμως, αναπτύσσονται δευτερογενείς και τριτογενείς δίνες και ο συνδυασμός όλων αυτών γεννά ένα πολύπλοκο σύστημα δινών, που είναι εξαιρετικά ευμετάβλητο (Pattenden, Turnock et al. 2005).

Η ροή που ακολουθεί το ύψος του κυλίνδρου, στη άνω επιφάνεια του, αποκολλάται στην μπροστινή του ακμή, σχηματίζοντας ένα περίπλοκο ρεύμα άνωθεν του ελευθέρου άκρου του. Η συμπεριφορά του ρεύματος είναι άρρηκτα

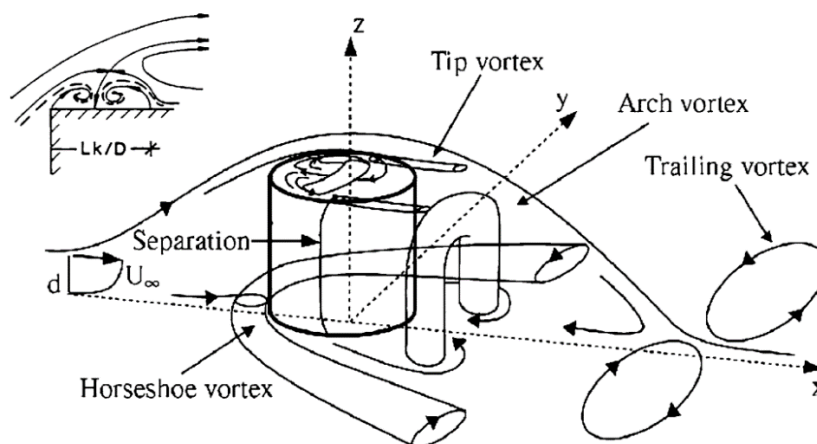
συνδεδεμένη με το αν το σύνολο της εξεταζόμενης γεωμετρίας βρίσκεται στο σύνολο της μέσα στο τυρβώδες οριακό στρώμα, είτε μερικώς και άρα η ροή στην κορυφή του κυλίνδρου παρουσιάζει επανακόλληση ή όχι. Στην πλειοψηφία των μελετών, η ροή επαναπροσκολλάται νωρίτερα από το κατάντη ελεύθερο άκρο, όταν ο κύλινδρος βρίσκεται εξ ολοκλήρου εντός του οριακού στρώματος, έχοντας ως αποτέλεσμα το άνω ελεύθερο ρεύμα να φέρει αναταραχές (Kawamura, Hiwada et al. 1984).

Έρευνες με φιλμ λαδιού (Pattenden, Turnock et al. 2005, Rödiger, Knauss et al. 2008) και διεξοδικές μετρήσεις με την τεχνική PIV (Hain, Kähler et al. 2008), έχουν καταδείξει πως η ανεστραμμένη ροή ανάντη του ελευθέρου άκρου σχηματίζει μια δομή με εστίες στις δύο πλευρές του. Με αυτόν τον τρόπο, εκδηλώνεται η παρουσία των δινών, που αργότερα, αφού καμπυλωθούν κατάλληλα, θα μας δώσουν την τοξωτή δίνη (arch vortex), κατάντη του κυλίνδρου (Σχήμα 2-2). Πλησίον του πίσω τμήματος, όπου η ροή επαναπροσκολλάται στην κορυφή της υπό μελέτης γεωμετρίας, δημιουργείται ένας βαρομετρικός λαιμός (saddle point) στον άξονα συμμετρίας (Roh and Park 2003) και παρατηρήθηκε και σε φωτογραφίες που εφαρμόστηκε η μέθοδος φιλμ λαδιού (Pattenden, Turnock et al. 2005, Rödiger, Knauss et al. 2008). Η απεικόνιση έδειξε ότι, κοντά στο μετωπικό χείλος προσβολής εμφανίζεται ένας ακόμα πιο εκτεταμένος βαρομετρικός λαιμός αξονοσυμμετρικά, όπου η ανεστραμμένη ροή απομακρύνεται ανοδικά από το τοίχιο του ελεύθερου άκρου, ενώ ταυτόχρονα κινείται προς τα έξω.



**Σχήμα 2-2 Ροϊκές γραμμές ροής πλησίον βάσης και τοιχωμάτων κυλίνδρου.
Δεξιά: φωτογραφικό στιγμιότυπο ροής λαδιού (Rödiger, Knauss et al. 2008).**

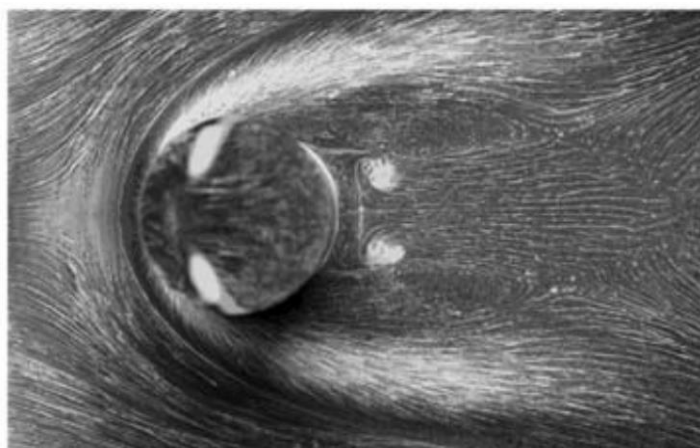
Μια δρεπανόμορφη γραμμή ανακοπής παρατηρήθηκε σε διάφορες μελέτες (Pattenden, Turnock et al. 2005), επομένως επιπρόσθετες μικρότερες δίνες θα πρέπει να υφίστανται κοντά στο μετωπικό χείλος προσβολής. Οι Hölscher and Niemann (1987) προέβλεψαν και σχεδίασαν όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-3, την εξέλιξη των μικρότερων δινών, την ύπαρξη των οποίων επιβεβαίωσαν και οι (Pattenden, Turnock et al. 2005) στις φωτογραφίες δοκιμασίας φιλμ λαδιού, αλλά δεν κατάφεραν να τις διακρίνουν στις μετρήσεις με την τεχνική του PIV. Στις παραπάνω φωτογραφίες διακρίνεται ξεκάθαρα μια εξερχόμενη ροή, κατά μήκος της γραμμής ανακοπής και πλευρικά.



**Σχήμα 2-3 Σχηματική αναπαράσταση ροής σε κύλινδρο χαμηλού ύψους
(Pattenden, Bressloff et al. 2007).**

Στα πλευρικά τοιχία της γεωμετρίας, η ροή αποκολλάται με γωνία $\sim 70^\circ$ - 80° από την έμπροσθεν γραμμή ανακοπής, για αριθμούς $2 \cdot 10^4 < Re < 5 \cdot 10^6$. Η γραμμή αποκόλλησης είναι παράλληλη με τον άξονα συμμετρίας του κυλίνδρου, σχεδόν σε όλο το μήκος του εκπετάσματος, στην συνέχεια όμως καμπυλώνεται χαμηλά στο πίσω τμήμα του κυλίνδρου, αλλά και στην κορυφή του. Όπισθεν του κυλίνδρου, σχηματίζεται ένας απόρρους μεγάλης έκτασης και γενικά, όσο μικρότερος είναι ο λόγος h/D , τόσο πιο έντονα γίνονται τα φαινόμενα στις ακμές της γεωμετρίας. Πιο συγκεκριμένα, λόγω της χαμηλότερης υφιστάμενης πίεσης στο πίσω τμήμα του κυλίνδρου, προκαλείται ένα κατώρρευμα από την κορυφή του, έως ότου προσπέσει στο έδαφος. Εξαιτίας του κατωρρέυματος, η πίεση στην βάση είναι αρκετά υψηλή και άρα και η δύναμη της οπισθέλκουσας ελαττώνεται.

Η αποκόλληση της ροής στον απόρρου είναι ιδιαίτερως ασταθής, με περιδινήσεις στην πλειονότητα των περιπτώσεων. Στο μέσο του πεδίου, κατακόρυφες δίνες υφίστανται κατά μήκος του κυλίνδρου και στις δύο πλευρές του, οι οποίες δίνες καμπυλώνονται έως ότου συνενωθούν πλησίον της κορυφής, διαμορφώνοντας μία ενιαία τοξωτή δίνη (Σχήμα 2-2). Η ύπαρξη τους είναι εμφανής από τα ίχνη που έχουν αφήσει στο πέρασμα τους (Σχήμα 2-3 & Σχήμα 2-4). Στα x - z επίπεδα, το κατώρρευμα παράγει μια ανοδική ανακυκλοφορία κοντά και πίσω του τοιχώματος του κυλίνδρου. Επιπροσθέτως, η ροή που έχει αποκολληθεί απομακρύνεται, όπως διαφαίνεται από στις εικόνες δοκιμασίας φιλμ λαδιού (Rödiger, Knauss et al. 2008), αλλά και από τις μετρήσεις του (Leder 2003).

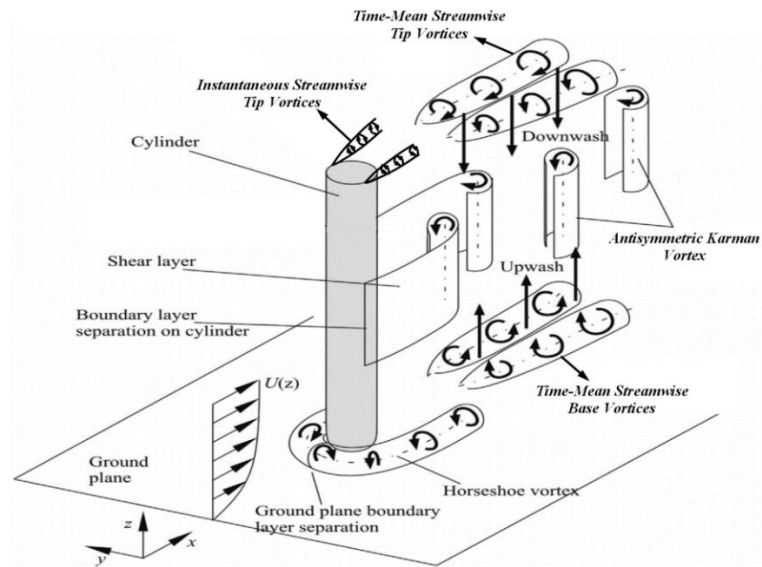


Σχήμα 2-4 Φωτογραφικό στιγμιότυπο ροής λαδιού πάνω σε βάση (Rödiger, Knauss et al. 2008).

Το ανώρρευμα πίσω και πλάγια του κυλίνδρου αποκολλάται στο χείλος του, σχηματίζοντας μια δίνη ακμής (tip vortex). Η δίνη αυτή υπερπηδάει την γωνία του κυλίνδρου, όπως ακριβώς πραγματοποιείται και στις πτέρυγες τύπου Δ. Η φορά της περιστροφής είναι η εξής: καθοδική στο κέντρο και όσο κινούμαστε προς το εξωτερικό του κυλίνδρου, η πορεία μετατρέπεται σε ανοδική. Το γεγονός αυτό συνάδει με την ύπαρξη υψηλής πίεσης πλευρικά και χαμηλότερης στο ελεύθερο άκρο. Αξίζει να σημειωθεί πως, για $Re \gg Re_{cr} = 10^5$ διαπιστώθηκε ότι επικρατεί η αντίστροφη φορά περιστροφής (Hölscher and Niemann 1987). Αυτό δικαιολογείται από το ότι η υπερκρίσιμη ροή αποκολλάται αρκετά αργότερα, έχοντας ως αποτέλεσμα την δημιουργία μιας κατά πολύ μικρότερης περιοχής αποκόλλησης στο πίσω τμήμα του κυλίνδρου. Επομένως, η υποπίεση στην κορυφή και πλάγια της γεωμετρίας είναι ιδιαίτερος ισχυρή. Η πίεση στην παραπάνω ζώνη είναι χαμηλότερη από αυτή στο ελεύθερο άκρο και για αυτό το ρεύμα κινείται αντίστροφα από το κέντρο του κυκλικού δίσκου, στην κορυφή, προς την περιφέρεια του, από ότι θα συνέβαινε εάν επικρατούσε υποκρίσιμη ροή.

Οι δίνες, οι οποίες δημιουργούνται στο σημείο ανακοπής, τείνουν προς τα κάτω λόγω της δυναμικής πίεσης η οποία οφείλεται στην ταχύτητα της αδιατάραχτης ροής. Οι περιστρεφόμενες δίνες από το σημείο ανακοπής λόγω της πτωτικής τους πορεία αλληλοεπιδρούν με τις πεταλοειδής δίνες οι οποίες σχηματίζονται περιμετρικά του κυλίνδρου. Κατά την εξέλιξη της ροής κατάντη του κυλίνδρου αυτές οι περιστρεφόμενες δίνες δεχόμενες την πίεση της αδιατάρακτης ροής οδηγούνται στο κάτω μέρος των πεταλοειδών δινών. Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω δινών οφείλεται για τον σχηματισμό του απορρεύματος κατάντη του κυλίνδρου.

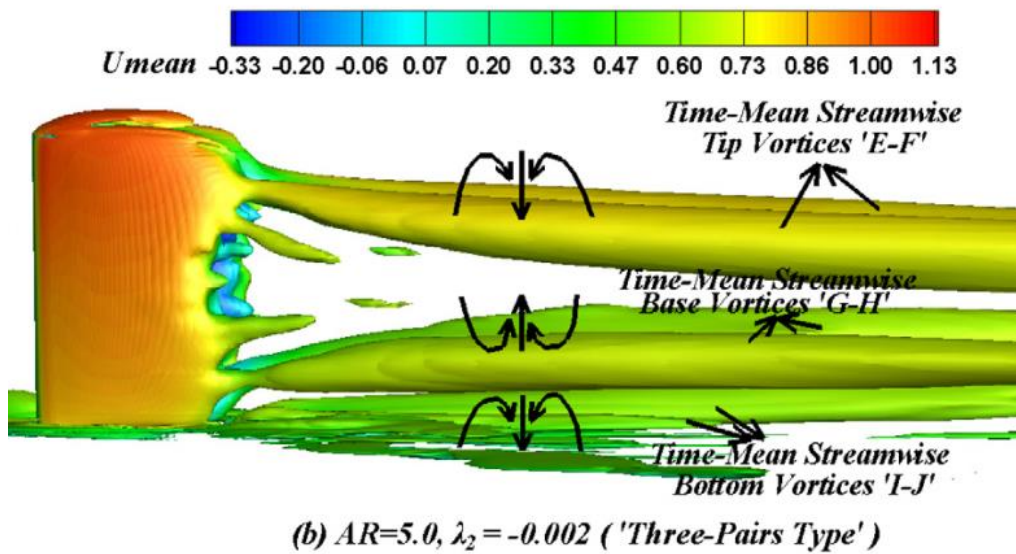
Ύστερα από τον σχηματισμό των δινών στο σημείο ανακοπής στο άνω μέρος του κυλίνδρου, αλληλοεπιδρώνοντας με τις πλαϊνές δίνες αποκόλλησης αποτρέπουν, ουσιαστικά, τις πλαϊνές δίνες λόγω διαφοράς πίεσης να αναπηδήσουν στο πάνω μέρος του κυλίνδρου.



Σχήμα 2-5 Σχηματική αναπαράσταση της ροής γύρω από κύλινδρο για την περίπτωση ψηλού κυλίνδρου (Sumner 2013).

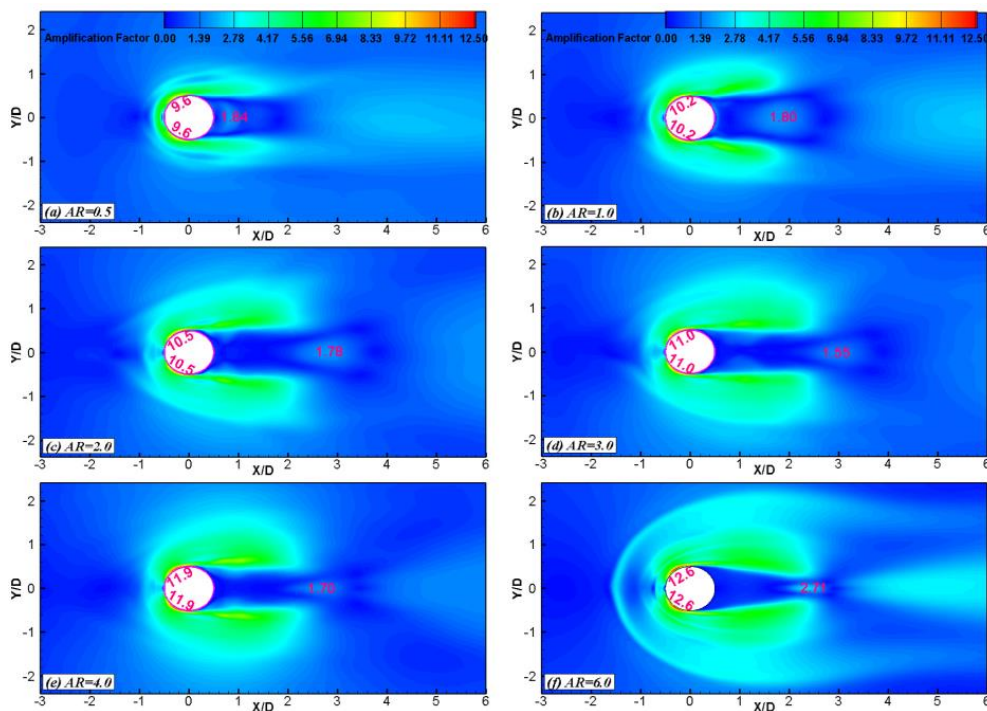
Τέλος, στην μελέτη των Zhang, Cheng et al. (2021) ερευνήθηκε εκτενέστατα η ροή γύρω από κύλινδρο πεπερασμένου ύψους, για σταθερό αριθμό Reynolds $2 \cdot 10^4$, για ένα σχετικά παχύ οριακό στρώμα ($\delta/D=10$) και για 7 διαφορετικούς λόγους ύψους- διαμέτρου ($h/D=0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0$ & 6.0). Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στο κατά πόσο ο λόγος h/D επηρεάζει τα διάφορα χαρακτηριστικά της ροής, όπως τα πεδία των μέσων ταχυτήτων και πίεσης, τις μέσες δίνες ροής, τις μέσες διατμητικές τάσεις στην βάση του κυλίνδρου και, τέλος, τις οριζόντιες περιδινήσεις. Παρακάτω παρουσιάζονται επιγραμματικά τα ευρήματα της μελέτης:

ι. Για $h/D \leq 3$, εμφανίζεται μόνο ένα ζεύγος δινών στο απόρρευμα του άνω ελεύθερου άκρου, που περιστρέφεται αντίθετα η μία δίνη από την άλλη. Για $h/D \geq 5$, εμφανίζεται και ένα άλλο ζεύγος δινών στην βάση του κυλίνδρου και μπορεί να εντοπιστεί στο απόρρευμα του κάτω τμήματος του κυλίνδρου, μέσα στο τυρβώδες οριακό στρώμα (Σχήμα 2-5). Τα παραπάνω ευρήματα επιβεβαιώνονται και από την βιβλιογραφία (Sumner, Heseltine et al. 2004, Adaramola, Akinlade et al. 2006, Sumner and Heseltine 2008). Η πρωτοτυπία της μελέτης αυτής είναι ότι ανακαλύφθηκε για $3 \leq h/D \leq 5$ πώς υπάρχει ένα επιπρόσθετο ζεύγος δινών, κάτω από τις δίνες της βάσης και περιστρεφόμενες αντίστροφα από τις προαναφερόμενες (Σχήμα 2-6).



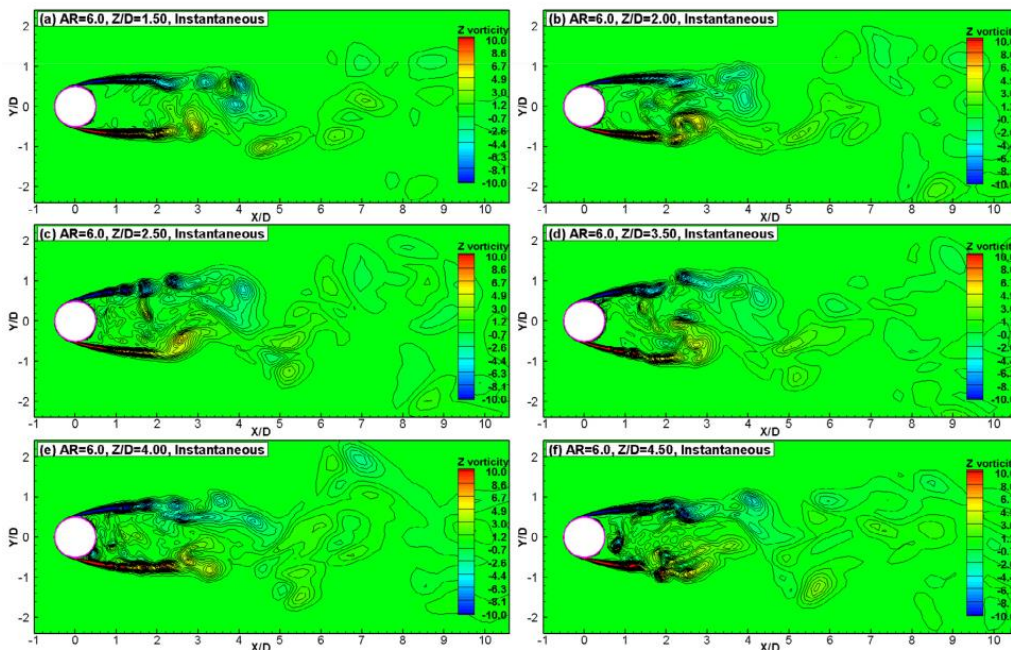
Σχήμα 2-6 Στο κάτω μέρος εμφανίζεται ο τρίτος τύπος δινών για $3 \leq h/D \leq 5$ (Zhang, Cheng et al. 2021).

ii. Με την αύξηση του λόγου h/D , φαίνεται αρχικά να μειώνονται οι διατμητικές τάσεις αξονοσυμμετρικά στο ανώρρευμα του κυλίνδρου, παίρνοντας την ελάχιστη τιμή τους, για $h/D=3$. Για μεγαλύτερους λόγους, φαίνεται να αυξάνεται το μέγεθος των διατμητικών τάσεων (Σχήμα 2-7).



Σχήμα 2-7 Σύγκριση τιμών διατμητικών τάσεων για $h/D=0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 6.0$ (Zhang, Cheng et al. 2021).

iii. Αποδείχθηκε πως ανεξαρτήτως του λόγου h/D , θα εμφανίζονται τα αποκαλούμενα φαινόμενα ελεύθερου άκρου, που έχουν ως συνέπεια την δημιουργία των συμμετρικών δινών, σε απόσταση μίας διαμέτρου D από το πίσω μέρος του κυλίνδρου και για $h/D \leq 2$. Όμως, για $h/D \geq 3$ και όταν πια η ροή παύει να είναι υπό την σφαίρα επιρροής των φαινομένων ελευθέρου άκρου (δηλαδή όταν πλέον έχει ξεπεραστεί η απόσταση της μίας διαμέτρου), κυριαρχούν πλέον οι αντισυμμετρικές δίνες Karman (Σχήμα 2-8). Και πάλι, υπάρχει επιβεβαίωση από την βιβλιογραφία (Sakamoto and Arie 1983, Okamoto and Sunabashiri 1992).



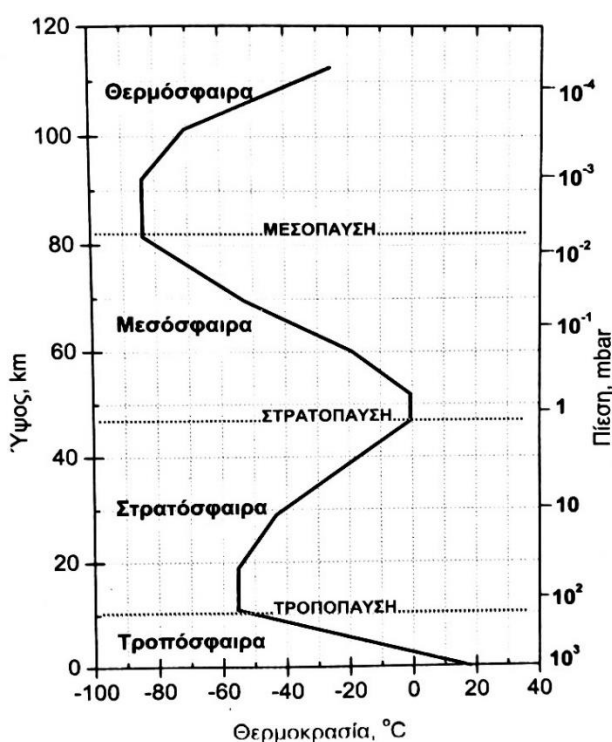
Σχήμα 2-8 Με την αύξηση του λόγου $AR=h/D$, φαίνεται να κυριαρχούν ολοένα και περισσότερο οι δίνες Karman (Zhang, Cheng et al. 2021).

2.2 Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα (ΑΟΣ)

Παρακάτω θα πραγματοποιηθεί μια σύντομη περιγραφή του Ατμοσφαιρικού Οριακού Στρώματος (ΑΟΣ), προκειμένου να γίνει κατανοητό, για την συνέχεια της εργασίας.

Η Γήινη ατμόσφαιρα είναι ένα στρώμα αερίων που περιβάλλει την επιφάνεια του πλανήτη και εκτείνεται σε ύψος περίπου 150km. Παρατηρώντας την μακροσκοπικά, είναι εμφανής η μεταβολή της θερμοκρασίας και της πυκνότητας

με το ύψος, δηλαδή ο αέρας έχει προοδευτικά μικρότερη πυκνότητα, όσο κινούμαστε προς τα επάνω. Η ζώνη που έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια της Γης ονομάζεται τροπόσφαιρα (troposphere), με μέσο ύψος τα ~18km. Η αμέσως επόμενη ζώνη ονομάζεται στρατόσφαιρα (stratosphere) και ξεκινάει στα ~18km ύψος έως τα ~50km, ενώ από τα 50km έως τα ~80km εκτείνεται η μεσόσφαιρα (mesosphere). Φυσικά, από το ύψος των 80km και άνω υφίστανται και άλλες ζώνες της ατμόσφαιρας (θερμόσφαιρα, εξώσφαιρα), αλλά συνήθως οι τρεις προαναφερόμενες ζώνες εμπλέκονται στην μελέτη της διασποράς ρύπων, με κύριες την τροπόσφαιρα και την στρατόσφαιρα.



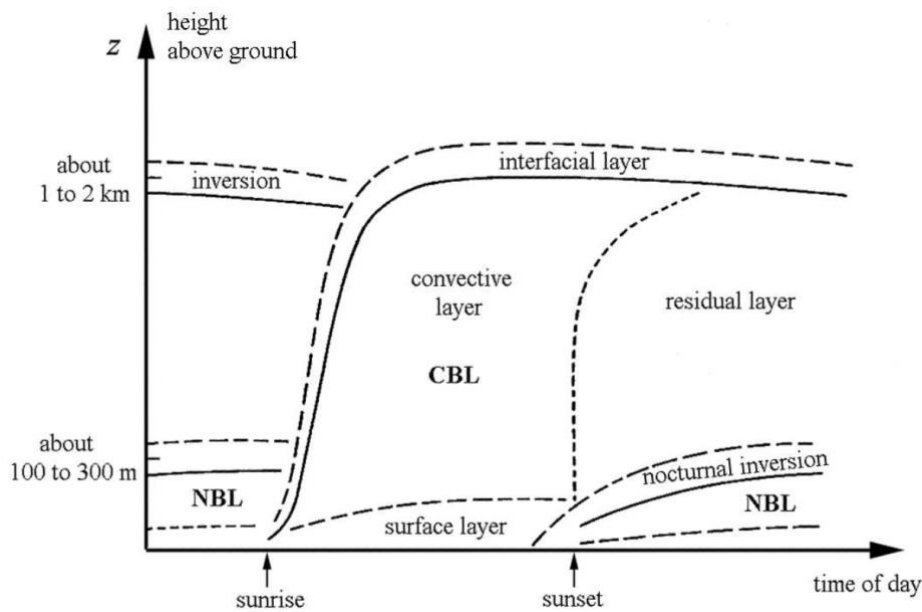
Σχήμα 2-9 Οι ζώνες της ατμόσφαιρας ως προς το ύψος και οι αντίστοιχες επικρατούσες θερμοκρασίες και πιέσεις (Γεντεκάκης 2010).

Μελετώντας την κατανομή θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας κατά ύψος (Σχήμα 2-9), διαφαίνεται, γενικά, η τάση της μείωσης της θερμοκρασίας, όσο απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια του πλανήτη και αυτό παρατηρείται καθ' όλο το ύψος της τροπόσφαιρας. Μετά την τροπόσφαιρα και λόγω της απορρόφησης της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας, παρατηρείται σταδιακή αναστροφή της τάσης αυτής, με αποτέλεσμα αρχικά να καταγράφεται σταθεροποίηση της κατανομής της θερμοκρασίας με το ύψος (στρατόσφαιρα) και

στη συνέχεια να παρατηρούνται αυξημένες θερμοκρασίες (άνω της μεσόσφαιρας).

Η δομή της τροπόσφαιρας, η οποία αποτελείται από θερμό αέρα στον πυθμένα της και ψυχρότερο στο πάνω τμήμα της, προωθεί την κατακόρυφη αστάθεια, δηλαδή την κίνηση αέριων μαζών από κάτω προς τα πάνω και αντιθέτως. Αποτέλεσμα αυτού του φαινομένου είναι η τροπόσφαιρα να χαρακτηρίζεται από έντονες τάσεις κάθετης αναμιξιμότητας των αέριων μαζών. Υπό ορισμένες συνθήκες η συνήθης θερμοκρασιακή κατανομή της τροπόσφαιρας, ιδιαίτερα πλησίον του εδάφους, αλλοιώνεται με τελικό αποτέλεσμα στις ειδικές αυτές μετεωρολογικές συνθήκες, η θερμοκρασία να αυξάνεται με το ύψος. Σε αυτήν την κατάσταση, η οποία ονομάζεται θερμοκρασιακή αναστροφή, εμποδίζεται η κατακόρυφη ανάμιξη, δεδομένου ότι πάνω από ένα υψόμετρο, η θερμοκρασία αυξάνεται. Οι θερμοκρασιακές αναστροφές είναι μεγάλης σημασίας στη διαχείριση του περιβάλλοντος, δεδομένου ότι εμποδίζουν την κατακόρυφη διάχυση των ρυπαντών (Γεντεκάκης 2010).

Το σημείο ενδιαφέροντος μας επικεντρώνεται στο κατώτερο τμήμα της τροπόσφαιρας που ονομάζεται Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα (ΑΟΣ) και το οποίο εκτείνεται από την επιφάνεια της Γης έως το ύψος του 1km~1,5km. Το κατώτατο μέρος αυτού, που καταλαμβάνει το 10% της τροπόσφαιρας, λέγεται επιφανειακό στρώμα (surface layer). Η θερμοκρασία αέρος του ΑΟΣ μειώνεται με την αύξηση του υψομέτρου, έως ότου προσεγγίσει την επονομαζόμενη ζώνη θερμοκρασιακής αναστροφής (inversion layer), όπου συντελείται αύξηση της θερμοκρασίας με την αύξηση του υψομέτρου. Η ζώνη θερμοκρασιακής αναστροφής αποτελεί το άνω άκρο του ΑΟΣ και το ύψος του (1km~2km) διαφέρει ανάλογα με τις διάφορες ατμοσφαιρικές και περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν, καθώς και από την τοπογραφία (Longo 2016).



Σχήμα 2-10 Τυπική απεικόνιση της δομής του ΑΟΣ, κατά την διάρκεια της μέρας σε ξηρά και σε συνθήκες καθαρού ουρανού (Garratt 1994).

Η τύρβη χαρακτηρίζει το ΑΟΣ, επιτρέποντας του να είναι ευμετάβλητο σε αλλαγές του ανάγλυφου του πλανήτη, με συνέπεια ο άνεμος να κινείται από τις υψηλές στις χαμηλές πιέσεις. Αυτή η προκαλούμενη σπειροειδής κίνηση από κάποιο ύψος και ύστερα παύει να υφίσταται, με αυτό να αποτελεί το μέγιστο ύψος του ΑΟΣ (Garratt 1994). Στο στρώμα ανάμειξης (convective layer) (Σχήμα 2-10) συντελείται μεταφοράς θερμότητας από τον ήλιο (ανοδικές κινήσεις θερμού αέρα) ή από τη βάση των νεφών (καθοδικές κινήσεις ψυχρών αέριων μαζών) προς την επιφάνεια της Γης. Κατά την πρώτη περίπτωση, συντελούνται έντονα φαινόμενα κατακόρυφης ανάμειξης του αέρα, γεγονός που συμβάλλει στις αυξημένες τιμές συγκεντρώσεων ρύπων εντός του στρώματος ανάμειξης (Kaimal and Finnigan 1994). Το μέγιστο ύψος του στρώματος ανάμειξης παρατηρείται μισή ώρα μετά τη δύση του ήλιου.

Το εναπομείναν στρώμα (residual layer) (Σχήμα 2-10), το οποίο διαδέχεται χρονικά το στρώμα ανάμειξης, χαρακτηρίζεται από στρωτή ροή και καλή αναμιξιμότητα, με περίπου μηδενική μεταβολή στις πρωτιότερες συγκεντρώσεις ρύπων. Οι εκλυόμενοι ρύποι κατά την διάρκεια της νύχτας τείνουν να μην διαχέονται κατακόρυφα (fanning), διότι το κατώτατο στρώμα του εναπομείναντος,

επειδή έρχεται σε επαφή με το έδαφος, παρουσιάζει πολύ χαμηλές ταχύτητες αέρα (Λαζαρίδης 2005).

2.3 Βιομηχανικά Ατυχήματα Φωτιάς σε Δεξαμενές Αποθήκευσης Καυσίμων

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα μελετηθεί η ροή γύρω από δεξαμενή υγρού καυσίμου, καθώς και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την πρόκληση ατυχήματος λίμνης φωτιάς πάνω σε δεξαμενή.

Οι δεξαμενές καυσίμων συχνά χρησιμοποιούνται, είτε για την βραχυχρόνια είτε για την μακροχρόνια αποθήκευση μεγάλων όγκων εύφλεκτων χημικών σε πετρελαιοβιομηχανίες και χημικές εγκαταστάσεις. Ο πιο κοινός τύπος ατυχήματος που συναντάται στις χημικές βιομηχανίες είναι η πρόκληση φωτιάς (Miao, Wenhua et al. 2014). Τέτοιου είδους βιομηχανίες έχουν να κάνουν με την παραγωγή, μεταφορά και/ή την αποθήκευση εύφλεκτων ουσιών. Όταν, λοιπόν, συμβαίνει μια φωτιά σε δεξαμενή, ο αντίκτυπος είναι πάντα αρνητικός και από οικονομική άποψη (Chang and Lin 2006), αλλά και από κοινωνική (Rodante 2005). Κατά την διάρκεια των τελευταίων ετών, τέτοιου είδους ατυχήματα λαμβάνουν χώρα και οι λόγοι για τους οποίους προκαλούνται, επαναλαμβάνονται συνεχώς, εγείροντας την ανησυχία τόσο στις εταιρείες του κλάδου, αλλά και στους άμεσα επηρεαζόμενους πολίτες.

Η έρευνα των Zheng and Chen (2011) κατέδειξε πως το 76% των ατυχημάτων σχετιζόταν με αργό πετρέλαιο, υγροποιημένο αέριο πετρελαίου, βενζίνη, ντίζελ, ενώσεις βενζολίου (βενζόλιο, τολουόλιο, νιτροβενζόλιο κλπ.) και αλκοόλες (αιθανόλη, μεθανόλη κλπ.). Τα μισά, όμως, ατυχήματα είχαν να κάνουν μόνο με αργό πετρέλαιο και λοιπά προϊόντα πετρελαίου και για αυτό τον λόγο στην παρούσα διπλωματική ως υλικό καύσης θα χρησιμοποιηθεί το αργό πετρέλαιο.

Σε συνέχεια της παραπάνω έρευνας, εξήχθη πως ο συνηθέστερος τόπος που λαμβάνουν χώρα συμβάντα ατυχημάτων με υδρογονάνθρακες είναι σε πετροχημικές εγκαταστάσεις (30%), σε διυλιστήρια πετρελαίου (22%), σε χώρους αποθήκευσης πετρελαίου (12%), σε σταθμούς διανομής υγρών και αέριων καυσίμων (6%), καθώς και σε άλλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις, όπως

οινοποιεία, στην παραγωγή λιπασμάτων κλπ. (24%). Επομένως, το 64% των περιστατικών συνέβησαν σε χώρους επεξεργασίας, διύλισης και αποθήκευσης πετρελαίου, δίνοντας έμφαση στην αποθήκευση στην προκείμενη περίπτωση μελέτης.

Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, τα ατυχήματα αυτά συσχετίζονται με την ύπαρξη άλλων ατυχημάτων, όπως πυρκαγιάς ή έκρηξης πλησίον της δεξαμενής, που οδηγούν με την σειρά τους σε περαιτέρω πυρκαγιές ή/και εκρήξεις (Wiff 2006). Οι εργασίες που συντελούνται, επίσης, συνδέονται άμεσα με την πρόκληση συμβάντος. Τέτοιες μπορεί να είναι εργασίες συντήρησης, επισκευών, αλλά και κατά την επεξεργασία της ίδιας της χημικής ουσίας, καθώς και της μεταφοράς της μέσα στις εγκαταστάσεις ή εκτός και αποθήκευσής της (Gunasekera and de Alwis 2008). Το 40% οφείλεται σε λάθος χειρισμό και το 18% σε ελαττωματικό σχεδιασμό. Ακολουθούν οι εσφαλμένες/ελλιπείς διεργασίες συντήρησης, αστοχία εκμεταλλεόμενου εξοπλισμού, διάρρηξη δεξαμενών ή δικτύου κλπ. Θα πρέπει σε αυτό το σημείο να σημειωθεί πως η πρόκληση φωτιάς είναι συνήθως συνδυασμός δύο ή τριών αιτιών (Khan and Abbasi 1999).

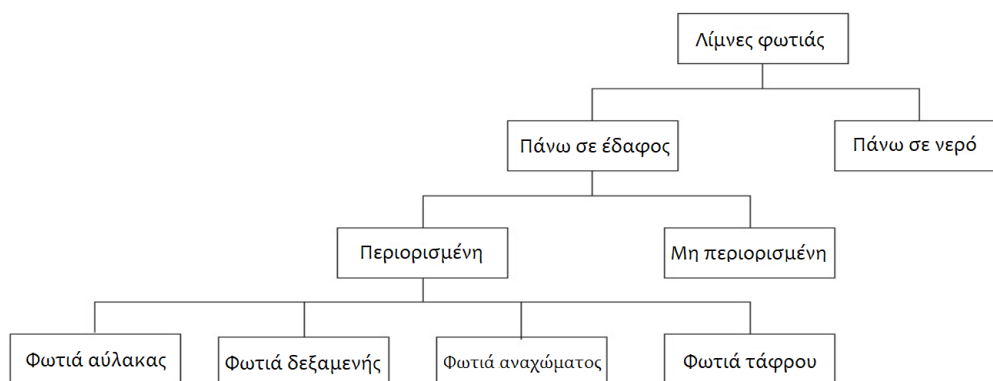
Η έρευνα των Zheng and Chen (2011) καταλήγει σε έξι λόγους ανάφλεξης:

- ανοιχτή φωτιά,
- αυτανάφλεξη,
- ηλεκτρικοί σπινθήρες,
- κεραυνοί,
- στατικός ηλεκτρισμός και
- επαφή με ιδιαίτερος θερμαινόμενη επιφάνεια (Woodward and Lygate 2002).

Βάσει της έρευνας των Abbasi and Abbasi (2007) έγινε γνωστό πως η πλειοψηφία των ατυχημάτων που λαμβάνουν χώρα στις χημικές βιομηχανίες περιλαμβάνουν λίμνες φωτιάς. Διάφορα είδη φωτιών δύνανται να προκληθούν, όπως ο φλογοπίδακας ή γλώσσα φωτιάς (jet fire), η στιγμιαία ανάφλεξη (flash fire), πύρινη σφαίρα (fire ball) και η λίμνη φωτιάς (pool fire), με την λίμνη φωτιάς να αποτελεί την πιο συχνά εμφανιζόμενη αιτία φωτιάς (~60%). Οι λίμνες φωτιάς συνήθως προκαλούν εκρήξεις, οι οποίες με την σειρά τους προκαλούν εκ νέου

λίμνες φωτιάς. Οι λίμνες φωτιάς μπορούν να είναι πολύ μεγάλες σε μέγεθος και δύσκολες στην κατάσβεση (Abbasi, Pasma et al. 2010).

Μια λίμνη φωτιάς μπορεί να προκληθεί όταν ένα εύφλεκτο υγρό απελευθερώνεται εσφαλμένα πάνω στο έδαφος ή στο νερό και αναφλέγεται. Πάνω στην λίμνη σχηματίζεται μια τυρβώδης φλόγα, η οποία δεν έχει προαναμιχθεί και η πορεία της εξαρτάται από την πλευστότητά της. Αυτό που κάνει την λίμνη φωτιάς να διαφέρει από τα υπόλοιπα είδη φωτιάς είναι η πολύ μικρή αρχική ορμή της, καθώς και η τάση της να επηρεάζεται εντόνως από τις επιδράσεις της άνωσης. Οι λίμνες φωτιάς κατηγοριοποιούνται βάσει του μέσου στο οποίο σχηματίζονται, τη παρουσία ή απουσία περιορισμού της φωτιάς και το είδος του χώρου στον οποίο λαμβάνει χώρα η φωτιά (Σχήμα 2-11).



Σχήμα 2-11 Ταξινόμηση λιμνών φωτιάς (Miao, Wenhua et al. 2014).

2.4 Δεξαμενές Καυσίμων

Σε ένα διυλιστήριο αργού πετρελαίου οι πρώτες ύλες, καθώς και τα παραγόμενα προϊόντα, αποθηκεύονται σε δεξαμενές. Υφίστανται διάφορα είδη δεξαμενών. Κάθε είδος εξυπηρετεί και τις διαφορετικές ανάγκες αποθήκευσης της εκάστοτε χημικής ουσίας (Riezel 2002). Οι δεξαμενές αυτές εξυπηρετούν πολλούς σκοπούς:

- i. Εξασφαλίζουν την απρόσκοπτη τροφοδοσία των μονάδων επεξεργασίας με πρώτη ύλη (αργό πετρέλαιο στην περίπτωση που μελετάται).
- ii. Χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τελικών προϊόντων με την ανάμιξη δύο ή περισσότερων ημιτελών προϊόντων.

- iii. Χρησιμοποιούνται ως ενδιάμεσες δεξαμενές για την τροφοδοσία ημιτελών προϊόντων από μία μονάδα σε επόμενη μονάδα για περαιτέρω επεξεργασία.

Βάσει της χρήσης τους, οι δεξαμενές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε:

- Δεξαμενές πρώτων υλών
- Ενδιάμεσες δεξαμενές
- Δεξαμενές ανάμιξης
- Δεξαμενές τελικών προϊόντων

Βάσει, όμως, της κατασκευής τους, υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι δεξαμενών:

- Ατμοσφαιρικές δεξαμενές, οι οποίες είναι σχεδιασμένες να λειτουργούν σε τιμές πλησίον ατμοσφαιρικής πίεσης. Χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση υγρών, τα οποία έχουν τάση ατμών $>90\text{kPa}$. Στην κατηγορία αυτή υγρών κατατάσσονται τα περισσότερα προϊόντα διυλιστηρίου, όπως βενζίνη, κηροζίνη, αργό πετρέλαιο και μαζούτ (Nugroho, Haryadi et al. 2016). Σε αυτήν την κατηγορία θα εστιάσουμε στην συνέχεια, καθώς είναι αυτή που θα μελετηθεί και στην παρούσα εργασία.
- Δεξαμενές πίεσης, οι οποίες είναι σχεδιασμένες να λειτουργούν σε πίεση $<17\text{kPa}$. Χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση υγρών, τα οποία δεν μπορούν να αποθηκευτούν σε ατμοσφαιρικές δεξαμενές. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα ελαφριά προϊόντα του διυλιστηρίου, όπως το προπάνιο, το βουτάνιο και το μίγμα προπάνιου/βουτανίου (LPG).
- Ψυχόμενες δεξαμενές, οι οποίες είναι σχεδιασμένες να λειτουργούν σε θερμοκρασίες μικρότερες από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση υγρών, για τα οποία, υπό κανονικές συνθήκες, θα απαιτούνταν αποθήκευση σε δεξαμενές πίεσης, αλλά δεν υπήρχε η οικονομική δυνατότητα κατασκευής πιεστικών δεξαμενών.

2.4.1 Κατηγοριοποίηση Δεξαμενών

Όπως προαναφέρθηκε, οι δεξαμενές που είναι εκτεθειμένες σε ατμοσφαιρικές συνθήκες αποτελούν την πλειονότητα των δεξαμενών σε ένα διυλιστήριο. Οι δεξαμενές αυτές διακρίνονται σε τρεις υποκατηγορίες, ανάλογα με την κατασκευή τους (Argyropoulos, Christolis et al. 2012).

2.4.1.1 Δεξαμενές Σταθερής Οροφής (Fixed Roof Tanks)

Αυτός ο τύπος δεξαμενής έχει σταθερή οροφή υπό την μορφή κώνου. Χρησιμοποιούνται κυρίως για υγρά όπως κηροζίνη, γκαζόιλ, μαζούτ, κατάλοιπα, που έχουν χαμηλή πτητικότητα και δεν εξατμίζονται εύκολα (Poukeramat, Daneshmehr et al. 2021). Η σύνδεση των δεξαμενών αυτών με την ατμόσφαιρα επιτυγχάνεται μέσω βαλβίδων αναπνοής. Όταν το αποθηκευμένο προϊόν χαρακτηρίζεται από υψηλό ιξώδες (κατάλοιπα, άσφαλτος), τότε οι δεξαμενές μονώνονται εξωτερικά, για να διατηρηθεί ζεστό το προϊόν. Η χωρητικότητά τους δύναται να φτάσει έως τα 50.000m³ και αποτελούνται από μία βάση, ένα κέλυφος και μία οροφή, η οποία είναι ηλεκτροσυγκολλημένη στην άνω ακμή του κελύφους. Πάνω σε όλες τις προαναφερόμενες επιφάνειες τοποθετείται βοηθητικός εξοπλισμός, απαραίτητος για την λειτουργία και την συντήρηση, όπως εξαρτήματα πυροπροστασίας, ένδειξη θερμοκρασίας και γειώσεις.

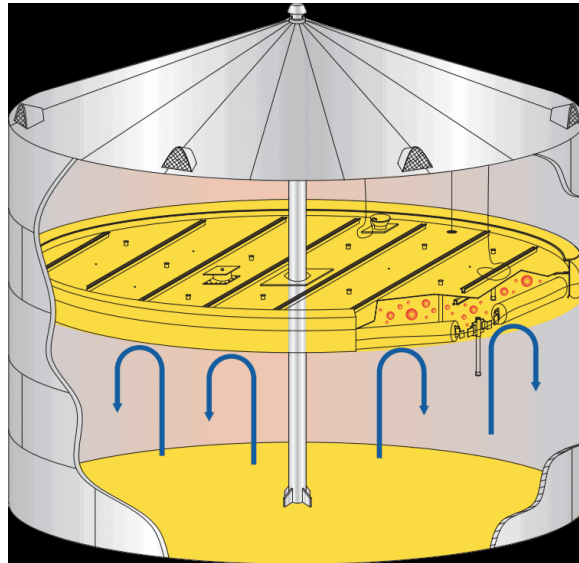


Σχήμα 2-12 Δεξαμενές Σταθερής Οροφής (Engineering).

2.4.1.2 Δεξαμενές Πλωτής Οροφής (Floating Roof Tanks)

Σε αυτόν τον τύπο δεξαμενής η οροφή επιπλέει πάνω στην επιφάνεια του υγρού, ακολουθώντας την πορεία της στάθμης του υγρού και έχοντας ως αποτέλεσμα την αμείωση του ύψους της οροφής. Το κύριο πλεονέκτημα των δεξαμενών αυτών είναι ότι δεν υπάρχει αέρια φάση μεταξύ του υγρού και της οροφής, με αποτέλεσμα να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες υδρογονανθράκων. Για τον λόγο αυτό, λοιπόν, χρησιμοποιούνται οι δεξαμενές αυτού του τύπου για την

αποθήκευση ελαφρών προϊόντων, όπως νάφθα, βενζίνη και κηροζίνη (Rodante 2005).



Σχήμα 2-13 Δεξαμενή Πλωτής Οροφής (MTR (Thailand) Co. 2022).

2.4.1.3 Δεξαμενές Ανοιχτής Οροφής (Open Top Tanks)

Σε αυτό το τύπο δεξαμενής δεν υπάρχει οροφή και γίνεται χρήση μόνο για αποθήκευση νερού (Holroyd 1983).



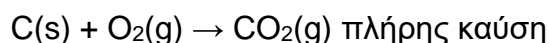
Σχήμα 2-14 Δεξαμενή Ανοιχτής Οροφής (Water Storage Tanks).

Για λόγους απλοποίησης της γεωμετρίας, θα μελετηθεί μια δεξαμενή ανοιχτής οροφής, παρόλο που είναι σπάνια η χρήση της.

2.5 Βασικές έννοιες για καύση, φωτιά και καύσιμα

Η καύσιμη ύλη που επιλέχθηκε να μελετηθεί στην εργασία είναι το αργό πετρέλαιο (crude oil). Αμέσως μετά την εξόρυξή και την μεταφορά του, είναι απαραίτητη η αποθήκευση του σε κατάλληλα σχεδιασμένες δεξαμενές για κάποιο χρονικό διάστημα, προτού διυλιστεί. Αυτό έχει πολύ συχνά ως αποτέλεσμα, κατά την διάρκεια της φύλαξης του, την εμπλοκή του παραπάνω καυσίμου σε διάφορα ατυχήματα, όπως φωτιάς (Mihailidou, Antoniadis et al. 2012).

Η καύση είναι μια αντίδραση οξειδωσης, συνήθως ταχύτατη και η πραγματοποίησή της παράγει φως και θερμότητα. Οι αντιδράσεις καύσης είναι εξώθερμες, κατά τις οποίες ενέργεια απελευθερώνεται στο περιβάλλον. Η καύση μιας ανόργανης ή οργανικής ουσίας είναι η αντίδρασή της με το οξυγόνο. Κατά την καύση του άνθρακα, σχηματίζεται διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) αν η καύση είναι στοιχειομετρική ή με περίσσεια αέρα, ενώ αν είναι ατελής σχηματίζεται μονοξείδιο του άνθρακα (CO):



Τα καύσιμα είναι ουσίες που, όταν καίγονται, αποδίδουν σημαντικά και εκμεταλλεύσιμα ποσά θερμότητας. Τα καύσιμα που παίρνουμε έτοιμα από τη φύση λέγονται φυσικά, ενώ αυτά που παρασκευάζονται με κατάλληλες διεργασίες από φυσικές πρώτες ύλες ονομάζονται τεχνητά. Οι κυριότερες πηγές καυσίμων στη φύση είναι ο γαιάνθρακας (στερεό καύσιμο), το αργό πετρέλαιο (υγρό καύσιμο) και το φυσικό αέριο (αέριο καύσιμο). Και τα τρία αυτά υλικά προέρχονται από φυτικούς και ζωικούς οργανισμούς, με κυριότερη πρωτογενής πηγή, όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας, να παραμένει ακόμη το πετρέλαιο (Τριανταφυλλίδης 2009).

2.5.1 Σύσταση και ιδιότητες αργού πετρελαίου

Η εξόρυξη του αργού πετρελαίου γίνεται με άντληση μέσω γεωτρήσεων. Η διαδικασία άντλησης από το υπέδαφος στην ξηρά είναι σχετικά πιο εύκολη σε σχέση με αυτήν από τον υποθαλάσσιο χώρο. Στην τελευταία περίπτωση

απαιτούνται ειδικές μεγάλες εξέδρες. Στην Ελλάδα, μικρής κλίμακας εκμετάλλευση πετρελαϊκών κοιτασμάτων γίνονται στην περιοχή της Θάσου (Κιτσόπουλος, Γιαννούλης et al. 2004). Το αργό πετρέλαιο περιέχει νερό και αέρια, τα οποία απομακρύνονται με κατάλληλες μεθόδους πριν μεταφερθεί με δεξαμενόπλοια ή αγωγούς μεταφοράς και τελικά αποθηκεύεται. Στην συνέχεια, υφίσταται μια σειρά από φυσικές και χημικές διεργασίες, οι οποίες είναι γνωστές ως διύλιση του πετρελαίου.

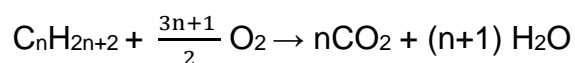
Ο «μαύρος χρυσός», όπως αποκαλείται, είναι ένα ανομοιογενές μίγμα υδρογονανθράκων και η σύστασή του σε άνθρακα (C) και υδρογόνο (H) κυμαίνεται μεταξύ 83-87 % κ.β. και 10-14 % κ.β., αντίστοιχα. Οι κυριότερες οργανικές ενώσεις του αργού πετρελαίου είναι οι παραφινικοί, ναφθενικοί και αρωματικοί υδρογονάνθρακες, καθώς και ασφαλικές ενώσεις, που δεν αποστάζουν. Επίσης, περιέχει σε χαμηλές συγκεντρώσεις θείο (0-5%), άζωτο (0-1%), οξυγόνο (0-2%), και μέταλλα (0-0,1%), κυρίως σίδηρο, νικέλιο, χρώμιο και βανάδιο (Scherzer 1989). Τα πετρέλαια που είναι πλούσια σε θείο παρουσιάζουν ιδιαίτερα προβλήματα κατά την επεξεργασία και την αξιοποίησή τους, όπως είναι η διάβρωση των μεταλλικών επιφανειών, οι οσμές, η χαμηλή απόδοση και οι εκπομπές οξειδίων του θείου.

Η σύσταση του αργού πετρελαίου και οι ιδιότητές του εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την περιοχή από την οποία προέρχεται το κοίτασμα. Σημειώνεται ότι, παρά τις μικρές ποσότητες του θείου και του αζώτου, η παρουσία τους προκαλεί τα γνωστά περιβαλλοντικά προβλήματα με τις εκπομπές οξειδίων θείου και αζώτου. Το αργό πετρέλαιο παρουσιάζει μεγάλες διαφορές σε όλες τις φυσικές ιδιότητές του, εξαιτίας της έντονης διαφοροποίησής της σύστασής του. Το χρώμα του μπορεί να είναι μαύρο, πράσινο ή φαιοκίτρινο. Η πυκνότητά του και το ιξώδες ποικίλλουν αρκετά και είναι αδιάλυτο στο νερό. Το σημείο ζέσεως των διαφόρων συστατικών του πετρελαίου κυμαίνεται από -160°C μέχρι 540°C.

Οι κυριότερες οργανικές ενώσεις στο αργό πετρέλαιο ανήκουν στις παραφινικές, τις ολεφινικές, τις ναφθενικές και τις αρωματικές σειρές υδρογονανθράκων και περιέχουν συνήθως από πέντε μέχρι είκοσι άτομα άνθρακα. Οι παραφίνες συγκεντρώνονται κυρίως στα χαμηλού σημείου ζέσεως κλάσματα, οι ναφθενικές

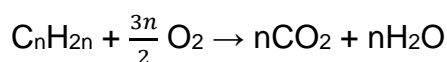
και οι μονοαρωματικές ενώσεις στα μέσου σημείου ζέσεως κλάσματα, ενώ τα πολυαρωματικά μόνο στα βαριά κλάσματα.

Οι παραφίνες ή αλκάνια (C_nH_{2n+2}) είναι κορεσμένοι υδρογονάνθρακες και χαρακτηρίζονται από σταθερότητα. Το όνομα κάθε μέλους της ομάδας αυτής των υδρογονανθράκων έχει κατάληξη –ανιο, όπως το αιθάνιο και το εξάνιο (Σχήμα 2-15α&β). Υπάρχουν κανονικές και διακλαδισμένες παραφίνες, όπως το 2-2 διμέθυλοβουτάνιο. Οι παραφίνες με $n < 5$ βρίσκονται σε αέρια κατάσταση σε συνθήκες περιβάλλοντος, ενώ οι παραφίνες με $n > 15$ είναι ιξώδη (κηρώδη) υγρά. Παραφίνες υπάρχουν σε κάθε αργό πετρέλαιο, αν και έχει αναφερθεί αργό πετρέλαιο από το Οχάιο (Η.Π.Α.) που δεν περιέχει καθόλου παραφινικά συστατικά (Magee and Mitchell Jr 1993). Τα αλκάνια αντιδρούν με περίσσεια οξυγόνου (αντίδραση καύσης) προς διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Για την έναρξη της αντίδρασης απαιτείται σπινθήρας που ενεργοποιεί την αντίδραση. Κατά την καύση μετατρέπεται η χημική ενέργεια του καυσίμου σε θερμική. Γενική αντίδραση καύσης:



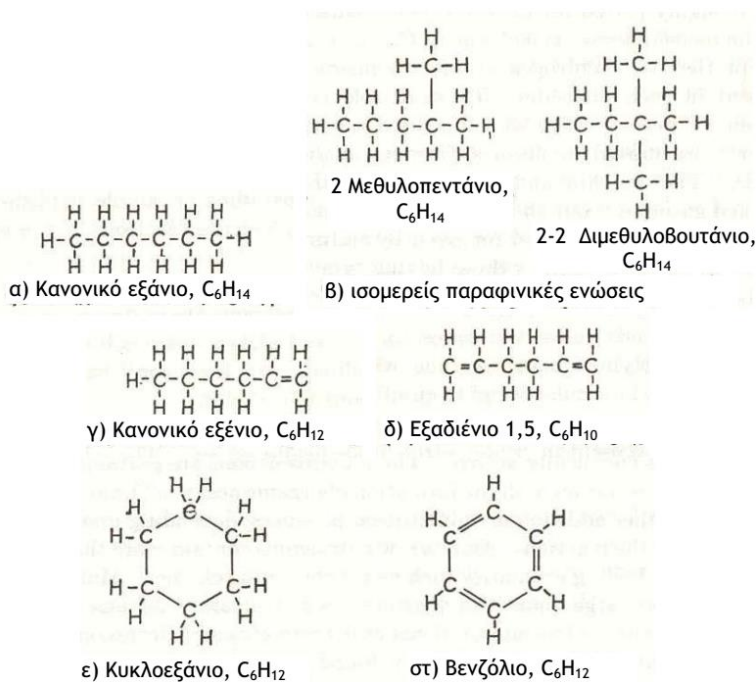
Στην περίπτωση που η ποσότητα οξυγόνου δεν είναι επαρκής (ατελής καύση), εκτός του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και του νερού (H_2O), σχηματίζονται και άλλα προϊόντα, όπως μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και αιθάλη (C).

Οι ολεφίνες ή αλκένια (C_nH_{2n}) αποτελούν ακόρεστους υδρογονάνθρακες που μπορούν να ενωθούν με άλλα στοιχεία ή ομάδες (Cl , Br , κ.α.). Το όνομα κάθε μέλους της ομάδας αυτής καταλήγει σε –ένιο, όπως αιθυλένιο και εξένιο (Σχήμα 2-15γ&δ). Οι ολεφίνες αντιδρούν και διαλύονται στο θειικό οξύ και έτσι μπορούν να απομακρυνθούν από άλλους υδρογονάνθρακες. Οι ελαφρότερες ολεφίνες δεν απαντώνται στο πετρέλαιο, αλλά βρίσκονται στα προϊόντα πυρόλυσης (Meyers 2004). Τα αλκένια όταν καίγονται πλήρως δίνουν CO_2 και H_2O κατά τη γενική αντίδραση:



Οι ναφθενικές ενώσεις (C_nH_{2n}), αν και έχουν τον ίδιο χημικό τύπο με τις ολεφίνες, είναι κυκλικές, κορεσμένες ενώσεις. Στην ονομασία προηγείται το πρόθεμα κύκλο- (κυκλοβουτάνιο, κυκλοπεντάνιο, κυκλοεξάνιο) (Σχήμα 2-15ε). Τα ναφθένια βρίσκονται σχεδόν σε όλα τα είδη πετρελαίου.

Οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες (C_nH_{2n-6}) είναι ακόρεστοι κυκλικοί υδρογονάνθρακες που αποτελούνται από έναν ή περισσότερους βενζολικούς δακτυλίους και τυπικά αποτελούν παράγωγα του βενζολίου (C_6H_6) (Σχήμα 2-15στ). Έχουν χαρακτηριστικό άρωμα και πολλές από αυτές τις ενώσεις έχουν χαρακτηριστεί καρκινογόνες. Οι υδρογονάνθρακες αυτοί είναι ιδιαίτερα επιδεκτικοί στην οξειδωση και παραγωγή οργανικών οξέων. Μερικά πετρέλαια, όπως της Σουμάτρας, είναι πλούσια σε αρωματικά συστατικά (Venuto and Habib 1979).



Σχήμα 2-15 Χημικοί τύποι υδρογονανθράκων (Ανδρίτσος 2008).

Το αργό πετρέλαιο ταξινομείται με διάφορους τρόπους. Ο πλέον συνήθης τρόπος αφορά στην ταξινόμησή του σε σχέση με την πυκνότητά του σε μια ορισμένη θερμοκρασία στην κλίμακα $^{\circ}API$, η οποία ορίζεται ως:

$$^{\circ}API = 141,5/\rho - 131,5 \quad (2-1)$$

όπου ρ είναι το ειδικό βάρος του πετρελαίου στους 15,6°C. Έτσι, API=10 αντιστοιχεί σε $\rho=1\text{g/ml}$, όπως παρουσιάζεται και στον Πίνακα 2-1. Τα περισσότερα πετρέλαια ανήκουν στην κατηγορία των ελαφρών και των ενδιάμεσων αργών πετρελαίων. Βαρύτερα πετρέλαια χαρακτηρίζονται ως μη συμβατικά, ενώ ένα ελαφρύ αργό πετρέλαιο παράγει κατά τη διύλιση του πολλά περισσότερα ελαφρά προϊόντα (βενζίνη) και λιγότερα βαριά από ότι παράγει ένα βαρύ αργό πετρέλαιο (Habib Jr, Zhao et al. 2002).

Πίνακας 2-1 Ταξινόμηση του αργού πετρελαίου σε σχέση με την πυκνότητα του (Ανδρίτσος 2008).

	°API	ρ (στους 15,6°C)
Ελαφρύ	>40	<0,825g/ml
Μέσο	30 – 40	0,825 – 0,875g/ml
Βαρύ	< 30	0,825 – 0,875g/ml
Πολύ βαρύ	< 10	> 1g/ml

2.5.2 Χαρακτηριστικά φωτιάς λίμνης αργού πετρελαίου

Εφόσον μελετήθηκαν οι μηχανισμοί της καύσης και αναλύθηκαν τόσο η σύσταση, όσο και οι ιδιότητες του αργού πετρελαίου, που παίζουν σημαντικό ρόλο στην πορεία της καύσης, είναι αναγκαίο να αναφερθούν και τα χαρακτηριστικά μιας φωτιάς λίμνης αργού πετρελαίου σε μια ατμοσφαιρική δεξαμενή ανοιχτής οροφής, θέμα που πραγματεύεται η παρούσα εργασία.

Αρχικά, για λόγους διευκόλυνσης της περιγραφής της δομής μιας λίμνης φωτιάς σε δεξαμενή, παρατίθενται ένας αριθμός χαρακτηριστικών, που είναι κοινά για τα περισσότερα είδη λιμνών φωτιάς (Steinhaus, Welch et al. 2007):

- Είδος υγρού καυσίμου. Σε δεξαμενές μεγάλου βάθους, το καύσιμο δύναται να εξατμίζεται με αυξανόμενο ρυθμό, λόγω συναγωγής, με αποτέλεσμα να επηρεάζει την εξέλιξη της φωτιάς. Επιπροσθέτως, και η αλληλεπίδραση του καυσίμου με το υλικό των τοιχιών της δεξαμενής, μπορεί να επηρεάσει.

- Η ζώνη άκαυστων ατμών καυσίμου άνωθεν της επιφάνειας του ίδιου του καυσίμου, οι οποίοι ατμοί διατηρούν συνήθως ένα κωνικό σχήμα.
- Η ζώνη φωτιάς, έντονης φωτεινότητας, που περιβάλλει την προαναφερθείσα ζώνη ατμού, έχοντας σαν αποτέλεσμα την, επίσης, κωνικού σχήματος φωτιά.
- Η περιοχή περαιτέρω καύσης πάνω από την ζώνη φωτιάς, με περιοδική παρουσία τυρβώδους φλόγας.
- Το αναδυόμενο πλούμιο, που είναι γενικά τυρβώδες από την φύση του και χαρακτηρίζεται από την μείωση της ταχύτητας και της θερμοκρασίας, όσο αυξάνεται το ύψος.

Κάθε μία από τις προαναφερόμενες ζώνες έχει μελετηθεί εκτενώς από την βιβλιογραφία (Modak 1978, Joulain 1998, Quintiere and Grove 1998). Επομένως, μια προκύπτουσα φωτιά δύναται να ποσοτικοποιηθεί, χρησιμοποιώντας κάποια μετρήσιμα, πλέον, μεγέθη, με τα κυριότερα να είναι:

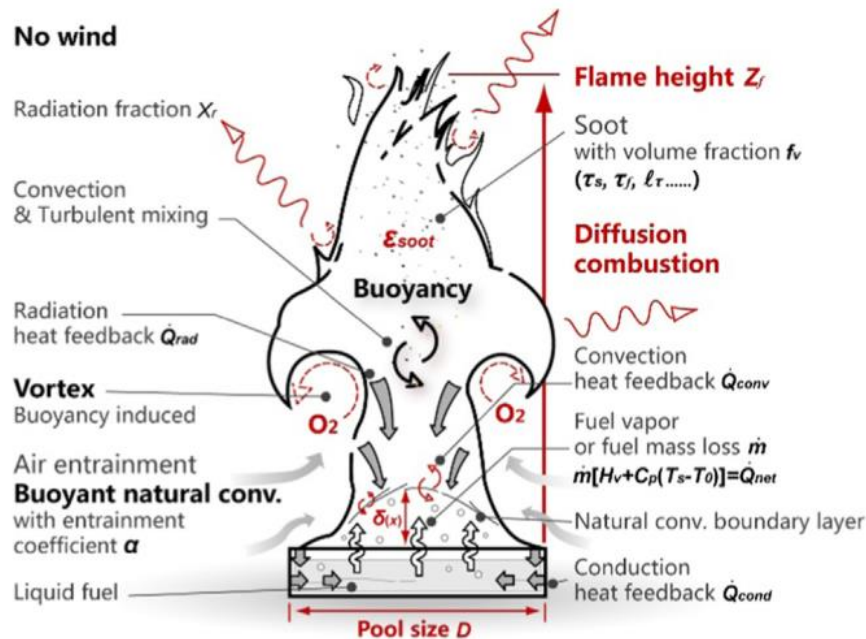
- Ρυθμός εξάτμισης ή ρυθμός απώλειας μάζας. Τα δύο μεγέθη αυτά είναι στενά συνδεδεμένα με τον ρυθμό έκκλησης θερμότητας, που θα αναφερθεί παρακάτω. Ιστορικά, ο ρυθμός καύσης εξέφραζε την κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα χρόνου.
- Ρυθμός έκκλησης θερμότητας (Heat Release Rate HRR). Αντιπροσωπεύει την συνολική ποσότητα θερμότητας που εκλύεται από μια φωτιά ανά μονάδα χρόνου (π.χ. kW). Για λίμνες φωτιάς συνήθως χρησιμοποιείται και ο ρυθμός έκκλησης θερμότητας ανά τετραγωνικό μέτρο (kW/m²).
- Ύψος φλόγας. Η κατακόρυφη απόσταση από την καιόμενη επιφάνεια έως την κορυφή της φλόγας. Συνήθως, αυτό το ύψος υπολογίζεται έως το σημείο που η φλόγα είναι κατά 50% περιοδική.
- Θερμοκρασία φλόγας. Για λόγους πρακτικότητας, παρουσιάζεται η κατανομή των θερμοκρασιών, συχνά αξονοσυμμετρικά της φλόγας με μέσες τιμές.
- Ρυθμός έκκλησης πλουμίου. Μπορεί να εκφραστεί είτε ογκομετρικά (m³/s), είτε βαρυμετρικά (kg/s).
- Ακτινοβολία. Συναντάται σε δύο μορφές, είτε ως η εκπεμπόμενη ακτινοβολία σε συγκεκριμένο σημείου του χώρου (kW/m²), είτε ως το άθροισμα των

απωλειών θερμότητας λόγω ακτινοβολίας (kW) και συνήθως συσχετίζεται με τον ρυθμό έκκλισης θερμότητας.

Τα παραπάνω μετρήσιμα μεγέθη δεν θα μπορούσαν να είναι ανεξάρτητα από τα φυσικά χαρακτηριστικά και τις επικρατούσες συνθήκες του ατυχήματος, όπως:

- Η γεωμετρία της δεξαμενής (διάμετρος D, βάθος, βάση), άρα και της λίμνης φωτιάς, εφόσον περιορίζεται από τα τοιχία της δεξαμενής.
- Η σύσταση του καυσίμου.
- Οι συνθήκες αερισμού (άνεμος, εξαναγκασμένος εξαερισμός κλπ.)
- Περιβάλλουσα γεωμετρία (ανοιχτό περιβάλλον, ύψος τυχόν διαχωριστικού, απόσταση από τείχους).
- Υλικό δεξαμενής.

Αυτά τα φυσικά χαρακτηριστικά επηρεάζουν την πορεία της πυρκαγιάς και μπορούν να αξιολογηθούν από τα μετρήσιμα μεγέθη. Γενικά, οι φωτιές υδρογονανθράκων παράγουν μεγάλα ποσά σωματιδίων καπνού, υψηλών θερμοκρασιών (>1000K), τα οποία βρίσκονται στο ορατό φάσμα και καθορίζουν το προφίλ της φλόγας (Klassen and Gore 1993). Επίσης, η θερμική ακτινοβολία από την ίδια την φωτιά παίζει σημαντικό ρόλο στην συγκέντρωση και την θερμοκρασία των σωματιδίων καπνού. Ο ρυθμός έκκλισης πλουμίου συσχετίζεται με την εισροή αέρα (air entrainment) (Σχήμα 2-16), με τον ρυθμό απώλειας μάζας καυσίμου (fuel mass loss) (Σχήμα 2-16) και την ένταση της τυρβώδους φλόγας (Reed and Peterson 2012).



Σχήμα 2-16 Χαρακτηριστικά φωτιάς, απουσία ανέμου (Hu 2017).

Πιο συγκεκριμένα, οι φλόγες από λίμνη φωτιάς αργού πετρελαίου χαρακτηρίζονται από τύρβη και ανωστικές δυνάμεις. Μπορούν να διαχωριστούν σε δύο μέρη, στην φλόγα της καιόμενης επιφάνειας του καυσίμου και στην άνωθεν ορατή φλόγα (Riezel 2002). Τα υγρά καύσιμα εξατμίζονται συνεχώς, λόγω της θερμική ακτινοβολίας. Οι ατμοί αυτοί ανυψώνονται στην προαναφερόμενη ζώνη φωτιάς εξαιτίας της διαφοράς πυκνότητας. Ο εξωτερικός αέρας συμμετέχει στην καύση της ζώνης φωτιάς, με την βοήθεια των ανωστικών δυνάμεων που επιδρούν στην φωτιά. Η διεπαφή μεταξύ του αέρα και των ατμών του καυσίμου πραγματοποιείται σε ένα συγκεκριμένο ύψος, πάνω από την επιφάνεια του καυσίμου και εξαρτάται από την αναλογία αέρα/ατμών καυσίμου της καύσης. Τα προϊόντα της καύσης συνεχώς ανυψώνονται και σχηματίζουν πλούμιο υψηλής θερμοκρασίας μαζί με τον αέρα περιβάλλοντος.

Συνεπώς, η φλόγα από λίμνη φωτιάς πετρελαίου δύναται να επιμεριστεί σε δύο περιοχές ενδιαφέροντος, την περιοχή της φωτιάς και την περιοχή του πλουμίου. Στην περιοχή της φωτιάς, συντελείται ανάμιξη και καύση σε στοιχειομετρική αναλογία του καυσίμου με τον ατμοσφαιρικό αέρα. Ακόμη, η ορμή και η θερμότητα των προϊόντων καύσης αυξάνεται ραγδαία στην κατακόρυφη διεύθυνση. Στην περιοχή του πλουμίου, η αποκτηθείσα ορμή και θερμότητα

σταδιακά μειώνονται, ως αποτέλεσμα της ανάμιξης και της απουσίας χημικών αντιδράσεων των προϊόντων καύσης με τον περιβάλλοντα αέρα. Επομένως, το ύψος της φλόγας (flame height Z_f) (Σχήμα 2-16) εξαρτάται από τον ρυθμό έκκλησης θερμότητας (HRR) και από την ταχύτητα της ανάμιξης των προϊόντων καύσης με τον αέρα.

Σε ιδανικές συνθήκες, οι ατμοί του καυσίμου καίγονται ολοκληρωτικά στην διεπαφή των δύο περιοχών. Στο σημείο αυτό η θερμοκρασία της φλόγας μεγιστοποιείται και γενικότερα στην επιφάνεια της διεπαφής αυτής μεγιστοποιούνται η συγκέντρωση των ατμών και του αέρα.

2.6 Ανάλυση των παραμέτρων του ατυχήματος

Όπως γίνεται αντιληπτό, τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της φωτιάς παρουσία ανέμου, αλλάζουν δραματικά. Υφίσταται πλέον αλληλεπίδραση των ανωστικών δυνάμεων, που χαρακτηρίζουν μεμονωμένα την φλόγα, με των αδρανειακών δυνάμεων του ανέμου.

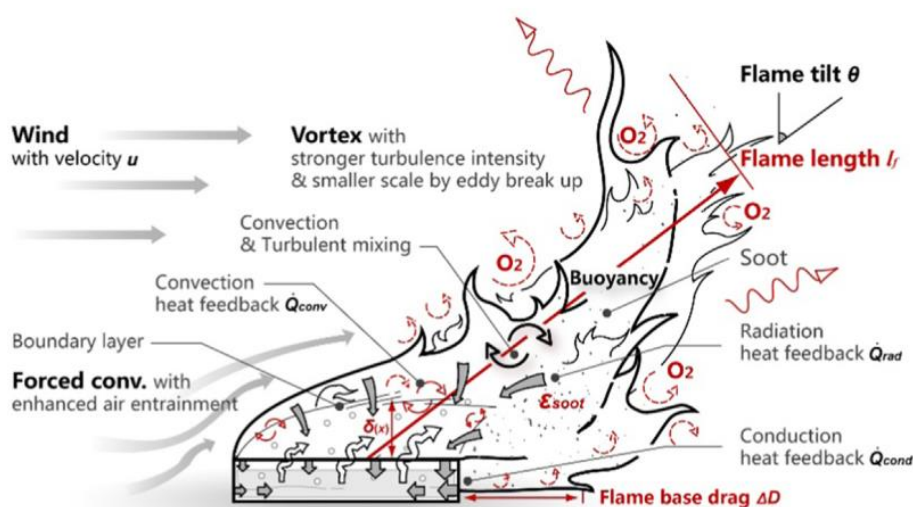
Η κλίση της φλόγας (Flame tilt θ) (Σχήμα 2-17) είναι ένα από τα πιο βασικά χαρακτηριστικά της φωτιάς, που επηρεάζονται λόγω ανέμου. Αφενός, καθορίζει την ανάδραση της μεταβαλλόμενης ακτινοβολίας από την φλόγα προς την καιόμενη επιφάνεια, αφετέρου, αυξάνει την ένταση της ακτινοβολίας στην περιοχή του κατωρρεύματος, γεγονός σημαντικό για την εξάπλωση της φωτιάς. Επίσης, επειδή αποτελεί ένα από τα πιο οφθαλμοφανή φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε περιπτώσεις πυρκαγιάς σε συνθήκες ανέμου, έχει μελετηθεί εκτενώς από την βιβλιογραφία ήδη από την δεκαετία του '60 (Pipkin and Sliepcevich 1964, Welker, Pipkin et al. 1965, Welker and Sliepcevich 1966). Πολλές από τις διαθέσιμες εξισώσεις για τις γωνίες κλίσης φλόγας βασίζονται στις σχέσεις του Thomas (Thomas 1963, Thomas, Pickard et al. 1963, Thomas 1965).

Το μήκος φλόγας (Flame length l_f) (Σχήμα 2-17) είναι αποτέλεσμα συμβολής της κατακόρυφης άνωσης της ίδιας της φλόγας με την οριζόντια ορμή που προσφέρεται από τον άνεμο. Φυσικά, το παραπάνω φαινόμενο επηρεάζεται από τρεις μηχανισμούς:

- i. την γωνία κλίσης θ της φλόγας,

- ii. τον ρυθμό εξάτμισης του καυσίμου λόγω της μεταβαλλόμενης ανάδρασης θερμότητας,
- iii. την μεταβολή της εισροής αέρα.

Τέλος, η οπισθέλκουσα βάση φλόγας (Flame base drag ΔD) (Σχήμα 2-17) είναι ένα ιδιαίζων φαινόμενο λίμνης φωτιάς παρουσία ανέμου. Σχηματίζεται κατά την κατεύθυνση του ανέμου, ως προέκταση της βάσης της φλόγας με συγκεκριμένο μήκος, στο κατώρρευμα, όπισθεν της δεξαμενής. Η προέκταση αυτή συνήθως επεκτείνει την περιοχή της φωτιάς και την ένταση της ακτινοβολίας, αυξάνοντας έτσι την επικινδυνότητα που ενέχει από πιθανές αναφλέξεις. Η φυσική πίσω από αυτό το περιστατικό επεξηγείται, σύμφωνα με τους Welker and Sliepcevich (1966), πως «σε πυρκαγιά λίμνης παρουσία ανέμου, όταν η πυκνότητα των παραγόμενων ατμών του καυσίμου είναι υψηλότερη του περιβάλλοντα αέρα, τότε οι «βαριοί» ατμοί βρισκόμενοι πλησίον της υγρής επιφάνειας συμπαρασύρονται στο ύψος της βάσης και καίγονται στην κατεύθυνση του κατωρρέυματος. Η πυκνότητα των καίόμενων ατμών ολοένα και μειώνεται έως κάποια απόσταση που έχουν διανύσει. Επομένως, το μήκος οπισθέλκουσας βάσης φλόγας καθορίζεται από τον λόγο πυκνότητας ατμών καυσίμου προς του περιβάλλοντα αέρα, καθώς και τον αριθμό Froude, που αντιπροσωπεύει τον λόγο των αδρανειακών δυνάμεων του ανέμου προς των ανωστικών δυνάμεων της φλόγας.»

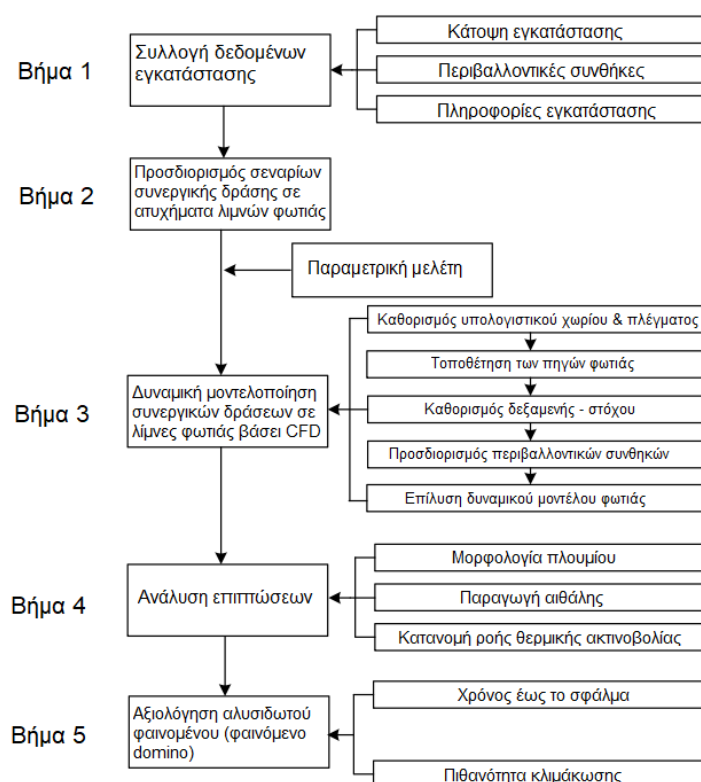


Σχήμα 2-17 Χαρακτηριστικά φωτιάς, παρουσία ανέμου (Hu 2017).

Στην συνέχεια, παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, όπως διαφαίνεται αναλυτικά στο Σχήμα 2-18, όσον αφορά την ανάλυση μέσω Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (CFD), για την μοντελοποίηση των επιπτώσεων του ατυχήματος και της αξιολόγησης των συνεργικών δράσεων λίμνης φωτιάς. Οι συνεργικές δράσεις που λήφθηκαν υπόψιν στην μελέτη των Li, Chen et al. (2021), σε τριάντα σενάρια περιστατικών πυρκαγιάς ήταν:

- η ταχύτητα του ανέμου,
- η θέση της πυρκαγιάς,
- ο τύπος του αποθηκευμένου καυσίμου,
- η απόσταση μεταξύ δεξαμενών.

Διαπιστώθηκε πως, από τις παραπάνω συνεργικές δράσεις, η ταχύτητα του ανέμου ήταν η πιο επιδραστική στην πιθανότητα κλιμάκωσης του αλυσιδωτού φαινομένου (domino effect).



Σχήμα 2-18 Βήματα για μοντελοποίηση επιπτώσεων και για ανάλυση συνεργικών δράσεων σε λίμνες φωτιάς βάσει CFD (Li, Chen et al. 2021).

Η παρούσα μελέτη βασίζεται στην περίπτωση ατυχήματος λίμνης φωτιάς σε δεξαμενή αποθήκευσης αργού πετρελαίου παρουσία ανέμου, όπως παρουσιάζεται στην έρευνα του Zhou (2019). Διαπιστώθηκε πως, σε συνθήκες έντονων ανέμων, η φλόγα και ο καπνός κλίνουν ανατολικά, εφόσον ο άνεμος πνέει από δυτικά προς τα ανατολικά και όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου, τόσο αυξάνεται και η κλίση. Συγκεκριμένα, για ταχύτητες αέρα 1,5m/s, 3,6m/s και 6m/s οι γωνίες κλίσης θ είναι 17,24°, 32,53° και 42,43° αντίστοιχα και όταν η ταχύτητα φτάσει τα 20m/s, τότε η φλόγα μπορεί μέχρι και να γίνει παράλληλη με το έδαφος.

Όσον αφορά, την διασπορά του καπνού, επειδή το αργό πετρέλαιο αποτελείται από πληθώρα υδρογονανθράκων, άρα και από υψηλή συγκέντρωση άνθρακα, έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων μαύρου καπνού (αιθάλη), ο οποίος κάλυψε εξ ολοκλήρου την επιφάνεια της δεξαμενής. Σε περίπτωση ανέμου, η ταχύτητα του έχει μεγαλύτερη επίδραση στον καπνό και μπορεί ακόμα και να επηρεάσει τυχούσα γειτονική δεξαμενή. Μάλιστα, όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι στα 20m/s το παραγόμενο πλούμιο καλύπτει εξ ολοκλήρου την επιφάνεια γειτονικών δεξαμενών, με αποτέλεσμα την πρόκληση επικινδυνότητας.

Τέλος, για την κατανομή της θερμοκρασίας, η θερμοκρασία περιβάλλοντος ακριβώς πάνω από την δεξαμενή αυξάνεται ραγδαία, ενώ η θερμοκρασία από την επιφάνεια της φλόγας προς το κέντρο της αυξάνεται σταδιακά. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου, η μετάδοση θερμότητας λόγω συναγωγής της φλόγας εντατικοποιείται, έχοντας ως αποτέλεσμα την μείωση της θερμοκρασίας της φλόγας, καθώς και την γενικότερη σμίκρυνση της περιοχής υψηλής θερμοκρασίας. Η θερμοκρασιακή κατανομή της φλόγας μετατοπίζεται λόγω του ανέμου και το σχήμα της παραμορφώνεται. Η μέγιστη θερμοκρασία φτάνει τους 35°C, 270°C και 320°C σε ανέμους ταχύτητας 3,6m/s, 10m/s και 20m/s, αντιστοίχως. Και πάλι, παρατηρείται μετατόπιση της θερμοκρασιακής περιοχής σε γειτονική δεξαμενή, με την αύξηση της ταχύτητας του αέρα.

3 Μεθοδολογία

3.1 Αριθμητική προσέγγιση

Το γεγονός ότι υπάρχουν πολλοί περιοριστικοί παράγοντες στην πραγματοποίηση πειραμάτων μεγάλης κλίμακας, οδήγησε στην ανάπτυξη πολλών εμπειρικών και ημι- εμπειρικών υπολογιστικών προσεγγίσεων. Οι παραπάνω έχουν ως σκοπό την περιγραφή της διαδικασίας της καύσης, τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών της μετάδοσης θερμότητας και των παραγόντων που επηρεάζουν τα διαφορετικά είδη λιμνών φωτιάς σ' ένα ατύχημα βιομηχανικής μονάδας. Με το πέρασμα των χρόνων, η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics CFD) κέρδισε έδαφος όσον αφορά την δυναμική προσομοίωση φωτιάς και ειδικότερα στην έρευνα των χαρακτηριστικών των λιμνών φωτιάς.

3.1.1 Κατηγορίες μοντέλων διασποράς

Υπάρχουν τρία κυρίως μαθηματικά μοντέλα για την αξιολόγηση λιμνών φωτιάς, τα μοντέλα CFD, τα Gaussian και τα εμπειρικά μοντέλα. Τα τελευταία απαρτίζονται από τα Single Point Source μοντέλο και Solid Flame μοντέλο (SFM). Το πρώτο εξ αυτών βασίζεται στην παραδοχή ότι η φλόγα είναι η μοναδική πηγή θερμότητας και πως η ένταση της θερμικής ακτινοβολίας είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης και η ροή της μπορεί να υπολογιστεί έως και πέντε διαμέτρους λίμνης από την φλόγα. Στο Solid Flame Model (Lautkaski 1992) μελετάται η επίδραση του ανέμου στην συμπεριφορά της φωτιάς, όταν αυτή έχει κυλινδρικό σχήμα. Αυτό το σχήμα αναπαριστά την φωτιά.

Παρόλα αυτά τα Single Point Source και Solid Flame μοντέλα έχουν περιορισμούς, όπως το ότι είναι αναποτελεσματικό στην προσομοίωση της δυναμικής λίμνης φωτιάς σε όλο το εύρος δινών, λόγω αποκόλλησης του αναπτυσσόμενου πεδίου τύρβης. Επιπροσθέτως, αυτά τα μοντέλα δεν είναι έγκυρα για την παρακολούθηση διαφορετικών σεναρίων κλίσεων φωτιάς σε συνθήκες ανέμων ή για την πρόβλεψη των ιδιοτήτων της καύσης σε μεγάλης κλίμακας περιστατικά πυρκαγιάς (Yamaguchi and Wakasa 1986).

Οι εμπειρικές προσομοιώσεις χρησιμοποιούνται κυρίως από μηχανικούς φωτιάς και είναι δημοφιλή, λόγω της ικανότητάς τους να παρέχουν ακριβείς εκτιμήσεις γρήγορα και ικανοποιητικά. Ωστόσο, τον τελευταίο καιρό η μοντελοποίηση της φωτιάς αναπτύσσεται ραγδαία, γιατί όσο πιο ισχυρά υπολογιστικά μέσα δημιουργούνται, τόσο πιο προσιτή και εφικτή γίνεται η μοντελοποίηση μέσω CFD, όσον αφορά την έρευνα της φωτιάς. Το FDS τα τελευταία χρόνια έχει συμβάλλει στην ανάπτυξη της μοντελοποίησης της φωτιάς.

Η σημαντικότητα μοντελοποίησης ατυχημάτων φωτιάς δεξαμενών αργού πετρελαίου ολοένα και αυξάνεται, λόγω της δυσκολίας πραγματοποίησης δοκιμών φωτιάς σε πειράματα μεγάλης κλίμακας. Το FDS, με μεγάλο επίπεδο ακρίβειας, προσφέρει έγκυρες προβλέψεις για ανάλυση φωτιάς. Γίνεται ολοένα και ευκολότερο να εκτελεσθεί ο παραπάνω κώδικας με την τεχνολογική ανάπτυξη των υπερ-υπολογιστών και αυτό το γεγονός έχει αντίκτυπο και στην ανάπτυξη υπολογιστικών κωδικών φωτιάς με πιο ακριβή αποτελέσματα. Αυτού του είδους μοντέλα χρησιμοποιούνται από ερευνητές για την μελέτη φωτιών σε δεξαμενές αργού πετρελαίου. Οι Sun, Guo et al. (2014) έφτασαν στο συμπέρασμα πως η μέθοδος υπολογισμού με CFD εξάγει καλύτερα αποτελέσματα από τα κοινά εμπειρικά μοντέλα.

Η έρευνα των Miao, Wenhua et al. (2014), με την χρήση CFD, μελέτησε την περίπτωση λίμνης φωτιάς σε ανάχωμα περιμετρικά μιας δεξαμενής αποθήκευσης καυσίμου, που είχε κατασκευασθεί ειδικά για τον περιορισμό πυρκαγιάς. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν πώς η ισχυρή θερμική ακτινοβολία της λίμνης φωτιάς, θα μπορούσε να καταστρέψει παρακείμενες δεξαμενές, εξοπλισμούς, ακόμα και σωληνώσεις.

Οι Elhelw, El-Shobaky et al. (2021) στην έρευνα τους μελέτησαν ένα ατύχημα για την προσομοίωση λιμνών φωτιάς σε συστοιχία δεξαμενών χρησιμοποιώντας τον κώδικα του FDS. Ερευνήθηκε και αναλύθηκε η ροή της θερμικής ακτινοβολίας, καθώς και εξάχθηκαν ισούψεις γραφήματα που περιγράφουν την συμπεριφορά των θερμοκρασιακών διαφορών φλόγας-καπνού. Σκοπός της προσομοίωσης ήταν η πρόβλεψη των διαστάσεων που θα μπορούσε να λάβει μια πυρκαγιά δεξαμενής αποθήκευσης αργού πετρελαίου και της

θερμοκρασιακής κατανομής του καπνού που συναντάται μέσα και πέριξ της δεξαμενής.

3.1.2 Μαθηματικό μοντέλο

Πρόσφατα, ο κώδικας CFD, γνωστός ως FDS (Fire Dynamics Simulator) έχει καταδείξει τα πλεονεκτήματά του ως προς την προσομοίωση λιμνών φωτιάς και αυτό διαφαίνεται από την ευρεία χρήση του σε αντίστοιχες περιπτώσεις. Ο παραπάνω κώδικας κάνει περιγραφή του πεδίου αξιοποιώντας την μέθοδο Lagrange, για να αναπαραστήσει φλεγόμενα αέρια και υπέρθερμο καπνό, προκειμένου να περιγράψει την ροή. Αναπτύχθηκε από το National Institute of Standards and Technology (NIST) και επιλύει με αριθμητικές μεθόδους τις εξισώσεις Navier-Stokes:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho \cdot g - \nabla p + \mu \nabla^2 v \quad (3-1)$$

που είναι οι πλέον κατάλληλες για ροές χαμηλών ταχυτήτων, όπως αυτή του καπνού, καθώς και για την μετάδοση θερμότητας από φωτιά.

Το FDS αν και έχει σχεδιαστεί για να επιλύει πρακτικά προβλήματα που προκύπτουν από φωτιές, παρόλα αυτά προσφέρεται και ως ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την μελέτη των θεμελιωδών δυναμικών της φωτιάς και της καύσης. Η τύρβη καθορίζει το μέγεθος της αλληλεπίδρασης των διαφόρων παραμέτρων μιας λίμνης φωτιάς, όπως η καύση, η ταχύτητα ανέμου και η επαγωγή του περιβάλλοντος αέρος (McGrattan, Hostikka et al.).

Οι μερικές διαφορικές εξισώσεις (εξισώσεις Navier- Stokes) είναι αυτές που εφαρμόζονται στην αεροδυναμική περιγραφή της ροής ως το κύριο υπομοντέλο στο FDS, περιγράφοντας τα χαρακτηριστικά του ρευστού, όπως η μεταφορά μάζας και ενέργειας. Αυτές οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιούν τις εξισώσεις Navier-Stokes, απλοποιούνται και ενσωματώνονται σε ένα τύπο ροής πολυσύνθετου ρευστού που διαστέλλεται θερμικά. Αυτό επιτυγχάνεται απαλείφοντας τα ακουστικά κύματα, προκειμένου να κατασκευάσουμε εξισώσεις για υποηχητικές ροές ($Mach < 0,3$).

Με αυτό το τρόπο, γίνεται καλύτερη αναπαράσταση των δυνάμεων που προκαλούνται από την έκλυση θερμότητας, λόγω των χημικών διεργασιών που συντελούνται, καθώς και των δυνάμεων άντωσης στην χαμηλής ταχύτητας κίνηση των αερίων. Έτσι, υπάρχει η δυνατότητα απεικόνισης μεγάλου εύρους στην πυκνότητα και στην θερμοκρασία και μικρές μεταβολές στην πίεση που επικρατεί σε πυρκαγιές. Εφαρμόζονται παραβολικές μερικές διαφορικές εξισώσεις, κατάλληλες για ροές χαμηλών ταχυτήτων, που προκαλούνται από μεταφορά θερμότητας, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στον καπνό και στην θερμότητα που εκπέμπεται από την φωτιά. Στο εγχειρίδιο του Fire Dynamics Simulation (McGrattan, Hostikka et al.) περιγράφονται διεξοδικά όλοι οι τύποι των χρησιμοποιούμενων εξισώσεων και αριθμητικών μεθόδων.

Το σετ των εξισώσεων διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας που επιλύονται από το FDS παρουσιάζονται παρακάτω:

i.Εξίσωση συνέχειας της μάζας:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (3-2)$$

ii.Εξίσωση της Διατήρησης Ορμής:

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + f_{a,i} + \dot{m}_b''' u_{b,i} \quad (3-3)$$

iii.Καταστατική εξίσωση ιδανικών αερίων

$$\bar{p} = \rho T R \sum_a \frac{Z_a}{W_a} = \frac{\rho R T}{\bar{W}} \quad (3-4)$$

iv. Εξίσωση διατήρησης της ενέργειας:

Η εσωτερική ενέργεια, e , και η ενθαλπία, h , μπορεί να συσχετιστεί με όρους θερμοδυναμικής: $h = e + \bar{p}/\rho$. Η εξίσωση διατήρησης της ενέργεια μπορεί να γραφτεί με όρους ενθαλπίας, h_s :

$$\frac{\partial (\rho h_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h_s \mathbf{u}) = \frac{D\bar{p}}{Dt} + \dot{q}''' - \nabla \cdot \dot{q}'' \quad (3-5)$$

όπου \dot{q}''' είναι ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας ανά μονάδα όγκου. Ο όρος \vec{q}'' είναι η ροή θερμότητας από ακτινοβολία και από συναγωγή και είναι ίση με:

$$\vec{q}'' = -k\nabla T - \sum_a h_{s,a}\rho D_a \nabla Y_a + \dot{q}_r'' \quad (3-6)$$

όπου k είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας και \vec{q}'' είναι η ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας σε στερεή επιφάνεια.

v. Απόκλιση της ταχύτητας

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = \frac{1}{\rho h_s} \left[\frac{D}{Dt} (\bar{p} - \rho h_s) + \dot{q}''' + \dot{q}_r''' - \dot{q}_r''' - \nabla \cdot \dot{q}'' \right] \quad (3-7)$$

vi. Εξίσωση για κάθε αέριο συστατικό που μεταφέρεται στον αέρα:

$$\frac{\partial(\rho Z_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho Z_\alpha \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\rho D_\alpha \nabla Z_\alpha) + \dot{m}_a''' \quad (3-8)$$

3.1.3 Αριθμητική μέθοδος επίλυσης

Το FDS χρησιμοποιεί προσομοίωση μεγάλης δίνης (Large Eddy Simulation LES) ή άμεση αριθμητική προσομοίωση (Direct Numerical Simulation DNS), προκειμένου να λύσει τις μερικές διαφορικές εξισώσεις ροής του ρευστού. Το LES διαφέρει από άλλες μεθόδους υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, όπως το DNS και το RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes), από την άποψη ότι ο υπολογισμός της τυρβώδους ροής υπολογίζεται από εξισώσεις αναλυτικής μορφής σε μεγάλης κλίμακας χωρία. Ωστόσο, για την πραγματοποίηση του LES απαιτείται η κατασκευή πυκνού πλέγματος, προκειμένου να λυθεί η τυρβώδης ροή σε μεγάλα υπολογιστικά χωρία. Επομένως, αυτή η μέθοδος απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ, με μεγάλη μνήμη τυχαίας προσπέλασης (RAM). Στην προκειμένη περίπτωση παρέχεται από το υπερ-υπολογιστικό σύστημα (cluster), με την ονομασία ARIS (Advanced Research Information System), του Εθνικού Δικτύου Υποδομών Τεχνολογίας & Έρευνας (Ε.Δ.Υ.Τ.Ε.).

Η προσομοίωση των τυρβωδών φαινομένων γίνεται με τη μέθοδο Προσομοίωσης Μεγάλων Δινών (LES) χρησιμοποιώντας το μοντέλο Smagorinsky. Ο άμεσος υπολογισμός των διαδικασιών καύσης και μεταφοράς

είναι δυνατός (προς το παρόν) σε μικρής κλίμακας πειράματα καύσης. Στην εξίσωση της Διατήρησης Ορμής:

$$\frac{\partial(\overline{\rho u_i})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho u_i u_j}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + \bar{\rho} g_i + \bar{f}_{a,i} + \overline{\dot{m}_b'' u_{b,i}} \quad (3-9)$$

εφαρμόζετε το Favre filter, $\bar{\varphi} = \frac{\bar{\rho} \varphi}{\bar{\rho}}$, και η εξίσωση της ορμής αποκτά την μορφή:

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \tilde{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + \bar{\rho} g_i + \bar{f}_{a,i} + \overline{\dot{m}_b'' \tilde{u}_{b,i}} \quad (3-10)$$

όπου ο όρος δύναμης $\bar{f}_{a,i}$ αντιπροσωπεύει τις εξωτερικές δυνάμεις όπως π.χ. η οπισθέλκουσα.

Ο όρος τ_{ij} αναφέρεται στον τανυστή τάσεων ο οποίος ισούται με:

$$\tau_{ij} = \mu \left(2\bar{S}_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}}) \right) \quad (3-11)$$

όπου δ_{ij} είναι η σταθερά Kronecker, $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$,

$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ είναι ο τανυστής παραμόρφωσης και μ είναι το δυναμικό ιξώδες του ρευστού.

Στην διαδικασία επίλυσης, ο κώδικας FDS χρησιμοποιεί ένα ημι-πεπλεγμένο σχήμα επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων για κάθε ένα από τα αριθμητικά πλέγματα που μπορεί να αποτελούν το χωρίο επίλυσης του κάθε προβλήματος. Οι μεταβλητές της ροής ανανεώνονται στο χρόνο, χρησιμοποιώντας ένα ρητό σχήμα Runge-Kutta δεύτερης τάξης. Για την πίεση χρησιμοποιείται σχήμα πεπλεγμένων διαφορικών εξισώσεων πρώτης τάξης.

Ο αλγόριθμος πραγματοποιεί επίλυση της ροής με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών δεύτερας τάξεως για τις χωρικές και χρονικές παραγώγους με την μέθοδο επίλυσης τύπου πρόβλεψης-διόρθωσης (predictor-corrector). Η μέθοδος πρόβλεψης-διόρθωσης υπολογίζει το επόμενο σημείο της λύσης βασισμένο σε προηγούμενα σημεία και στη συνέχεια διορθώνει τις

προβλέψεις με την χρήση κατάλληλης σχέσης. Αρχικά γίνεται μια υπόθεση για τα βαθμωτά μεγέθη του ροϊκού πεδίου (θερμοκρασία, πυκνότητα και πίεση) και στην συνέχεια με την επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes, εκφρασμένες υπό μορφή πεπερασμένων διαφορών, επιλύεται το πεδίο των ταχυτήτων, με χρήση του πεδίου των πιέσεων, όπου και προκύπτουν οι νέες τιμές του πεδίου ταχυτήτων. Κατόπιν, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις διατήρησης υπολογίζονται οι διορθωμένες τιμές της πίεσης και έτσι λαμβάνονται νέες τιμές για την πίεση και την ταχύτητα. Η επανάληψη των παραπάνω βημάτων επαναλαμβάνονται μέχρι να επιτευχθεί η σύγκλιση των τιμών των ταχυτήτων .

Ο αλγόριθμος επίλυσης ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:

- i. Υπολογισμός του μέσου ροϊκού πεδίου \bar{u}^n
- ii. Εκτίμηση των ρ , Y_α και \bar{p}_m στο επόμενο χρονικό βήμα με χρήση ρητού σχήματος Euler. Για παράδειγμα η πυκνότητα εκτιμάται μέσω της σχέσης:

$$\frac{\rho^* - \rho^n}{\delta t} + \nabla \cdot \rho^n \bar{u}^n = 0 \quad (3-12)$$

- iii. Ανταλλαγή των τιμών ρ^* και Y_α^* στα όρια των πλεγμάτων.
- iv. Εφαρμογή οριακών συνθηκών για ρ^* και Y_α^* .
- v. Υπολογισμός της απόκλισης, $\nabla \cdot \bar{u}^*$, με χρήση της εξίσωσης διατήρησης της ενέργειας. Σε αυτό το στάδιο το πεδίο ταχύτητας δεν έχει εκτιμηθεί για το επόμενο χρονικό βήμα, μόνο η απόκλιση της.

3.2 Πειραματική προσέγγιση

Τα αριθμητικά αποτελέσματα επαληθεύθηκαν με πειραματικές μετρήσεις. Παρακάτω θα ακολουθήσει μια σύντομη παρουσίαση του χώρου και του εξοπλισμού που κατέστησαν εφικτή την πραγματοποίηση του πειραματικού μέρους της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

3.2.1 Εργαστηριακός εξοπλισμός

Η πειραματική διαδικασία έλαβε χώρα στο Θεσμοθετημένο Εργαστήριο Ρευστο-Θερμικών Συστημάτων (Laboratory of Thermo-Fluid Systems) του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής (ΠΑ.Δ.Α.). Οι μετρήσεις ελήφθησαν εντός της

αεροσήραγγα κλειστού κυκλώματος του Prandtl, η οποία είναι μια αεροδυναμική αεροσήραγγα τύπου Göttingen, με ανοιχτό θάλαμο δοκιμών (Σχήμα 3-1).

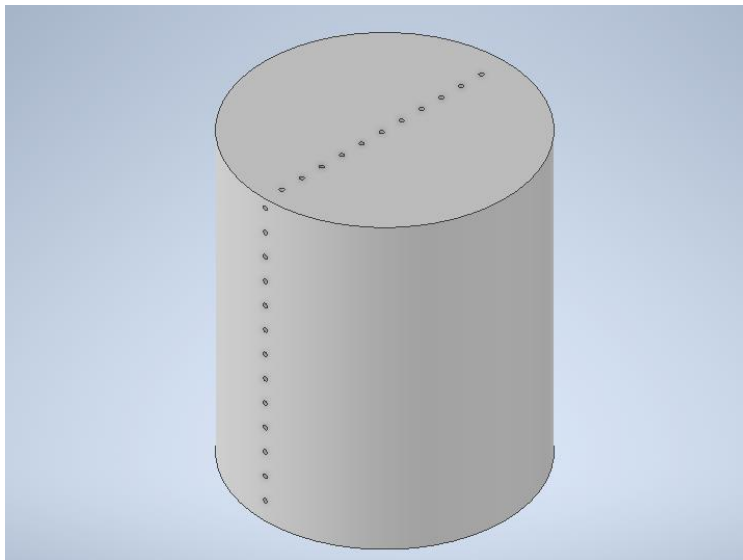


Σχήμα 3-1 Ανοιχτός θάλαμος δοκιμών αεροσήραγγας

Ακολούθως, απεικονίζεται η υπό κλίμακα γεωμετρία της κυλινδρικής δεξαμενής, που εγκαταστάθηκε στον θάλαμο δοκιμών (Σχήμα 3-2). Οι διαστάσεις του κυλίνδρου είναι 7cm ύψος (H) και 6cm διάμετρος (D). Η γεωμετρία φέρει αξονοσυμμετρικά στην επιφάνειά της 13 οπές ανάντη, 11 οπές στην άνω επιφάνεια του κυκλικού δίσκου και 13 οπές κατόντη (συνολικά 37 οπές), έτσι ώστε να είναι δυνατή η τοποθέτηση σωληνίσκων εντός των οπών, για την μέτρηση της πίεσης (Σχήμα 3-3).



Σχήμα 3-2 Υπό κλίμακα γεωμετρία κυλίνδρου.



Σχήμα 3-3 Η γεωμετρία του κυλίνδρου με τις φέρουσες σπές.

Όπως προαναφέρθηκε, η γεωμετρία διαπερνάται, από το εσωτερικό της έως και την επιφάνεια της, από σωλήνες που καταλήγουν στο μικρομανόμετρο του Σχήμα 3-4. Οι σωλήνες αυτοί λαμβάνουν μετρήσεις της πίεσης στην επιφάνεια του κυλίνδρου. Η παραπάνω καταγραφή πραγματοποιείται, προκειμένου να εξαχθεί ο συντελεστής πίεσης (C_p). Ο μέγιστος αριθμός δειγματοληψίας του είναι 10Hz και υπάρχει η δυνατότητα του σύνδεσης με εξωτερικό αισθητήρα.

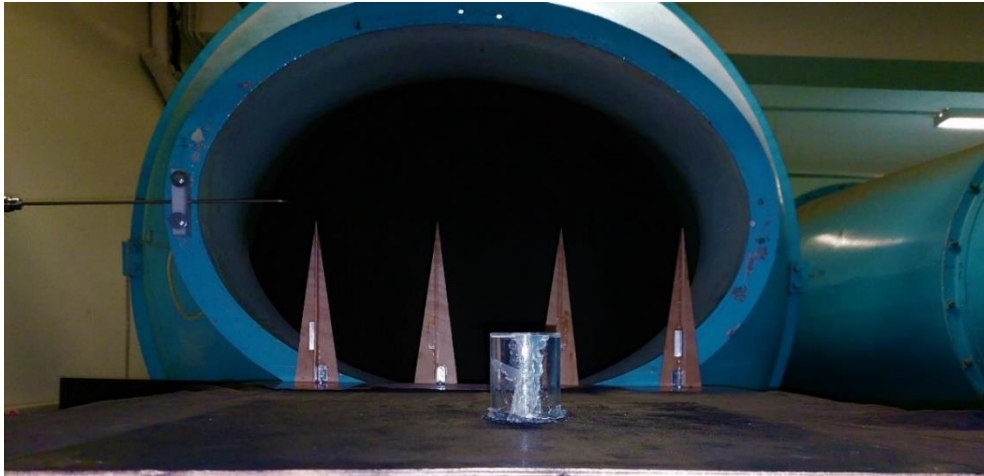
Ο συντελεστής πίεσης υπολογίζεται βάσει της σχέσης:

$$C_p = \frac{\Delta p_d}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2} \quad (3-13)$$



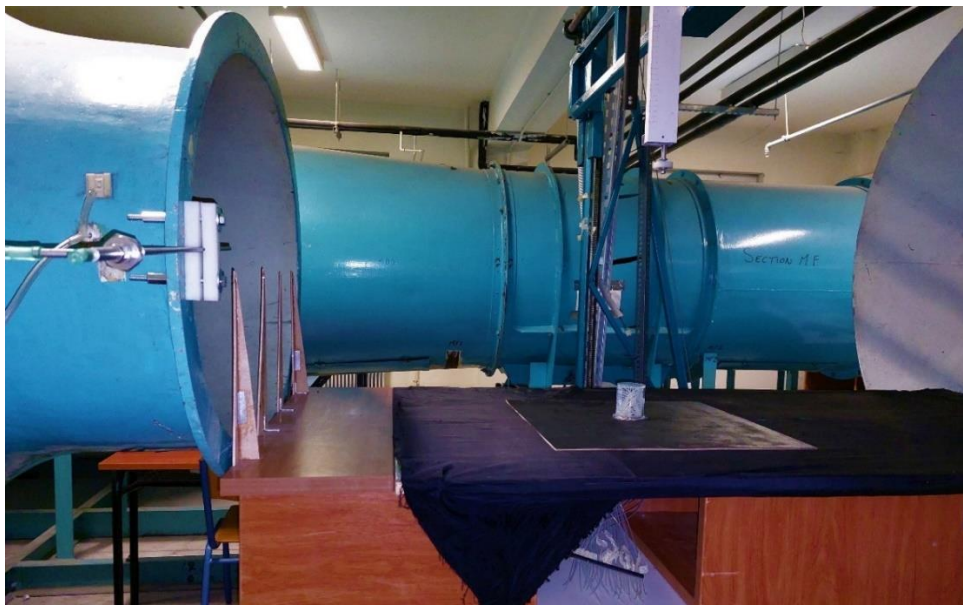
Σχήμα 3-4 Μικρομανόμετρο FC0560.

Εν συνεχεία, με την χρήση spires (συστοιχία ξύλινων τριγωνικών κατασκευών) στην είσοδο του θαλάμου δοκιμών (Σχήμα 3-5), δημιουργείται οριακό στρώμα, ικανό σε μέγεθος να περιέχει ολόκληρη την γεωμετρία της μακέτας. Έτσι, προσεγγίζεται όσο το δυνατόν καλύτερα μια πραγματική ατμοσφαιρική ροή, η οποία παρουσιάζει τυρβώδες οριακό στρώμα και ένα μη ομοιόμορφο προφίλ ταχύτητας (Vasilopoulos, Mentzos et al. 2018), σε αντίθεση με τη ροή εντός μιας αεροδυναμικής αεροσήραγγας.



Σχήμα 3-5 Χρήση spires για την δημιουργία οριακού στρώματος.

Τέλος, μετά την κατασκευή και τον έλεγχο όλου του απαραίτητου εξοπλισμού για την επιτέλεση του πειράματος, έλαβε χώρα η πειραματική διαδικασία (Σχήμα 3-6). Τέθηκε σε λειτουργία η αεροσήραγγα και εξήχθη η κατανομή της δυναμικής πίεσης στην επιφάνεια του κυλίνδρου. Οι συνθήκες του πειράματος είναι οι εξής: η ταχύτητα (U_0) της αδιατάραχτης ροής είναι 13,16 m/s και επειδή η θερμοκρασία αέρος (T_a) εντός της αεροσήραγγας εν ώρα λειτουργίας είναι 22°C, η τιμή της πυκνότητας (ρ_a) ανέρχεται στα 1,17 kg/m³.



Σχήμα 3-6 Πειραματική διάταξη στην αεροδυναμική αεροσήραγγα.

4 Ανάλυση υπό κλίμακας μοντέλου

Στο κεφάλαιο αυτό θα πραγματοποιηθεί η σύνοψη των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις υπολογιστικές προσομοιώσεις συγκρινόμενα με τις πειραματικές μετρήσεις, οι οποίες ελήφθησαν στην αεροσήραγγα του εργαστηρίου Ρευστο-Θερμικών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής (ΠΑ.Δ.Α.). Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να γίνει πλήρης περιγραφή του σχεδιασμού του υπολογιστικού χωρίου, καθώς και να σχολιαστούν τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν.

Η πρώτη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε πριν αναλυθούν τα αποτελέσματα είναι η εδραιοποίηση της ροής. Ουσιαστικά, σε αυτό το σημείο, θα παρουσιαστεί η επαναληψιμότητα του ροϊκού πεδίου και θα δείχτεί κατά πόσο η ροή έχει εδραιωθεί. Έτσι, θα αποδειχτεί ότι τα αποτελέσματα τα οποία θα έχουν αναλυθεί, δεν αποτελούν κομμάτι μεταβατικής κατάστασης της ροής, αλλά μόνιμης κατάστασης. Σε δεύτερη φάση θα εξεταστεί η επίδραση της διακριτοποίησης του χωρίου, η οποία αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την ποιότητα των αποτελεσμάτων, διότι βάσει του αριθμού των κελιών επιλύονται προσεγγιστικά οι εξισώσεις της ροής. Αποκλείοντας την ύπαρξη σφαλμάτων, τα οποία δεν θα έδιναν την ακριβή δομή του πεδίου ροής, παρουσιάζονται τα κατακόρυφα και οριζόντια ισοϋψή γραφήματα αδιάστατα, προκειμένου να υπάρξει δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων και με άλλες έρευνες, ανεξαιρέτως των διαστάσεων του κυλίνδρου και κατ' επέκταση του υπολογιστικού χωρίου.

Το παρόν κεφάλαιο θα κλείσει με την δεύτερη μέθοδο, με μία ποιοτική, πλέον, ανάλυση των αποτελεσμάτων. Θα πραγματοποιηθεί σύγκριση του πειραματικού συντελεστή πίεσης (C_p) με αυτόν που έχει προκύψει από τις προσομοιώσεις, καθώς και η εξαγωγή των προφίλ ταχυτήτων κατάντη του κυλίνδρου.

4.1 Υπολογιστικό χωρίο

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το υπολογιστικό χωρίο αποτελεί έναν διακριτοποιημένο όγκο, εντός του οποίου θα επιλυθούν αριθμητικά οι εξισώσεις οι οποίες διέπουν την ροή. Όπως γίνεται αντιληπτό, πρέπει το υπολογιστικό

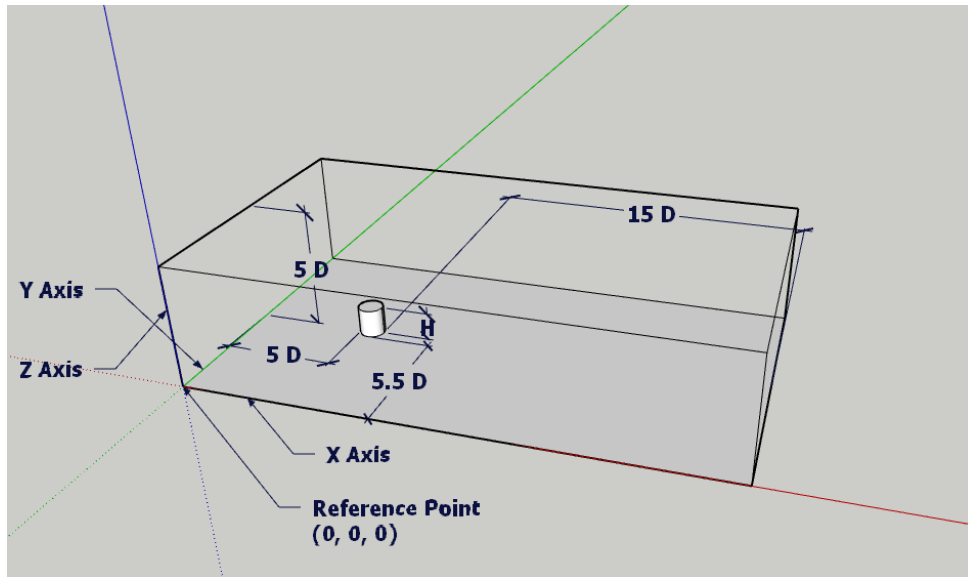
χωρίο να έχει τέτοιες διαστάσεις προκειμένου, να διασφαλίζεται η αριθμητική ευστάθεια, αλλά και η ορθότητα των αποτελεσμάτων.

Στο Σχήμα 4-1 αναπαρίσταται το υπολογιστικό χωρίο με τις διαστάσεις τις οποίες χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις που θα αναλυθούν παρακάτω. Από την είσοδο του πεδίου ροής έως τον κύλινδρο υφίσταται απόσταση πέντε διαμέτρων (5D), αριθμός ικανοποιητικός για την εδραίωση της ροής στην είσοδο. Το συνολικό ύψος του υπολογιστικού χωρίου είναι έξι διάμετροι (6D), έτσι ώστε να μην επηρεάζεται η ροή στο πάνω μέρος του κυλίνδρου από διαστάσεις οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν υπολογιστική στένωση, η οποία κανονικά δεν αποτελεί κομμάτι της φυσικής που διέπει το φαινόμενο. Ομοίως, αριστερά και δεξιά των τοιχωμάτων του κυλίνδρου έχουμε απόσταση πέντε διαμέτρων (5D) για τον ίδιο λόγο που προαναφέρθηκε. Τέλος, από την πίσω επιφάνεια του κυλίνδρου υπάρχει απόσταση δεκαπέντε διαμέτρων (15D), προκειμένου να παρέχεται πλήρη υπολογιστική εικόνα του απορρεύματος, δίχως να χάνεται κομμάτι της πληροφορίας.

Στον Πίνακα 4-1 παρατίθενται τα στοιχεία του κυλίνδρου, βάσει των οποίων σχεδιάστηκε ολόκληρο το υπολογιστικό χωρίο. Κλείνοντας, να τονιστεί ότι αυτές οι διαστάσεις θα χρησιμοποιηθούν στην ποσοτική ανάλυση για την αδιαστατοποίηση, προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα με τα αποτελέσματα της διεθνούς βιβλιογραφίας.

Πίνακας 4-1 Διαστάσεις κυλίνδρου υπολογιστικής προσομοίωσης.

Διάμετρος Κυλίνδρου D (cm)	Ύψος Κυλίνδρου h (cm)	Λόγος ύψους προς διάμετρο (h/D)
6	7	1,16



Σχήμα 4-1 Διαστάσεις υπολογιστικού χωρίου.

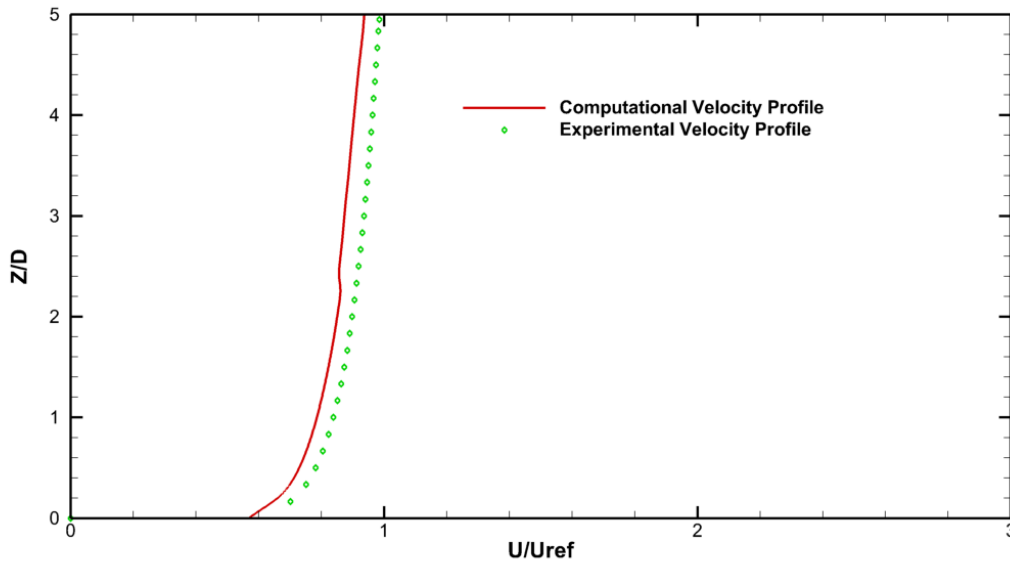
4.2 Οριακές συνθήκες

Προκειμένου να λυθεί ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων με μερικές παραγώγους, απαιτούνται οριακές συνθήκες στις επιφάνειες ελέγχου. Εδώ, θα αναφερθεί η οριακή συνθήκη, η οποία επηρεάζει κατά το μέγιστο το πεδίο ροής και η διαφοροποίηση της έστω και κατ' ελάχιστο, αλλάζει την φυσική του υπό μελέτη φαινομένου. Στο Σχήμα 4-2 δίνεται η κατανομή της ταχύτητας στην είσοδο του υπολογιστικού χωρίου. Πρόκειται για μία εκθετική συνάρτηση, η οποία τείνει να προσομοιώσει το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα. Η κατανομή της ταχύτητας στην είσοδο προσεγγίζει το προφίλ στην είσοδο της αεροσήραγγας, έτσι ώστε να εξαχθούν συγκρίσιμα αποτελέσματα. Για να προσομοιωθεί το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, όπως παρουσιάστηκε στο Σχήμα 3-5 της μεθοδολογίας, έγινε χρήση *spires* με σκοπό το οριακό στρώμα της αεροσήραγγας να έχει εκθετική μεταβολή μέχρι και δύο ύψη κυλίνδρου.

Η μαθηματική σχέση η οποία χρησιμοποιήθηκε στις υπολογιστικές προσομοιώσεις είναι η εξίσωση (4-1).

$$U_c = \left(\frac{y_c}{Z_0}\right)^{Z_0} \cdot U_0 \quad (4-1)$$

όπου U_c είναι η τιμή της ταχύτητας στο άκρο του κελίου κατά την διεύθυνση X. Το y_c είναι ο συσχετισμός της τιμής της ταχύτητας συναρτήσει το κέντρου του κελίου στην είσοδο, το Z_0 είναι το ύψος αναφοράς, όπου για την χρησιμοποιούμενη αεροσήραγγα έχει προσδιοριστεί στο 0,1 m και τέλος το U_0 είναι η τιμή της αδιατάραχτης ταχύτητας, η οποία είναι ίση με 13,16 m/s.



Σχήμα 4-2 Προφίλ ταχύτητας στην είσοδο.

Στο Σχήμα 4-3 δίδονται τα γραφήματα της έντασης της τύρβης για τις τρεις συνιστώσες της ταχύτητας και για τις διακυμάνσεις της κινητικής ενέργειας στην είσοδο της αεροσήραγγας με τη χρήση θερμικού ανεμόμετρου. Η ένταση της τύρβης για κάθε συνιστώσα υπολογίζεται ως εξής:

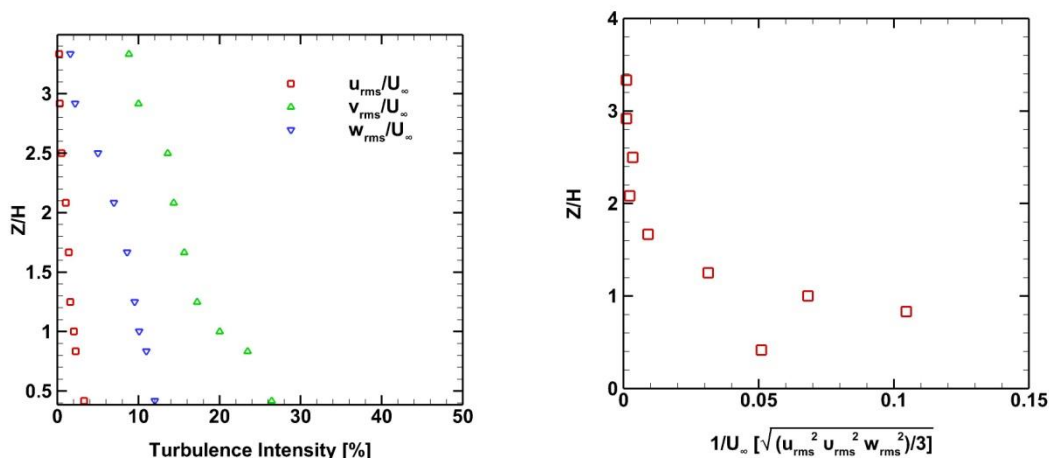
$$\frac{u_{rms}}{U_{\infty}}, \frac{v_{rms}}{U_{\infty}}, \frac{w_{rms}}{U_{\infty}} \quad (4-2)$$

Και η ενεργή τιμή των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας (root-mean-square of the turbulent velocity fluctuations) υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\frac{1}{U_{\infty}} \sqrt{\frac{u_{rms}^2 + v_{rms}^2 + w_{rms}^2}{3}} \quad (4-3)$$

Όπου u_{rms} , v_{rms} , w_{rms} είναι οι ενεργές τιμές των διακυμάνσεων της ταχύτητας και U_{∞} είναι η τιμή της ταχύτητας της αδιατάραχτης ροής. Όπως φαίνεται στο Σχήμα

4-3 η ένταση της τύρβης στην αδιατάραχτη ροή είναι 10% και στο ύψος του κυλίνδρου είναι 20%.



Σχήμα 4-3 Ένταση της τύρβης a) για τις τρεις συνιστώσες της ταχύτητας και b) για τις διακυμάνσεις της κινητικής ενέργειας.

Στο υπόλοιπο υπολογιστικό χωρίο έχουν εφαρμοστεί, επίσης, οριακές συνθήκες οι οποίες είναι απαιτούμενες για την αρχικοποίηση της προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα, στην έξοδο του πεδίου ροής έγινε χρήση ανοιχτής οριακής συνθήκης (open), που σημαίνει ότι δύναται η ύπαρξη ροής μάζας προς τις δύο κατευθύνσεις. Αριστερά και δεξιά έχει εισαχθεί περιοδική οριακή συνθήκη (periodic), με σκοπό να παρουσιάζονται οι ίδιες διακυμάνσεις. Τέλος, στην άνω επιφάνεια του πεδίου ροής θεωρήθηκε καθρεπτική οριακή συνθήκη (mirror), η οποία εισάγει την έννοια της εδραιωμένης κατά το ύψος ροής.

4.3 Εδραιοποίηση πεδίου ροής

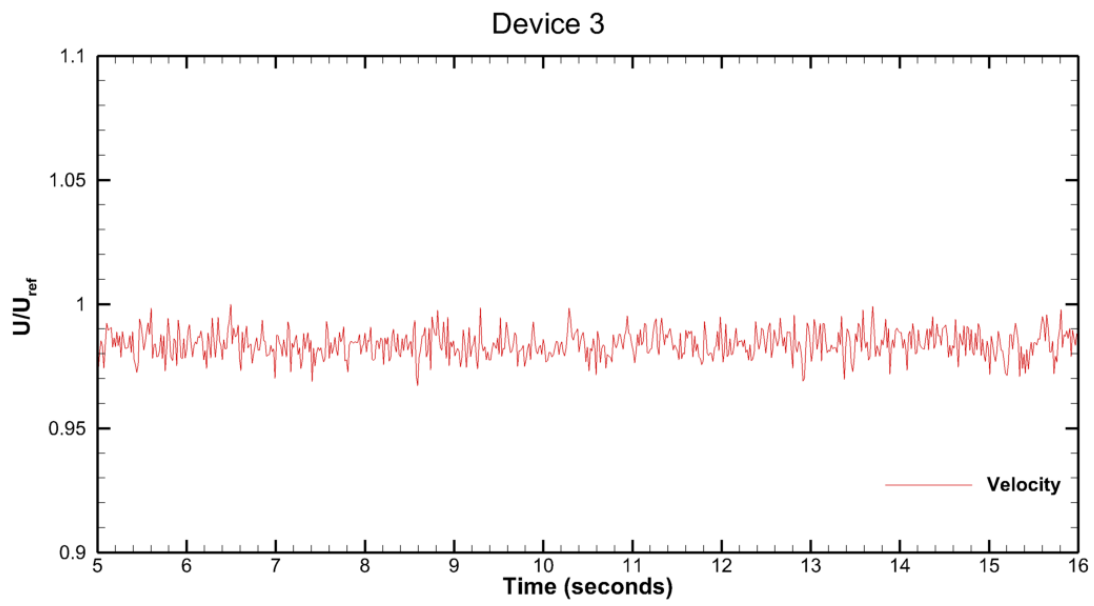
Στην συνέχεια, ακολουθεί ένας εποπτικός σχολιασμός των χρονοσειρών σε διάφορα σημεία του πεδίου ροής. Ο σκοπός του εδαφίου αυτού είναι να αποφανθεί εάν τα αποτελέσματα της τελευταίας χρονικής στιγμής της προσομοίωσης αποτελούν κομμάτι της εδραιωμένης ροής και όχι κάποιας μεταβατικής κατάστασης.

Στα Σχήμα 4-4, Σχήμα 4-5, Σχήμα 4-6, Σχήμα 4-7 δίδεται η υπολογιζόμενη ταχύτητα από τις προσομοιώσεις συναρτήσει του χρόνου της προσομοίωσης. Οι τρεις χρονικές δειγματοληψίες (Device 3, Device 5, Device 12) είναι σε σημεία τα

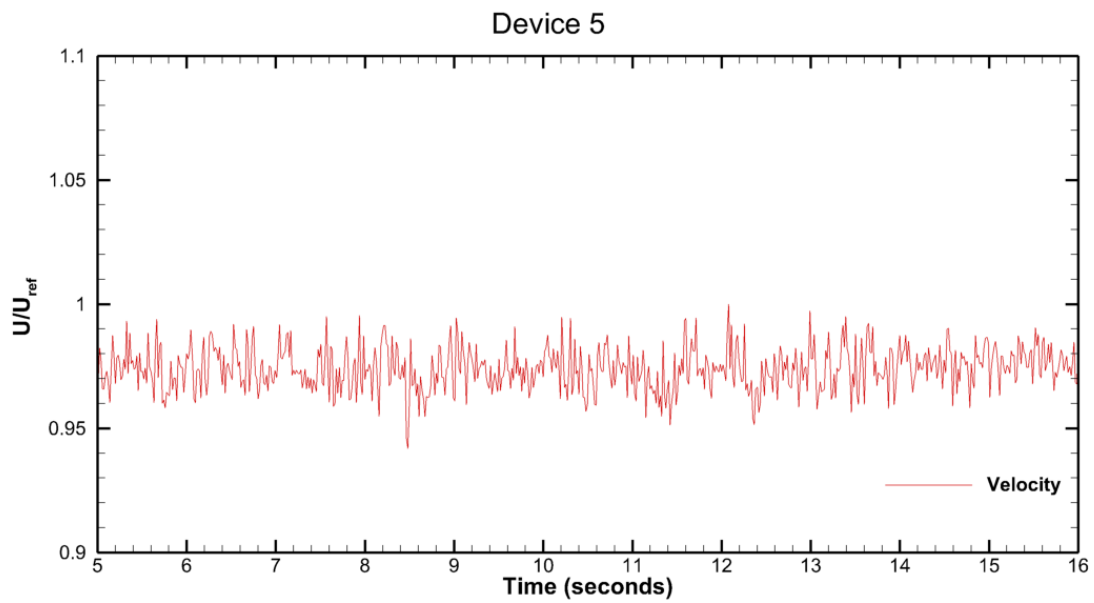
οποία είναι μακριά από τον κύλινδρο, ενώ τοποθετήθηκε και μία δειγματοληψία (Device 19) εντός της ανακυκλοφορίας κατάντη του κυλίνδρου (Πίνακας 4-2). Όσον αφορά τις δειγματοληψίες μακριά από την περιοχή των έντονων διακυμάνσεων, παρατηρείται μία σταθερή τιμή της ταχύτητας κατά το χρονικό διάστημα προσομοίωσης, με μικρές διακυμάνσεις. Όσον αφορά την δειγματοληψία εντός της ανακυκλοφορίας, γίνεται αντιληπτό ότι η διακύμανση είναι έντονη από μείον τέσσερα έως δύο μέτρα το δευτερόλεπτο (-4m/s~2m/s). Παρά το γεγονός αυτό, από το δέκατο δευτερόλεπτο και ύστερα παρατηρείται μία περιοδικότητα της ταχύτητας. Βάσει των παραπάνω είναι πλήρως αποδεκτό ότι η ροή δεν βρίσκεται σε μεταβατικό στάδιο, αλλά στην μόνιμη κατάσταση της. Οι προσομοιώσεις έχουν υπολογιστεί μέχρι τα 16 δευτερόλεπτα καθώς η μέγιστη ταχύτητα ροής είναι 13,16 m/s και το συνολικό μήκος του υπολογιστικού χωρίου είναι 1,28 m. Επομένως, γίνεται αντιληπτό ότι η ροή έχει ολοκληρώσει τουλάχιστον 3 κύκλους.

Πίνακας 4-2 Αδιάστατες συντεταγμένες και μέσες τιμές ταχυτήτων των σημείων δειγματοληψίας.

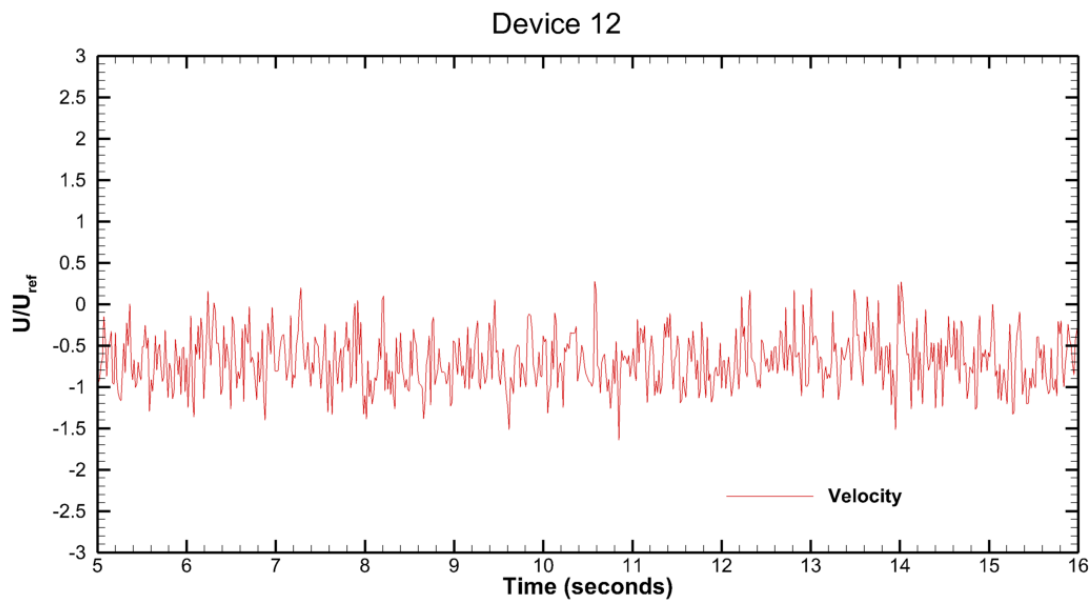
Device number	X/D	Y/D	Z/D	Μέση τιμή
3	1	5.5	3.5	11,31 m/s
5	4	5.5	0.58	8,48 m/s
12	6.5	5.5	0.58	-2,50 m/s
19	14.6	5.5	4.6	10,05 m/s



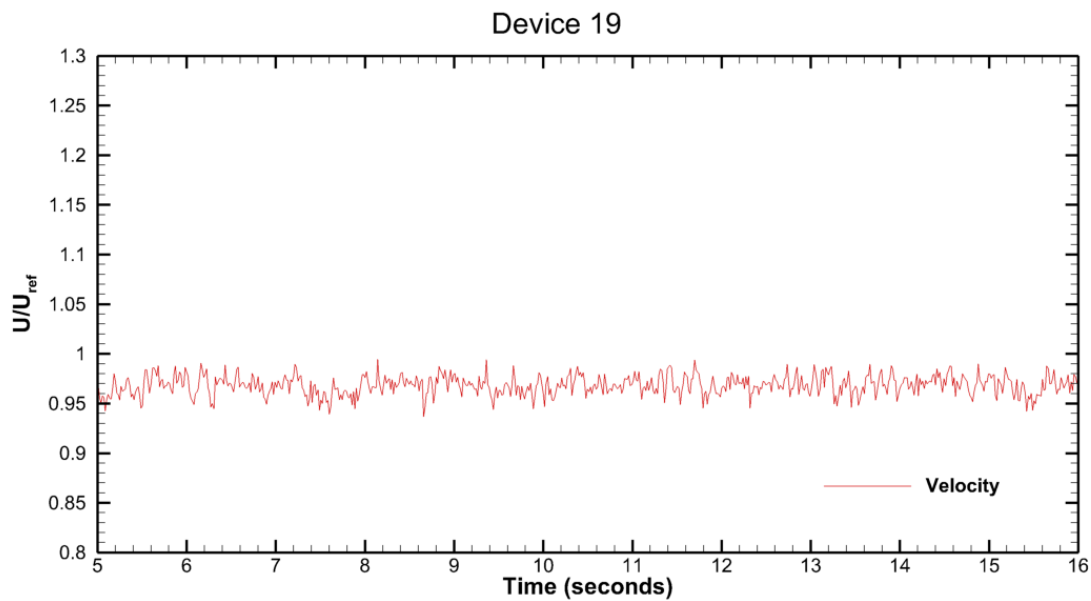
Σχήμα 4-4 Χρονοσειρά του πεδίου ταχύτητας στην θέση 3.



Σχήμα 4-5 Χρονοσειρά του πεδίου ταχύτητας στην θέση 5.



Σχήμα 4-6 Χρονοσειρά του πεδίου ταχύτητας στην θέση 12.



Σχήμα 4-7 Χρονοσειρά του πεδίου ταχύτητας στην θέση 19.

4.4 Ανεξαρτησία Πλέγματος

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω οι εξισώσεις που διέπουν την ροή λύνονται με τη χρήση τεχνικών αριθμητικής ανάλυσης. Η χρήση των τεχνικών αυτών αφορά την αριθμητική προσέγγιση παραγώγων και την αριθμητική επίλυση

συστημάτων, οι οποίες υπάγονται στο πεδίο της γραμμικής άλγεβρας. Ως γνωστόν, κατά την επίλυση διαφορικών εξισώσεων επιδιώκεται σε πρώτη φάση να αποδειχτεί η ύπαρξη της λύσης και σε δεύτερη φάση η μοναδικότητα της λύσης εντός ενός πεδίου ορισμού. Επιλύοντας αριθμητικά είναι σίγουρο ότι το ζήτημα της ύπαρξης λύσης απαλείφεται, καθώς προσεγγίζοντας τις παραγώγους, μέσω του ορίου, το ζήτημα το οποίο μένει είναι αυτό της μοναδικότητας.

Τα παραπάνω κριτήρια είναι ικανά να προσδώσουν αξιοπιστία στα αποτελέσματα των υπολογιστικών προσομοιώσεων, διότι σκοπός είναι να γίνει η περιγραφή της φυσικής του υπό εξέταση φαινομένου. Οι εξισώσεις οι οποίες πρόκειται να επιλυθούν, αποτελούν κομμάτι των μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων με μερικές παραγώγους. Μέχρι και σήμερα, δεν έχουν εφευρεθεί μαθηματικές τεχνικές, οι οποίες να μπορούν να δίνουν αποδεκτές αναλυτικές λύσεις. Για το λόγο αυτό, πρέπει να εξασφαλιστεί, μέσω της αριθμητικής ανάλυσης, ότι προσεγγίζεται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο η φυσική του προβλήματος.

Επομένως, θα γίνει μία ανάλυση ευαισθησίας ως προς την πυκνότητα του πλέγματος. Με αυτό τον τρόπο, θα καταστεί δυνατό να δειχθεί κατά πόσο επηρεάζει ο αριθμός των κελιών την λύση, η οποία προκύπτει από την προσομοίωση. Για τον υπολογισμό των σφαλμάτων θα στηριχθούμε στην εργασία των Chatzimichailidis, Argyropoulos et al. (2019), οι οποίοι πραγματοποιώντας ποιοτικές αναλύσεις και μελετώντας το σφάλμα διακριτοποίησης σε αστικές χαράδρες, ήταν σε θέση να εκτιμήσουν ποιο από τα τρία πλέγματα τα οποία εξέτασαν, απέφερε τελικά την μοναδικότητα της λύσης. Για να δοθεί μια καθαρή εικόνα, θα πρέπει οι θέσεις δειγματοληψίας στις οποίες θα υπολογιστούν τα σφάλματα της διακριτοποίησης, να είναι θέσεις με έντονες διακυμάνσεις. Και αυτό γιατί, σε εκείνες τις θέσεις θα έχουμε δυναμική μεταβολή του μεγέθους που θα συγκρίνουμε.

Η μαθηματική σχέση η οποία χρησιμοποιήθηκε από τους Chatzimichailidis, Argyropoulos et al. (2019) είναι η εξής:

$$GCI = F_S \cdot \frac{e_2 - e_1}{r^p - 1} \quad (4-4)$$

Στην σχέση (4-4) ο συντελεστής F_S καλείται συντελεστής ασφαλείας και η προτεινόμενη τιμή που λαμβάνει είναι ίση με τρία ($F_S=3$), ο αριθμητής του κλάσματος αναφέρεται στις τιμές των μεγεθών δειγματοληψίας (Versteeg and Malalasekera 2007). Τα μεγέθη αυτά μπορεί να είναι η ταχύτητα ή και η συγκέντρωση ενός ρύπου και γενικότερα οποιοδήποτε μέγεθος προκύπτει από την υπολογιστική προσομοίωση. Τέλος, ο παρονομαστής του κλάσματος εμπλέκει τα χαρακτηριστικά του πλέγματος μέσω του r , το οποίο είναι ο λόγος των κελιών του πιο πυκνού πλέγματος προς του πιο αραιού. Ο εκθέτης p , στον οποίο υψώνεται ο λόγος των κελιών, αφορά τον βαθμό του σχήματος διακριτοποίησης, δηλαδή εκφράζει τον αριθμό των κελιών που εμπλέκονται σε κάθε υπολογιστική επανάληψη. Στην περίπτωση του FDS τα σχήματα διακριτοποίησης είναι δευτέρου βαθμού, άρα και $p=2$. Σε αυτό το σημείο να τονιστεί ότι, το σφάλμα διακριτοποίησης GCI αποτελεί έναν δείκτη ο οποίος φανερώνει το μέγεθος των σφαλμάτων κατά την μετάβαση από ένα πλέγμα σε ένα άλλο, διαφορετικής πυκνότητας.

Το μέγεθος το οποίο επιλέχθηκε να συγκριθεί είναι η ταχύτητα και ο λόγος είναι, ότι στις εξισώσεις (3-1)&(3-3) της ορμής (Navier-Stokes) είναι εκείνο το μέγεθος το οποίο γίνεται μη γραμμικό στον όρο της συναγωγής. Οι θέσεις οι οποίες επιλέχθηκαν, προκειμένου να υπάρχει έντονη μεταβολή του μεγέθους της ταχύτητας, είναι στο κέντρο του άνω επιπέδου του κυλίνδρου και μισή διάμετρο (0,5D) από το πίσω μέρος του, γνωρίζοντας ότι σε αυτό το σημείο βρισκόμαστε εντός της ανακυκλοφορίας κατάντη του κυλίνδρου.

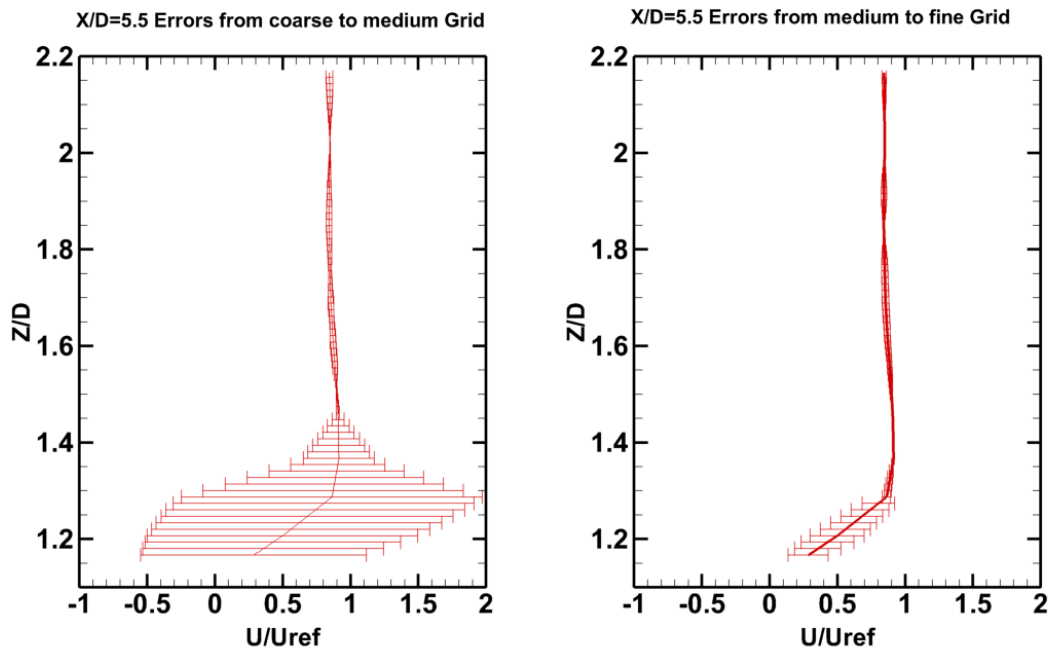
Ο αριθμός των πλεγμάτων που προσομοιώθηκαν προκειμένου να υπάρχει μία καθαρή εικόνα για την επίδραση του αριθμού των κελιών είναι τρία. Ένα πλέγμα αραιό με 1.317.708 κελία, ένα πλέγμα μεσαίου αριθμού κελιών με 1.876.608 κελία και τέλος ένα πυκνό πλέγμα με 2.377.728 κελία. Στον Πίνακα 4-3 συνοψίζονται όλες οι απαραίτητες πληροφορίες, έτσι ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός του σφάλματος διακριτοποίησης.

Πίνακας 4-3 Αριθμός κελιών ανά κατηγορία πλέγματος.

Mesh type	Number of cells
Coarse	1.317.708
Medium	1.876.608
Fine	2.377.728

Στο Σχήμα 4-8 παρουσιάζονται τα σφάλματα διακριτοποίησης του υπολογιστικού χωρίου, μεταβαίνοντας από το αραιό στο μεσαίο πλέγμα για το αριστερό γράφημα και αντίστοιχα από το μεσαίο στο πυκνό για το γράφημα στα δεξιά. Ξεκινώντας από το γράφημα στα αριστερά, φαίνεται ότι στην περιοχή λίγο πάνω από το άνω τοίχωμα του κυλίνδρου τα σφάλματα λαμβάνουν την μέγιστη τιμή τους. Αυτό οφείλεται στο έντονο πεδίο ταχυτήτων, καθώς όπως θα δειχτεί παρακάτω στο σημείο εκείνο έχουμε αποκόλληση του οριακού στρώματος. Είναι, λοιπόν, εμφανές ότι στην μετάβαση αραιό σε μεσαίο πλέγμα χάνεται αρκετή πληροφορία στο σημείο αποκόλλησης, διαφοροποιώντας σημαντικά το πεδίο ταχύτητας μεταξύ των δύο προσομοιώσεων.

Καθώς η δειγματοληψία συνεχίζεται κατά το ύψος και πλέον έχουμε εισέλθει στην περιοχή της αδιατάρακτης ροής, τα σφάλματα ελαχιστοποιούνται και τείνουν να ταυτιστούν με το προφίλ ταχύτητας. Αντίθετα, στην μετάβαση από μεσαίο σε πυκνό πλέγμα παρατηρείται μία διαφορετική εικόνα. Όπως ήταν αναμενόμενο, τα σφάλματα στην αποκόλληση του οριακού στρώματος είναι υπαρκτά αλλά σε βαθμό ο οποίος μπορεί να είναι αποδεκτός. Επίσης, παρατηρείται μια συμμετρία στις μπάρες σφαλμάτων, κάτι το οποίο δείχνει ότι τα σφάλματα, ουσιαστικά, διακυμαίνονται μέσα σε ένα εύρος τιμών, σε αντίθεση με το γράφημα στα αριστερά. Συνεχίζοντας πάλι την δειγματοληψία πάνω από το ύψος της αποκόλλησης, βλέπουμε μία ταύτιση των σφαλμάτων με το προφίλ ταχύτητας, η οποία, όμως είναι πιο έντονη και αυστηρά πλησίον του προφίλ της ταχύτητας. Αυτό συνεπάγεται, ότι η πληροφορία που χάθηκε είναι, τελικά, το σφάλμα αποκοπής και οφείλεται καθαρά στις αριθμητικές τεχνικές επίλυσης.

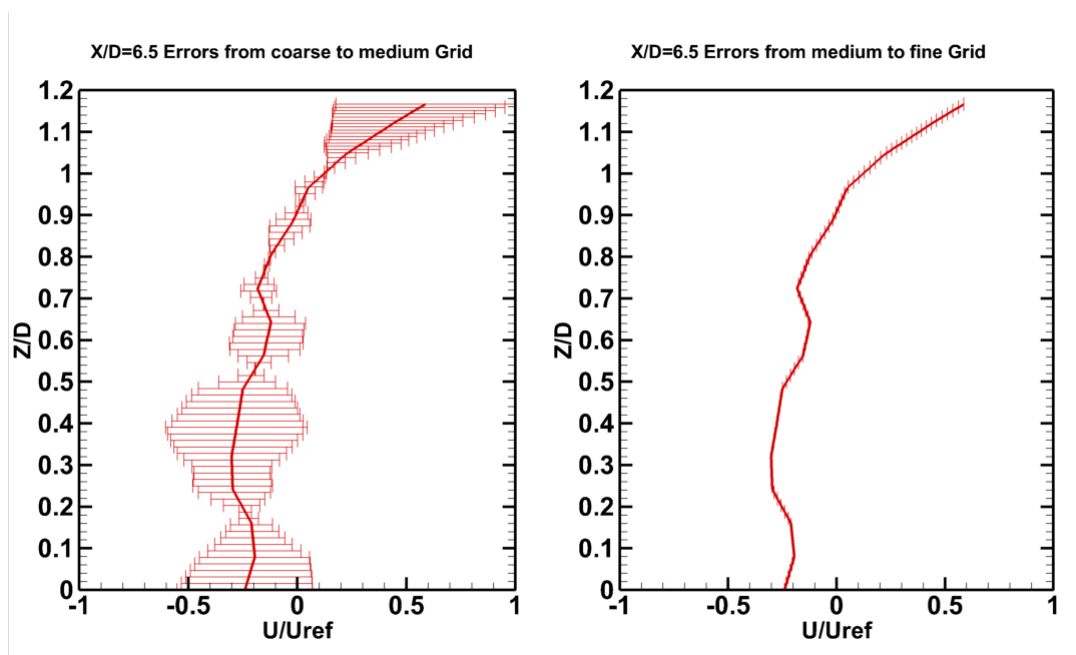


Σχήμα 4-8 Υπολογισμός σφαλμάτων διακριτοποίησης για το κατακόρυφο προφίλ της U/U_{ref} στην θέση X/D 5,5.

Στο Σχήμα 4-9 έχουν υπολογιστεί τα σφάλματα διακριτοποίησης σε απόσταση μισής διαμέτρου ($0,5D$) κατάντη του κυλίνδρου. Όπως είναι κατανοητό, πρόκειται για μία περιοχή έντονων διακυμάνσεων ως προς το πεδίο ταχυτήτων και αποτελεί ιδανικό σημείο ελέγχου λόγω αυτών των διακυμάνσεων. Αρχίζοντας από την μετάβαση του αραιού πλέγματος προς το μεσαίο, παρατηρείται η ύπαρξη σχετικών σφαλμάτων, τα οποία είτε είναι θετικά είτε αρνητικά. Η κατανομή τους γύρω από το προφίλ ταχύτητας είναι αρκετά άστατη, γεγονός που σημαίνει ότι τα σφάλματα δεν υπάγονται εντός ενός εύρους τιμών. Επίσης, παρατηρείται η μεγιστοποίηση των σφαλμάτων, όσο η δειγματοληψία φτάνει στο ανώτατο ύψος του κυλίνδρου.

Κατ' επέκταση, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι χάνεται η πληροφορία τόσο εντός της ανακυκλοφορίας, όσο και στο ύψος του κυλίνδρου, όπου είναι το σημείο επαφής μεταξύ αδιατάραχτης ροής και της θολωτής δίνης. Όσον αφορά την μετάβαση από μεσαίο σε πυκνό, είναι αρκετά ξεκάθαρο ότι πρόκειται για σφάλματα αποκοπής, τα οποία οφείλονται στην αριθμητική επίλυση του συστήματος των διαφορικών εξισώσεων. Καθ' όλο το ύψος δειγματοληψίας, το

μεσαίο πλέγμα δίνει ακριβή εικόνα του πεδίου ροής, δίχως να χάνεται χρήσιμη πληροφορία.



Σχήμα 4-9 Υπολογισμός σφαλμάτων διακριτοποίησης για το κατακόρυφο προφίλ της U/U_{ref} στη θέση X/D 6,5.

Συνοψίζοντας, το μεσαίο πλέγμα είναι ιδανικό για να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του πεδίου ροής περιγράφοντας σε ικανοποιητικό βαθμό την φυσική, χωρίς να αλλοιώνει την πληροφορία των προσομοιώσεων. Για το λόγο αυτό, θα αναλυθούν τα αποτελέσματα του μεσαίου πλέγματος σκεπτόμενοι το υπολογιστικό κόστος, καθώς από όσα περισσότερα κελιά αποτελείται ένα υπολογιστικό χωρίο, τόσο ο χρόνος που απαιτείται για την επίλυση του αυξάνει εκθετικά.

4.5 Κατακόρυφα ισούψης γραφήματα

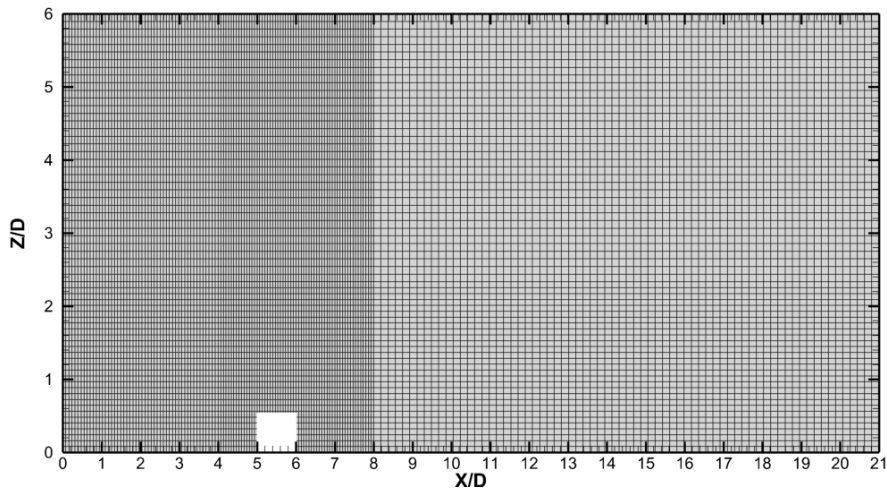
Έχοντας πλέον διασφαλίσει ότι τα υπολογιζόμενα μεγέθη δίνουν την ακριβή περιγραφή του πεδίου ροής, πλέον μπορεί να γίνει η ποσοτική ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Στο Σχήμα 4-10 παρουσιάζεται η διακριτοποίηση του υπολογιστικού χωρίου βάσει του μεσαίου πλέγματος, το οποίο επιλέχθηκε ως το ιδανικότερο στο προηγούμενο εδάφιο. Γίνεται αντιληπτό ότι, η πύκνωση των κελίων ανάντη του

κυλίνδρου οφείλεται στην ανάγκη της ομοιομορφίας των μεταβάσεων. Όταν εφαρμόζουμε επιφανειακά τις οριακές συνθήκες τύπου Neuman ή Dirichlet σε αρκετά αραιό πλέγμα, τότε υπάρχει ο κίνδυνος ταλαντώσεων κατά την διάρκεια της προσομοίωσης και σαν αποτέλεσμα αυτή να αποκλίνει από ένα σημείο επαναλήψεων και ύστερα. Στις προσομοιώσεις μη ιδεατών ροών, σπάνια η ταχύτητα στις επιφάνειες όπου εφαρμόζονται οι οριακές συνθήκες έχουν ομοιόμορφη κατανομή. Συνήθως, πρόκεινται για λογαριθμικές ή εκθετικές μαθηματικές σχέσεις.

Οι αρχικοποιημένες τιμές εφαρμόζονται βάσει της χωρικής μεταβλητής στα κέντρα των κελίων. Αν δεν υφίστανται αρκετά κελία, η χωρική διακριτοποίηση της μαθηματικής σχέσης θα παρουσιάζει μεγάλες αλλαγές από κελί σε κελί, δημιουργώντας έτσι υπολογιστική αστάθεια στο μητρώο, το οποίο θα επιλυθεί αριθμητικά. Σε αντίθεση, η πύκνωση μειώνεται μετά τις δύο διαμέτρους (2D) κατάντη του κυλίνδρου και αυτό είναι απολύτως λογικό, καθώς οι διακυμάνσεις της ταχύτητας είναι σχεδόν αμελητέες, όντας στην αδιατάρακτη ροή.

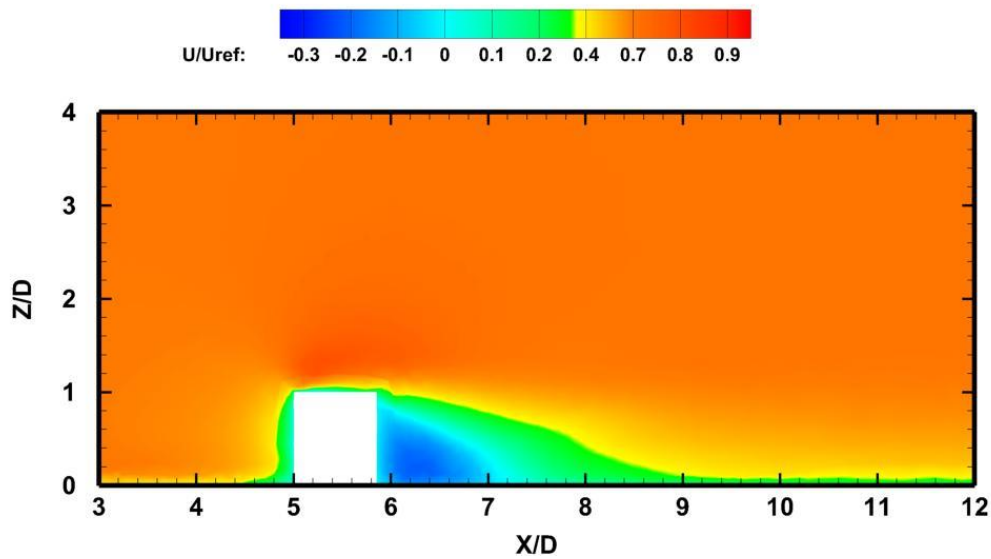
Αξίζει να τονιστεί ότι, ένας ορθολογιστικός τρόπος κατανομής των κελιών σε ένα υπολογιστικό χωρίο μπορεί να δώσει όλη την πληροφορία που χρειάζεται για την ποσοτική ανάλυση, αλλά και να αποκόψει τα σημεία τα οποία δεν παρουσιάζουν το μέγιστο ενδιαφέρον. Αυτός ο ορθολογισμός οδηγεί σε προσομοιώσεις οι οποίες είναι υπολογιστικά συμφέρουσες.



Σχήμα 4-10 Απεικόνιση του υπολογιστικού πλέγματος στο κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας.

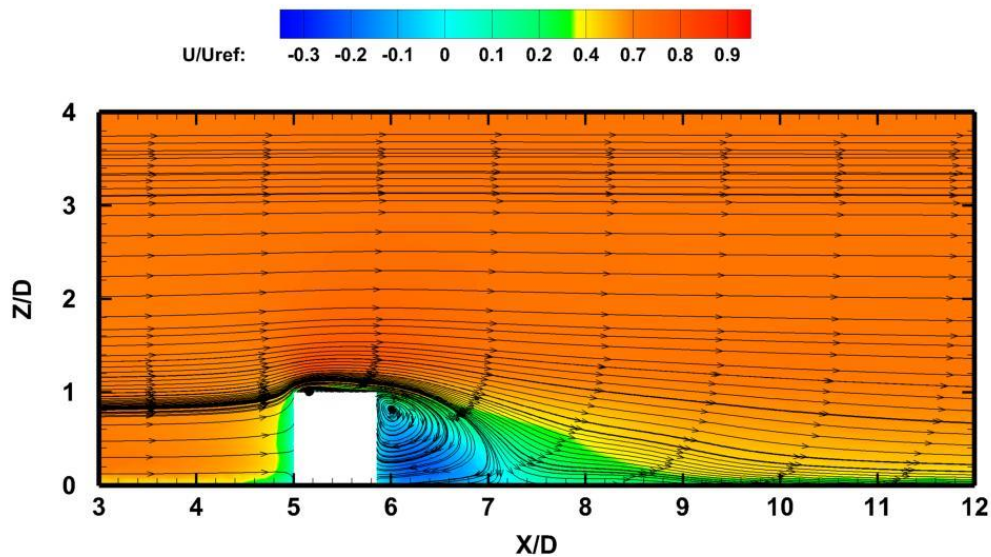
Η μορφολογία της ροής αποτυπώνεται στο Σχήμα 4-11. Όσον αφορά τις μέσες τιμές των ταχυτήτων, στην εμπρόσθια επιφάνεια του κυλίνδρου εντοπίζεται ένα σημείο ανακοπής το οποίο δημιουργεί ένα έντονο πεδίο ταχυτήτων στην γύρω περιοχή. Αυτό οφείλεται στην ασυμπίεστοτητα της ροής, καθώς ο αριθμός Mach είναι μικρότερος του 0,3. Έτσι, αυτό το σημείο ανακοπής επηρεάζει την διαφορική πίεση στην γύρω περιοχή και, ενόσω ο αλγόριθμος πρόβλεψης- διόρθωσης χρησιμοποιεί την πίεση για τον υπολογισμό του πεδίου ταχύτητας, κατ' επέκταση επηρεάζεται και το ίδιο το πεδίο. Στο άνωθεν μέρος του κυλίνδρου δημιουργείται η αποκόλληση του οριακού στρώματος, δημιουργώντας μία δίνη. Συνέπεια αυτής της δίνης είναι η συμβολή της στην ορμή του ρευστού σε εκείνο το σημείο, διότι αποτελεί το πρώτο σημείο επαφής στο συγκεκριμένο ύψος.

Τέλος, η ορμή του ρευστού που έχει εξασθενήσει ελάχιστα, δημιουργεί μία δίνη στο πίσω μέρος του κυλίνδρου. Στο σημείο επαφής μεταξύ της δίνης και της αδιατάρακτης ροής πλέον ανταλλάσσονται ποσά ενέργειας, λόγω του ιξώδους του ατμοσφαιρικού αέρα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, όσο αυξάνεται η απόσταση από το πίσω μέρος του κυλίνδρου, οι εφαιπόμενες ταχύτητες να ελαττώνουν το μέτρο τους. Το ιξώδες, λοιπόν, αποτελεί το κύριο παράγοντα μείωσης της ορμής στην περιοχή του κυλίνδρου.



Σχήμα 4-11 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα του πεδίου ροής στο επίπεδο συμμετρίας.

Οι ροϊκές γραμμές του δισδιάστατου πεδίου ροής δίνονται στο Σχήμα 4-12. Οι γραμμές ροής αποτελούν το εφαπτομενικό διάνυσμα της ταχύτητας, παρέχοντας έτσι την δυνατότητα εξακρίβωσης της φοράς της ροής, καθώς και της οπτικοποίησης της. Στο σημείο ανακοπής, ανάντη του κυλίνδρου παρατηρείται μία μικρή δίνη στο έμπροσθεν σημείο. Αυτό αποτελεί αποτέλεσμα της πρόσπτωσης του προφίλ ταχύτητας στην μπροστινή επιφάνεια του κυλίνδρου. Έτσι, προκειμένου να ικανοποιείται η εξίσωση της συνέχειας (3-2), μία ποσότητα του αέρα εγκλωβίζεται και ανακυκλοφορεί. Στο πάνω μέρος του κυλίνδρου παρατηρείται αποκόλληση του οριακού στρώματος, κάτι το οποίο υποδηλώνεται και από την πυκνότητα των γραμμών ροής. Στο πίσω σημείο εκδηλώνεται η ύπαρξη μιας αναμενόμενης δίνης, η οποία έχει φορά περιστροφής αντίθετη από αυτή της ροής.



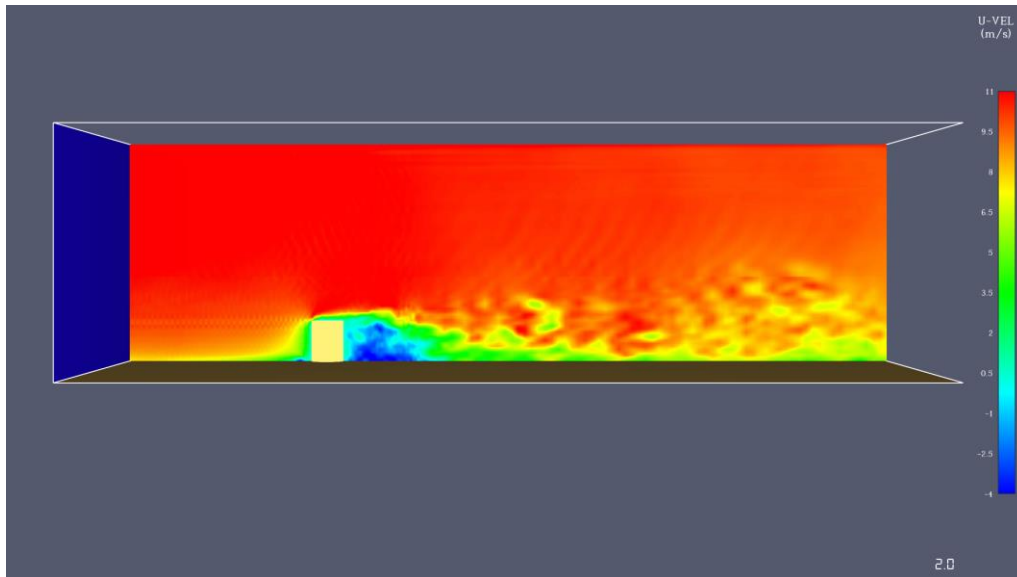
Σχήμα 4-12 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα με ροϊκές γραμμές του πεδίου ροής στο επίπεδο συμμετρίας.

Στον Πίνακα 4-4 δίδονται οι αδιάστατες συντεταγμένες του κέντρου της θολωτής δίνης κατάντη του κυλίνδρου. Γίνεται αντιληπτό, ότι λόγω του μεγάλου μέτρου των ταχυτήτων, οι οποίες διέρχονται από τις φυσικές επιφάνειες του κυλίνδρου, η δίνη παρουσιάζει μικρό μήκος στον οριζόντιο αδιάστατο άξονα (X/D), αλλά και σχετικά υψηλό κέντρο ως προς τον κατακόρυφο άξονα (Z/D).

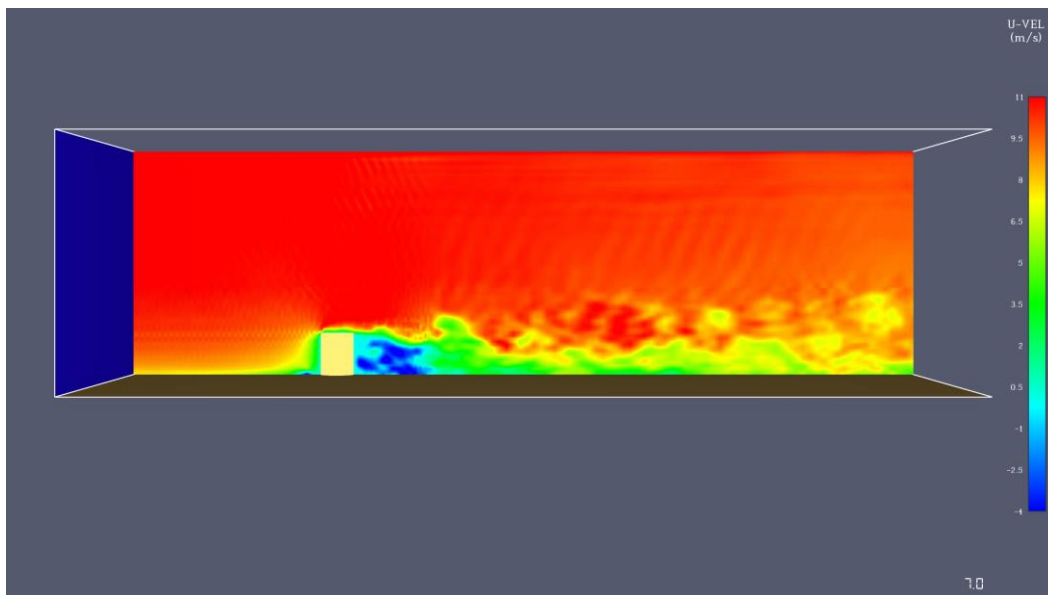
Πίνακας 4-4 Πίνακας με τις συντεταγμένες του κέντρου της θολωτής δίνης.

Αδιάστατος άξονας	Σημείο κέντρου
X/D	6,2
Z/D	0,8

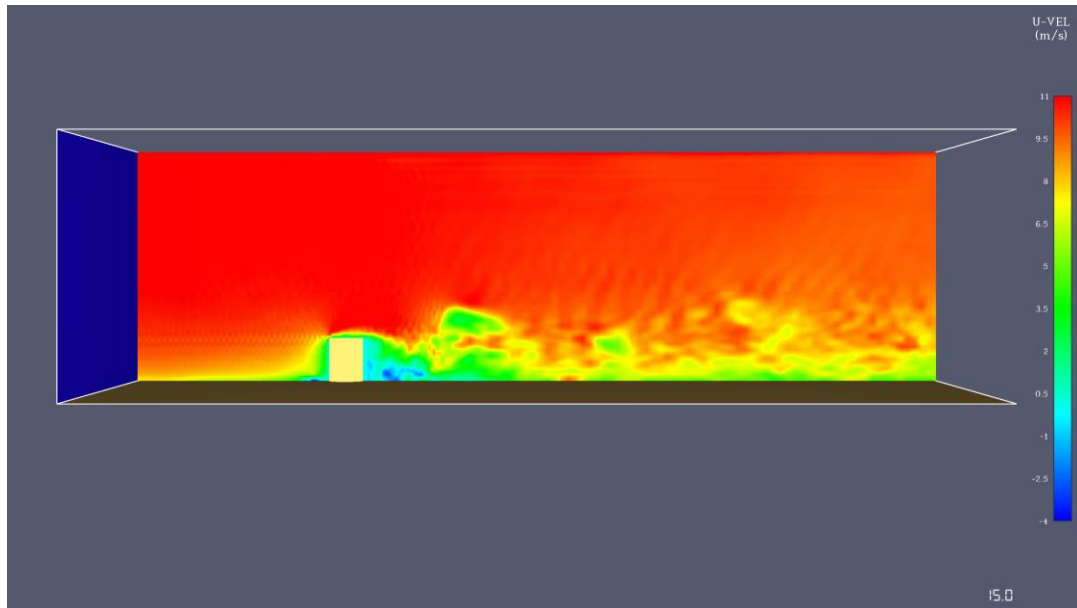
Στα Σχήμα 4-13, Σχήμα 4-14 και Σχήμα 4-15 δίδονται τα ισοϋψή γραφήματα των ολικών ταχυτήτων, που εμπεριέχουν το άθροισμα της μέσης τιμής και της διακύμανσης της ταχύτητας. Και στα τρία σχήματα παρατηρείται ένα σχετικά έντονο πεδίο ροής, το οποίο δεν ακολουθεί αυτό των μέσων τιμών. Είναι ξεκάθαρο, λοιπόν, ότι οι διακυμάνσεις είναι αρκετά έντονες και υπολογίσιμες.



Σχήμα 4-13 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα του πεδίου ροής στο επίπεδο συμμετρίας για τη χρονική στιγμή $t=2s$.



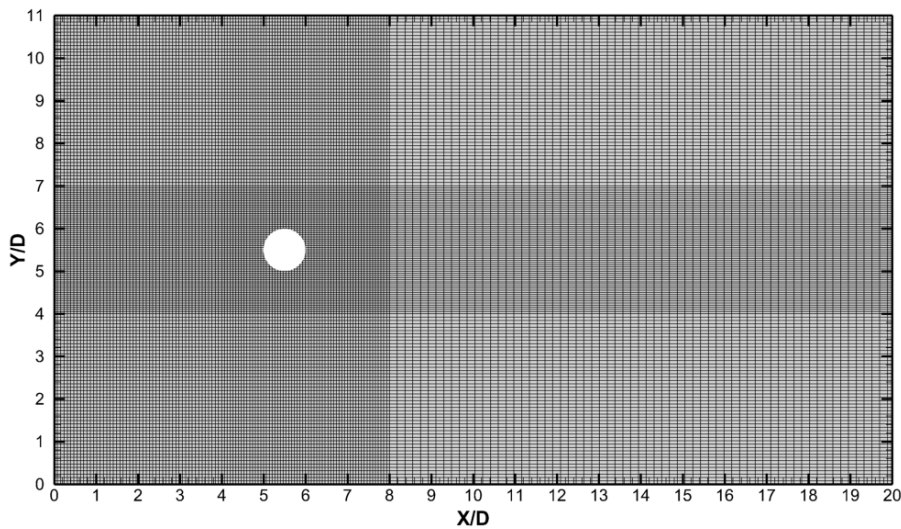
Σχήμα 4-14 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα του πεδίου ροής στο επίπεδο συμμετρίας για τη χρονική στιγμή $t=7s$.



Σχήμα 4-15 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα του πεδίου ροής στο επίπεδο συμμετρίας για τη χρονική στιγμή $t=15s$.

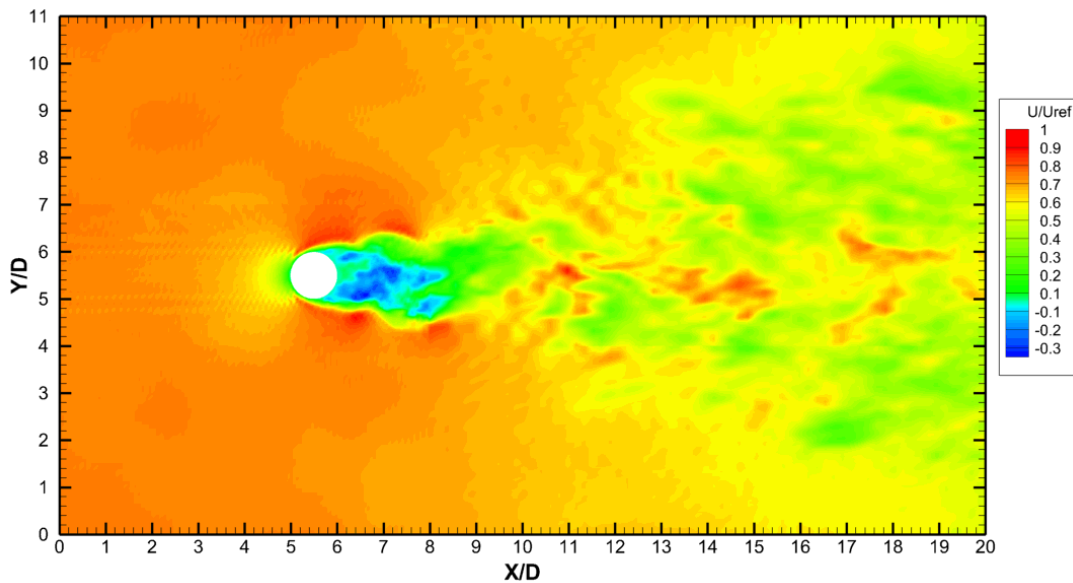
4.6 Οριζόντια ισοϋψή γραφήματα

Σε συνέχεια της ποσοτικής ανάλυσης στο Σχήμα 4-16 δίδεται το οριζόντιο γράφημα του πλέγματος βάσει του οποίου θα σχολιαστούν τα αποτελέσματα παρακάτω. Και εδώ παρατηρούνται δύο περιοχές πύκνωσης, μίας έντονης και μία αραιής. Ο λόγος παραμένει ίδιος με παραπάνω, δηλαδή ότι το σημείο ενδιαφέροντος είναι ανάντη του κυλίνδρου και κατάντη για συγκεκριμένη απόσταση. Με αυτό το τρόπο επιτυγχάνεται προσομοίωση υπολογιστικά βιώσιμη. Παρατηρείται μία λωρίδα έντονης πύκνωσης, για όσο το δυνατό αναλυτικότερη λύση του απορρεύματος.



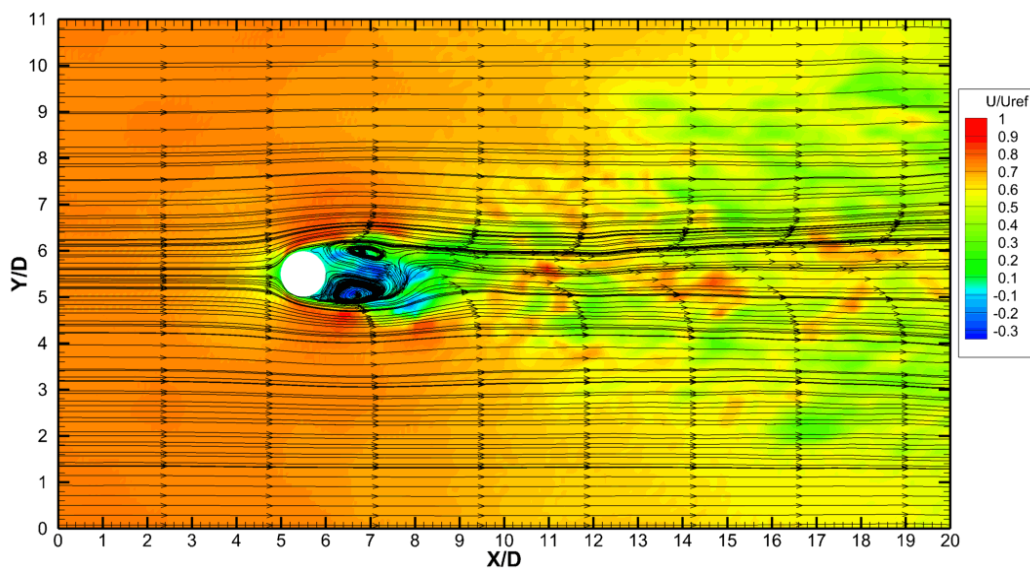
Σχήμα 4-16 Οριζόντιο γράφημα διακριτοποίησης του πεδίου ροής για $Z/D=0,5$.

Το ισουψές γράφημα παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-17. Αρχικά, γίνεται αντιληπτό το έντονο πεδίο ταχυτήτων στο σημείο ανακοπής εμπροσθεν του κυλίνδρου, αλλά και η προσκόλληση του ρευστού στην επιφάνεια περιμετρικά του σημείου ανακοπής. Από ένα σημείο και ύστερα, η ορμή του ρευστού έχει μειωθεί σε τέτοιο βαθμό, ώστε να αποκολλάται το οριακό στρώμα. Σε κάθε περίπτωση, το πεδίο ταχυτήτων έχει μεγάλη τιμή στην είσοδο, δημιουργώντας έτσι μόνο μια μικρή περιοχή αποκόλλησης στο πίσω μέρος. Κατόντη του κυλίνδρου είναι εμφανής μία περιοχή έντονων διακυμάνσεων της ταχύτητας, αφού αποτελεί την περιοχή του απορρεύματος.



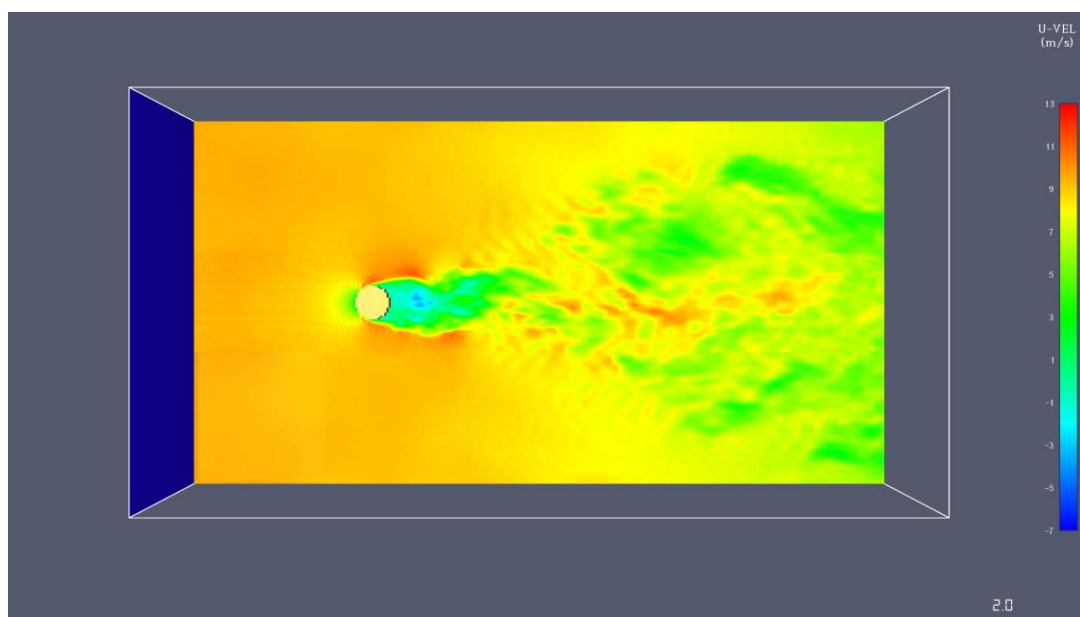
Σχήμα 4-17 Οριζόντιο ισοϋψές γράφημα του πεδίου ροής για $Z/D=0,5$.

Και σε αυτή την περίπτωση θα βοηθήσει αρκετά η οπτικοποίηση των γραμμών ροής, προκειμένου να γίνει πιο ξεκάθαρη η δομή της. Στο Σχήμα 4-18 υπάρχει μία έντονη περιοχή σε σχήμα έλλειψης κατάντη του κυλίνδρου, που σχηματίζεται από δύο δίνες, προερχόμενες από την αποκόλληση του οριακού στρώματος, λόγω απώλειας ορμής. Οι δύο αυτές δίνες είναι η κύρια αιτία δημιουργίας των έντονων διακυμάνσεων του πεδίου ταχύτητας. Τέλος, το ζευγάρι δινών οριοθετεί, ουσιαστικά, την θολωτή δίνη που αναλύθηκε στο Σχήμα 4-12, καθώς το πεδίο της πίεσης είναι αρκετά έντονο στο σημείο αυτό.

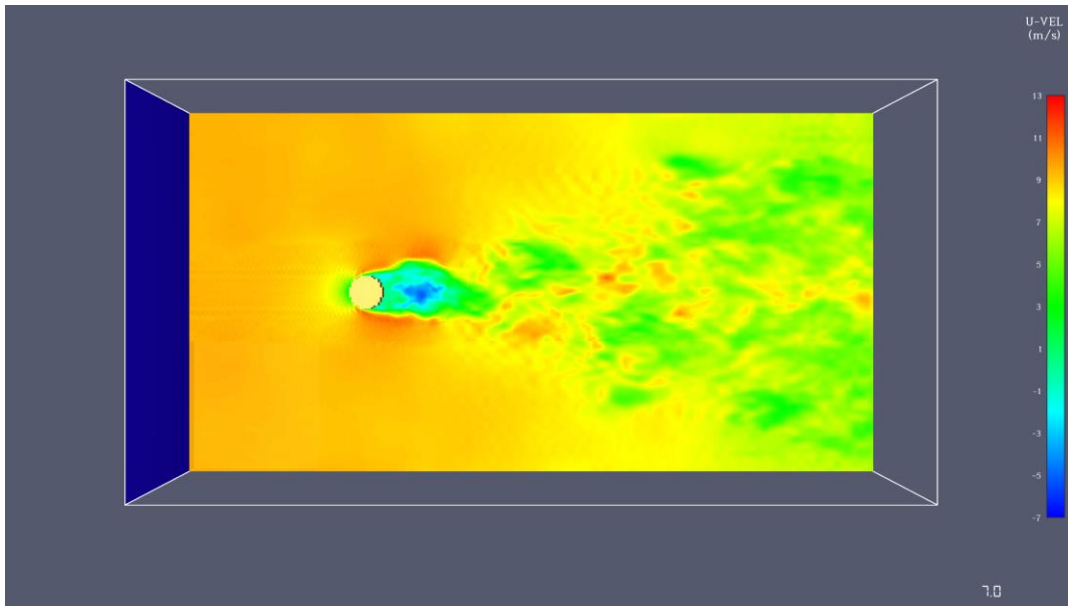


Σχήμα 4-18 Οριζόντιο ισοϋψές γράφημα με ροϊκές γραμμές του πεδίου ροής για $Z/D=0,5$.

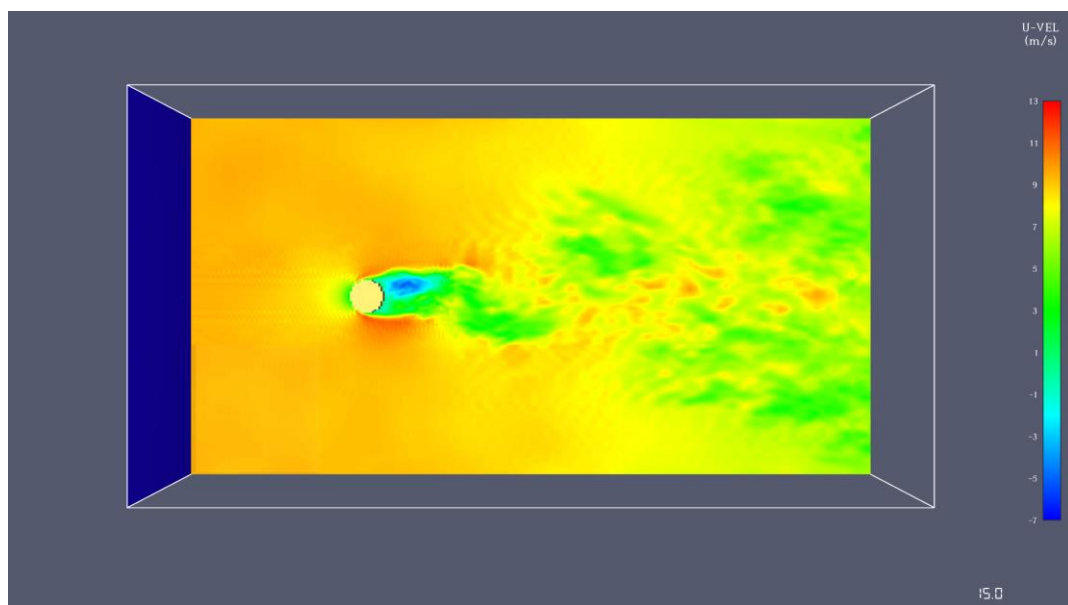
Στα Σχήμα 4-19, Σχήμα 4-20 και Σχήμα 4-21 παρουσιάζονται τα ισοϋψή γραφήματα των ολικών ταχυτήτων για το κατακόρυφο επίπεδο. Εδώ γίνεται αντιληπτό, ότι στα γραφήματα αυτά σε σχέση με αυτά των μέσων τιμών οι τιμές των ταχυτήτων είναι αρκετά κοντά, συνεπάγοντας ότι οι διακυμάνσεις στον άξονα Z/D είναι αρκετά μικρές.



Σχήμα 4-19 Οριζόντιο ισοϋψές γράφημα του πεδίου ροής για $Z/D=0,5$ για τη χρονική στιγμή $t=2s$.



Σχήμα 4-20 Οριζόντιο ισοϋψές γράφημα του πεδίου ροής για $Z/D=0,5$ για τη χρονική στιγμή $t=7s$.



Σχήμα 4-21 Οριζόντιο ισοϋψές γράφημα του πεδίου ροής για $Z/D=0,5$ για τη χρονική στιγμή $t=15s$.

4.7 Ποιοτική ανάλυση

4.7.1 Υπολογισμός αδιάστατου συντελεστή πίεσης

Στο εδάφιο αυτό θα αναλυθεί το πρώτο μέρος της ποιοτικής ανάλυσης πάνω στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Με τον όρο ποιοτική ανάλυση

χαρακτηρίζεται η επαλήθευση των αποτελεσμάτων με συντελεστές ή μεγέθη τα οποία δεν υπολογίζονται από την προσομοίωση και δεν αποτελούν φυσικά μεγέθη. Η χρήση τους αποτελεί δείκτη για την πορεία μίας έρευνας, μέσω μαθηματικών εργαλείων ή αδιάστατων συντελεστών, όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω.

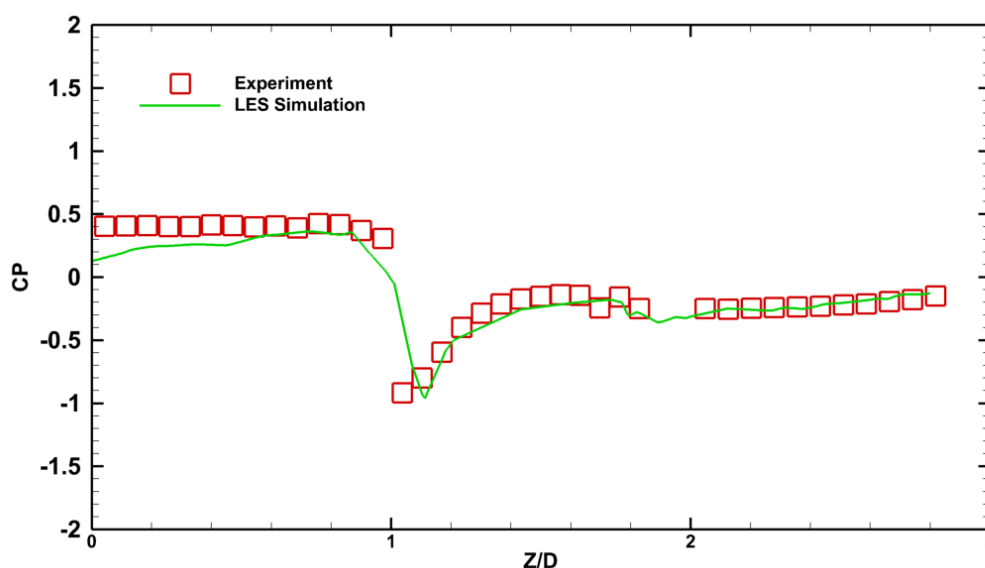
Στο Σχήμα 4-22 παρουσιάζεται η σύγκριση του πειραματικού συντελεστή πίεσης (C_p) με αυτό τον οποίο λάβαμε από τις υπολογιστικές προσομοιώσεις. Ο συντελεστής πίεσης (C_p) εκφράζει την κατανομή της δυναμικής πίεσης στην επιφάνεια ενός αντικειμένου το οποίο είναι βυθισμένο σε ένα ρευστό (3-13). Η πίεση η οποία λαμβάνεται, οφείλεται στην μεταβολή της κίνησης του ρευστού, έχοντας αφαιρέσει την θερμοδυναμική πίεση. Είναι ένας αρκετά χρήσιμος δείκτης, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των κάθετων δυνάμεων στην επιφάνεια κτιρίων, άρα και κατ' επέκταση για τον υπολογισμό της στατικότητας μίας κατασκευής. Επιπροσθέτως, θα χρησιμοποιηθεί και για την επικύρωση των υπολογιστικών προσομοιώσεων με πειραματικές μετρήσεις, όπως και θα πραγματοποιηθεί και στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Όπως διαφαίνεται, στον αριθμητή της εξίσωσης (3-13) υφίσταται η διαφορά ολικής πίεσης με την στατική, όσο αφορά το κομμάτι των προσομοιώσεων, εφόσον έχουμε κάνει την υπόθεση ισοθερμοκρασιακής ροής (η θερμοδυναμική πίεση δεν λαμβάνεται υπόψιν). Η πίεση η οποία υπολογίζεται στα κέντρα των κελιών αποτελεί την δυναμική. Στο πειραματικό μέρος, η μέτρηση της δυναμικής πίεσης πραγματοποιείται με τη χρήση σωλήνα Pitot, συνδέοντας σε αυτόν την υποδοχή των οπών μόνο της στατικής πίεσης στο μικρομανόμετρο. Λαμβάνοντας σαν ένδειξη την διαφορική πίεση μεταξύ των οπών του Pitot και των οπών στη επιφάνεια του πειραματικού κυλίνδρου, υπολογίζεται η επίδραση της δυναμικής πίεσης. Στον παρανομαστή υπάρχει ο ορισμός της δυναμικής πίεσης όπως αυτός ορίζεται από την εξίσωση του Bernoulli, απαλείφοντας την θερμοδυναμική και την υδροστατική πίεση καθώς, επηρεάζουν αμελητέα την ολική διαφορική πίεση.

Συγκριτικά με τις πειραματικές μετρήσεις, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-22, στο εμπρόσθιο σημείο υπάρχει μία ελαφριά απόκλιση μεταξύ της υπολογιστικής

προσομοίωσης και των μετρήσεων, γεγονός το οποίο οφείλεται στο μέγεθος των πρώτων κελιών του πλέγματος. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, χρησιμοποιήθηκε το μεσαίο πλέγμα για εξοικονόμηση υπολογιστικών πόρων. Στο επάνω και πίσω μέρος του κυλίνδρου γίνεται εμφανές ότι, η καμπύλη ακολουθεί πλήρως τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από τις πειραματικές μετρήσεις. Όπως είναι λογικό, προκύπτουν ελάχιστες αποκλίσεις και στον προηγούμενο παράγοντα που αναφέρθηκε για το εμπρόσθιο μέρος, αλλά και στο γεγονός ότι οι εξισώσεις της ροής λύνονται αριθμητικά και υπάρχει πάντα το σφάλμα αποκοπής. Στην παρούσα περίπτωση είναι αρκετά μικρό, όπως επιβεβαιώνεται από το Σχήμα 4-22.

Κλείνοντας το εδάφιο της ποιοτικής ανάλυσης, η σύγκλιση των υπολογιστικών προσομοιώσεων είναι ικανοποιητική και δίνει μία αρκετά αναλυτική εικόνα του πραγματικού πεδίου ροής.



Σχήμα 4-22 Σύγκριση αδιάστατου συντελεστή πίεσης υπολογιστικής προσομοίωσης και πειραματικών δεδομένων.

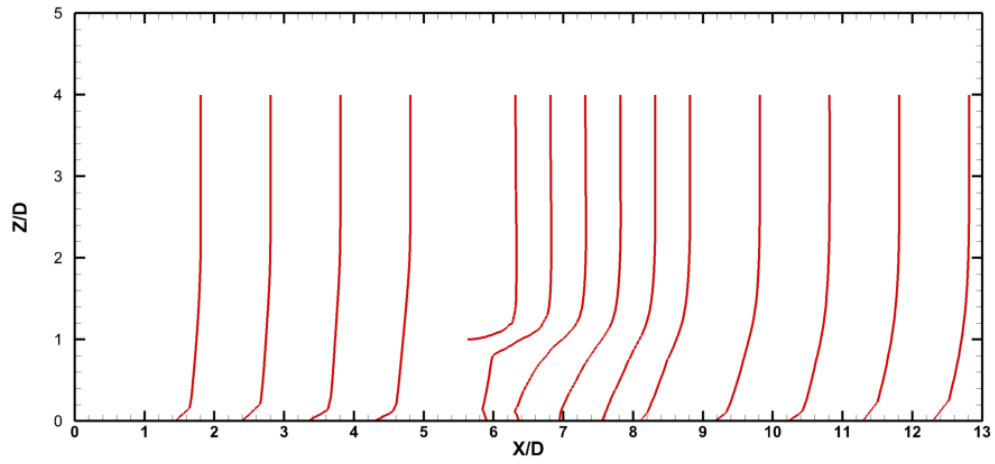
4.7.2 Κατακόρυφα γραφήματα αδιάστατων ταχυτήτων κατόντη του κυλίνδρου

Στο παρόν υποκεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί μία ποιοτική ανάλυση των προφίλ ταχυτήτων κατά το μήκος του οριζόντιου άξονα X στο κατακόρυφο επίπεδο

συμμετρίας. Στο Σχήμα 4-23 δίδεται η κατανομή των ταχυτήτων. Στις πρώτες τέσσερις κατανομές παρατηρείται ομοιότητα με το παραβολικό προφίλ εισόδου, όπως είχε τεθεί ως οριακή συνθήκη. Αυτό είναι αρκετά σημαντικό, καθώς γίνεται ξεκάθαρο ότι οι διαστάσεις του πεδίου ροής δεν επηρεάζουν τη φυσική της ροής. Εν συνεχεία, στην πέμπτη κατανομή παρουσιάζεται αισθητή μεταβολή, καθώς στο σημείο αυτό υφίσταται αποκόλληση του οριακού στρώματος, με το πεδίο των ταχυτήτων να είναι έντονο, λόγω της ανακυκλοφορίας που δημιουργείται στο άνω μέρος του κυλίνδρου.

Εξαιτίας των υψηλών ταχυτήτων που επικρατούν, δεν υπάρχει επανακόλληση. Ως αποτέλεσμα, το ρεύμα της αδιατάραχτης ροής πάνω από τον κύλινδρο επιταχύνεται, προκειμένου να ικανοποιείται η εξίσωση της συνέχειας (3-2). Επίσης, αποτέλεσμα της αύξησης των ταχυτήτων του ρεύματος της αδιατάραχτης ροής πάνω από τον κύλινδρο είναι η οριοθέτηση, όσον αφορά το ύψος της ανακυκλοφορίας κατόντη του κυλίνδρου. Στις επόμενες 5 κατανομές, μετά την πίσω επιφάνεια του κυλίνδρου, γίνεται αντιληπτό ότι οι μορφές τους επηρεάζονται από την παρουσία της ανακυκλοφορίας, για $Z/D \geq 1$. Το μέρος κατόντη του κυλίνδρου επηρεάζεται από μία κύρια ανακυκλοφορία, η οποία φτάνει μέχρι το ένατο προφίλ του γραφήματος.

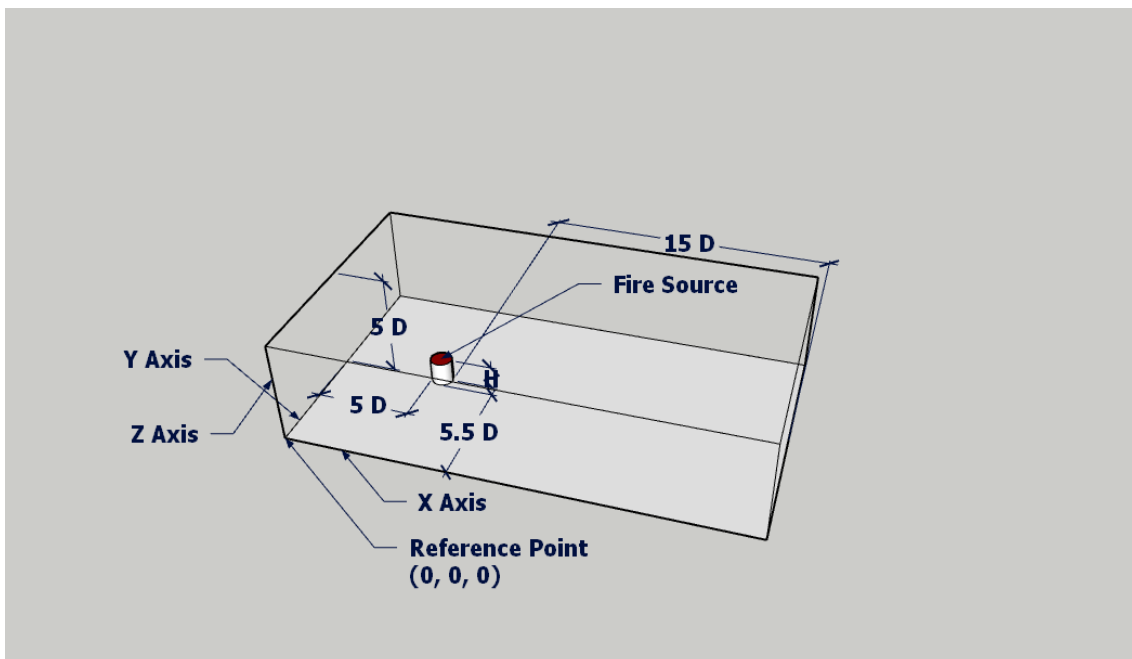
Τα προφίλ αυτά των ταχυτήτων διαφέρουν από αυτά της εισόδου, καθώς παρουσιάζουν αλλαγή στην διεύθυνση τους κατά το ύψος. Γίνεται αντιληπτό ότι αυτή η αλλαγή της διεύθυνσης αποτελεί εικόνα της ανακυκλοφορίας αυτής. Μεταξύ 8D και 9D παρατηρείται το τέλος της ανακυκλοφορίας, αφού πλέον διαφαίνεται στις εναπομένουσες κατανομές η επαναφορά του παραβολικού προφίλ ταχυτήτων. Επομένως, από ~9D και άνω συμπεραίνεται πως η ροή δεν επηρεάζεται πλέον από την ύπαρξη της γεωμετρίας του κυλίνδρου. Το προφίλ πλέον αποκτά την παραβολική του μορφή θυμίζοντας τη ροή πάνω από επίπεδη πλάκα. Πλέον, η ροή δεν είναι στο σημείο ενδιαφέροντος, καθώς η γεωμετρική ύπαρξη του κυλίνδρου δεν επηρεάζει το πεδίο των ταχυτήτων.



Σχήμα 4-23 Προφίλ ταχυτήτων κατά το οριζόντιο άξονα του πεδίου ροής στο επίπεδο συμμετρίας.

5 Προσομοίωση ατυχήματος

Η παρούσα μελέτη βασίζεται στην περίπτωση ατυχήματος λίμνης φωτιάς σε δεξαμενή αποθήκευσης αργού πετρελαίου παρουσία ανέμου, όπως παρουσιάζεται στην έρευνα του Zhou (2019). Εξετάζεται μια δεξαμενή χωρητικότητας 10^5m^3 , με διάμετρο 80m και ύψος 21,88m. Οι διαστάσεις του υπολογιστικού χωρίου κατά την προσομοίωση είναι $360\text{m} \times 200\text{m} \times 200\text{m}$. Όπως δίδεται στο Σχήμα 5-1 η πηγή της λίμνης καυσίμου είναι στην οροφή της δεξαμενής σε συνθήκες λεπτού ανέμου (Πίνακας 5-1). Όσον αφορά τις θερμικές ιδιότητες του αργού πετρελαίου, επιλέχθηκαν ως ο μέγιστος ρυθμός καύσης μάζας καυσίμου να είναι στα $0,059 \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$, θερμότητα καύσης μάζας καυσίμου στα $47,5 \text{kJ/gr}$, η θερμική αγωγιμότητα στα $0,15 \text{W/m} \cdot \text{K}$, η ειδική θερμοχωρητικότητα στα $2,4 \text{kJ/kg} \cdot \text{K}$ και η πυκνότητα του καυσίμου στα 890kg/m^3 .



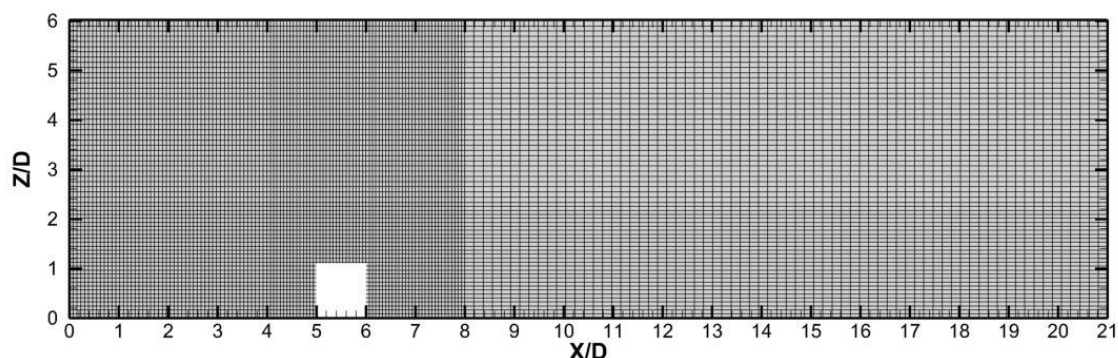
Σχήμα 5-1 Υπολογιστικό χωρίο προσομοίωσης ατυχήματος.

Πίνακας 5-1 Κλίμακα έντασης ανέμου (Zhou 2019).

Κλίμακα	Ονομασία	Ταχύτητα ανέμου (m/s)
0	Νηνεμία	0,0~0,2
1	Υποπνέων Άνεμος	0,3~1,5
3	Λεπτός Άνεμος	3,4~5,4
4	Μέτριος Άνεμος	5,5~7,9
5	Λαμπρός Άνεμος	8,0~10,7
7	Σφοδρός Άνεμος	13,9~17,1
8	Ορμητικός Άνεμος	17,2~20,7

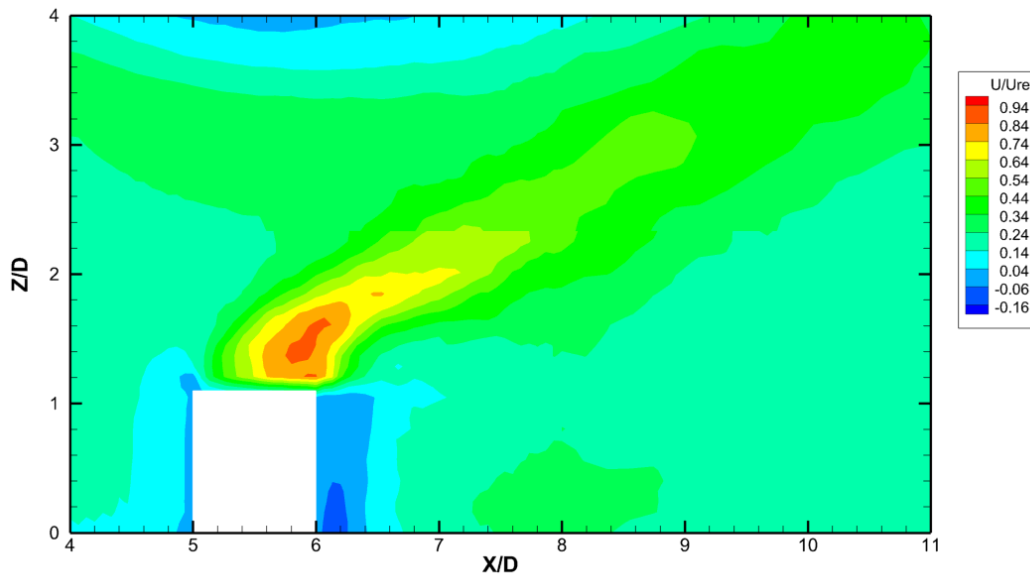
5.1 Κατακόρυφα ισοϋψής γραφήματα

Στο Σχήμα 5-2 δίδεται το υπολογιστικό χωρίο για το οποίο διενεργήθηκε η προσομοίωση του ατυχήματος στη δεξαμενή. Από την είσοδο μέχρι δύο διαμέτρους (2D) πίσω από την δεξαμενή υπάρχει μία πύκνωση στο υπολογιστικό πλέγμα και ύστερα μια αραιώση, για να μην αυξηθεί το υπολογιστικό κόστος. Ο αριθμός των κελιών έχει παραμείνει ο ίδιος με αυτόν που προέκυψε από την προσομοίωση του υπό κλίμακα μοντέλου, καθώς είναι επιθυμητή η πύκνωση να παραμείνει στη μεσαία κλίμακα (Πίνακας 4-3).



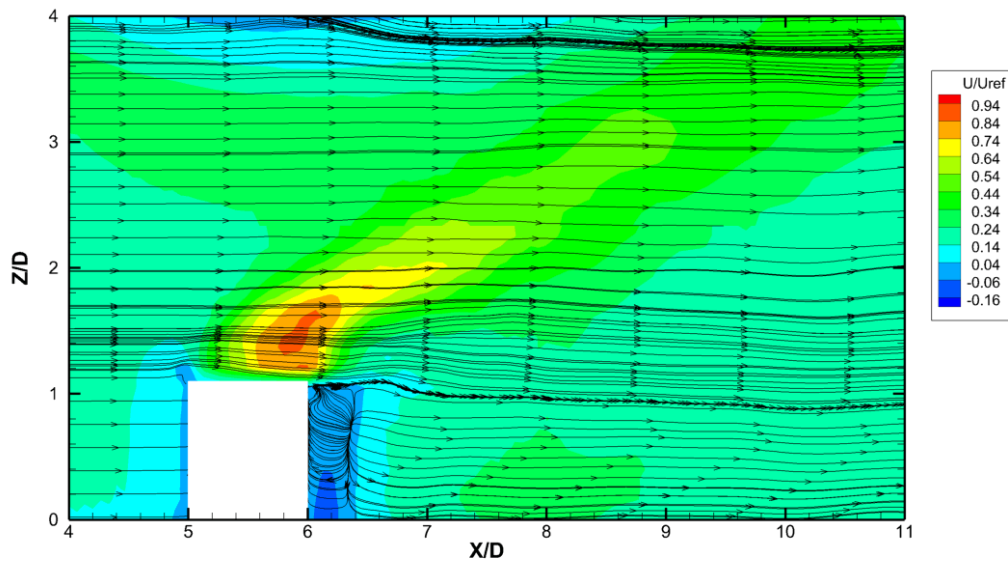
Σχήμα 5-2 Κατακόρυφη τομή υπολογιστικού πλέγματος στο επίπεδο συμμετρίας.

Για το κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα στο επίπεδο συμμετρίας, το οποίο δίδεται στο Σχήμα 5-3, παρατηρείται μία αύξηση των ταχυτήτων στα προϊόντα της καύσης, λόγω μεταβολής της πυκνότητας, που οφείλεται στις επικρατούσες υψηλές θερμοκρασίες στο άνω μέρος της δεξαμενής. Για την υπό εξέταση κλίμακα ύψους παρατηρείται ένας διαχωρισμός της αδιατάραχτης ροής λόγω της ορμής των προϊόντων της καύσης.



Σχήμα 5-3 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα στο επίπεδο συμμετρίας.

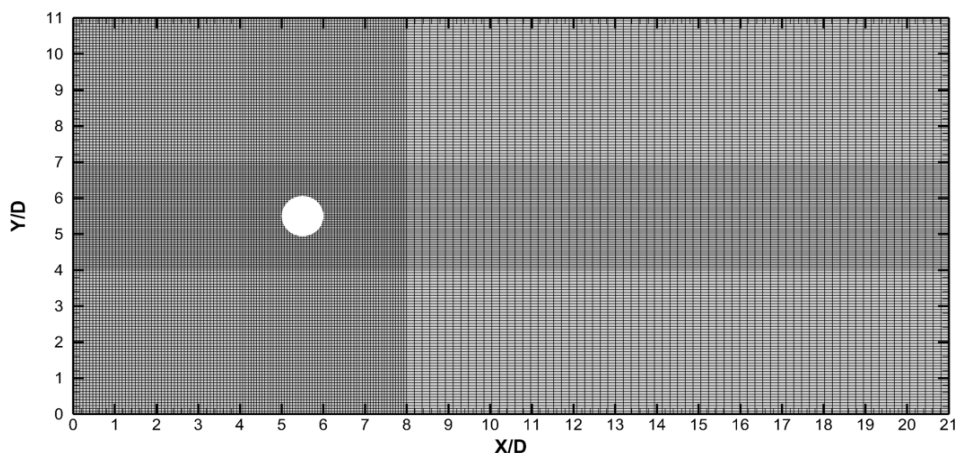
Στο Σχήμα 5-4 δίδεται το κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα της προσομοίωσης του ατυχήματος. Είναι ξεκάθαρο ότι το πεδίο ροής διαχωρίζεται σε δύο μέρη λόγω της ορμής των προϊόντων της καύσης. Τα δύο αυτά μέρη είναι στο άνω μέρος του πεδίου ροής καθώς ο ρύπος διαφεύγει. Η μεταβολή του θερμοκρασιακού πεδίου είναι ικανή να μεταβάλλει σε τέτοιο βαθμό την πυκνότητα του ρευστού, ώστε να αποτελέσει μια ισχυρή πηγή ορμής. Επίσης, η παραπάνω μεταβολή έχει ως αποτέλεσμα την μετατόπιση της θολωτής δίνης στο όπισθεν τμήμα της δεξαμενής.



Σχήμα 5-4 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα ροϊκών γραμμών στο επίπεδο συμμετρίας.

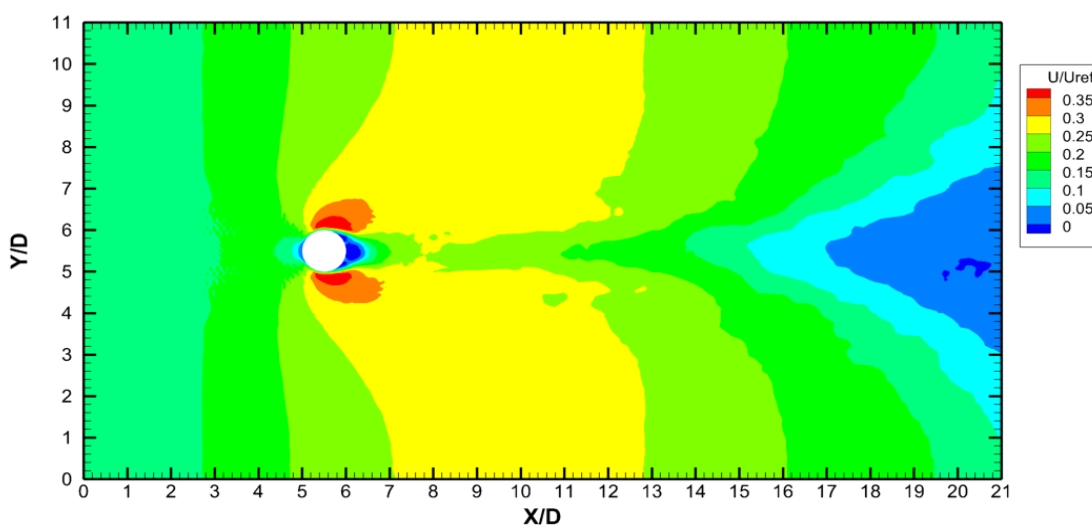
5.2 Οριζόντια ισοϋψής γραφήματα

Στο Σχήμα 5-5 δίδεται το οριζόντιο γράφημα του πλέγματος, όπου παρατηρούνται δύο περιοχές πύκνωσης, μίας έντονης και μία αραιής. Ο λόγος είναι ότι ενδιαφερόμαστε για την πληροφορία ανάντη της γεωμετρίας και κατόπιν για ένα συγκεκριμένο μήκος. Έτσι, εξοικονομούνται υπολογιστικοί πόροι. Διαφαίνεται μία λωρίδα έντονης πύκνωσης, προκειμένου να επιτευχθεί όσο το δυνατό μια καλύτερη αναλυτική λύση του απορρεύματος.



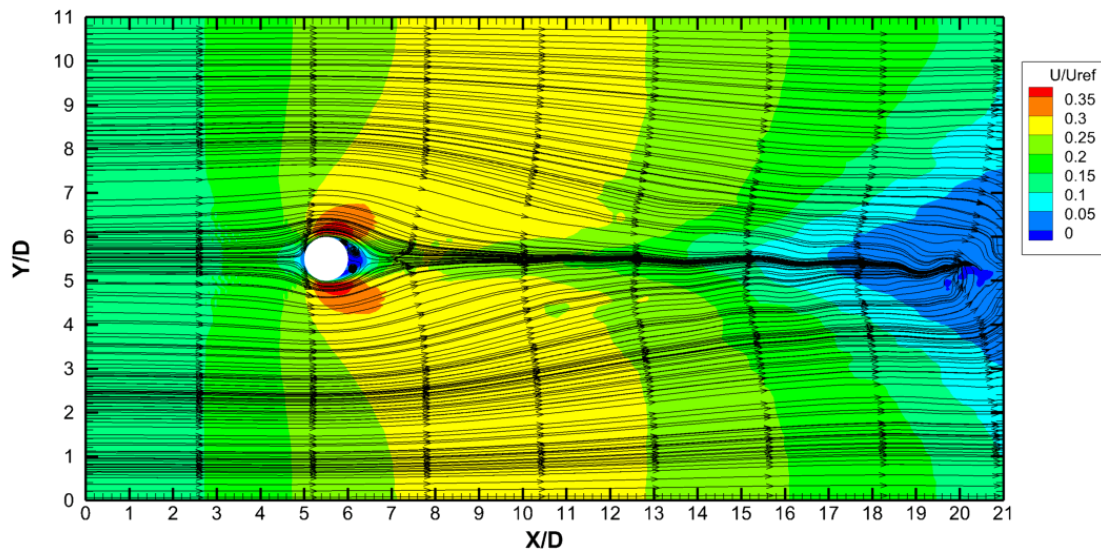
Σχήμα 5-5 Οριζόντια τομή υπολογιστικού πλέγματος για $Z/D = 0,5$.

Στο Σχήμα 5-6 παρουσιάζεται το οριζόντιο ισοϋψές γράφημα της προσομοίωσης στο επίπεδο $Z/D = 0,5$. Παρατηρείται μια ομοιότητα με το ισοϋψές γράφημα της υπό κλίμακα γεωμετρίας (Σχήμα 4-17). Συμπεραίνεται, λοιπόν, πως το οριζόντιο πεδίο ταχυτήτων δεν επηρεάζεται αρκετά από την ύπαρξη πηγής φωτιάς. Η μόνη διαφοροποίηση που διαπιστώνεται είναι στο μέγεθος των δινών των απορρευμάτων.



Σχήμα 5-6 οριζόντιο ισοϋψές γράφημα αδιάστατων ταχυτήτων για $Z/D = 0,5$.

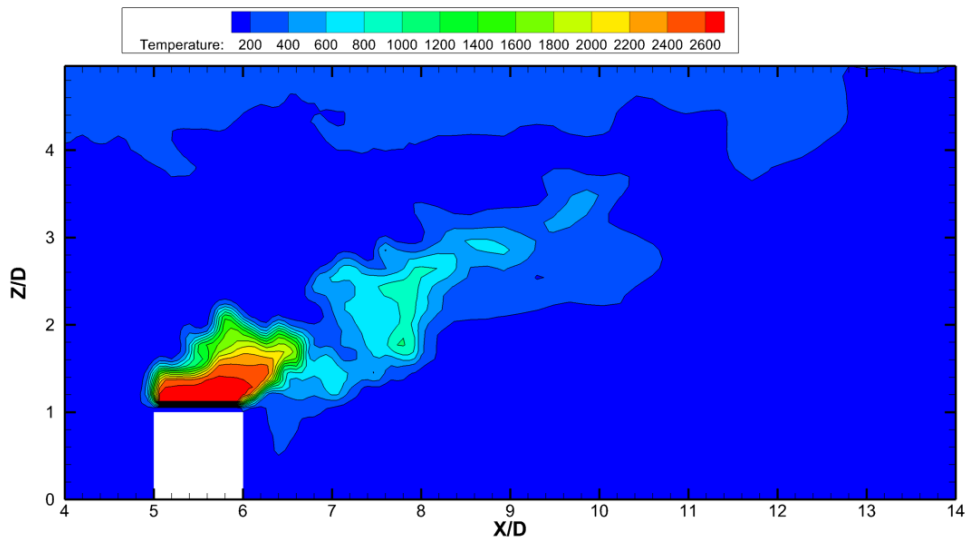
Στο Σχήμα 5-7, λόγω της κεντρικής ανακυκλοφορίας, που δημιουργείται από τα παράγωγα της καύσης, παρατηρείται μία ταλάντωση των μέσων ταχυτήτων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται διακυμάνσεις στα οριζόντια επίπεδα, που επιβεβαιώνεται, μέσω των ροϊκών γραμμών και από τη μικρή επιρροή της μεγάλης δίνης κατόπιν του κυλίνδρου.



Σχήμα 5-7 Οριζόντιο ισοϋψές γράφημα ροϊκών γραμμών για $Z/D = 0,5$.

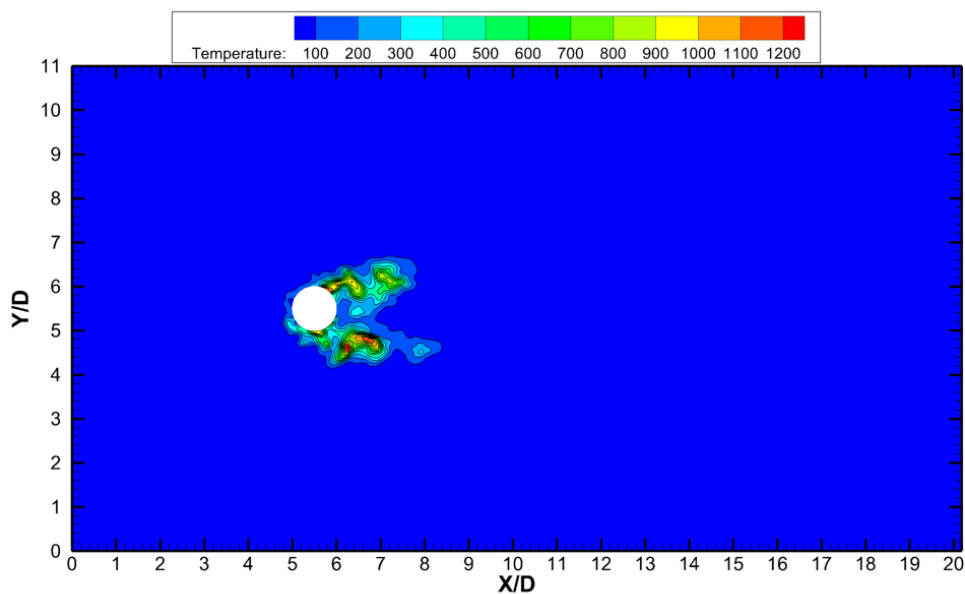
5.3 Ισοϋψή γραφήματα θερμοκρασιακού πεδίου

Στο Σχήμα 5-8 δίδεται το οριζόντιο ισοϋψές γράφημα στο οριζόντιο επίπεδο συμμετρίας. Παρατηρείται αρχικά ότι η θερμοκρασία στο σημείο του ατυχήματος παραμένει σταθερά υψηλή, γεγονός που αποτελεί παραδοχή της προσομοίωσης, καθώς δεν ήταν αντικείμενο εξέτασης το μεταβατικό σημείο της καύσης. Ύστερα, η μεταβολή του θερμοκρασιακού πεδίου διαφαίνεται αρκετά έντονη, καθώς το ύψος αυξάνεται. Αυτό δικαιολογεί αρχικά την ανοδική πορεία του ζεστού απορρεύματος και σε δεύτερη φάση τις σχετικά μεγάλες ταχύτητες ροής στο σημείο άνωθεν της δεξαμενής.



Σχήμα 5-8 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα θερμοκρασιακού πεδίου στο επίπεδο συμμετρίας.

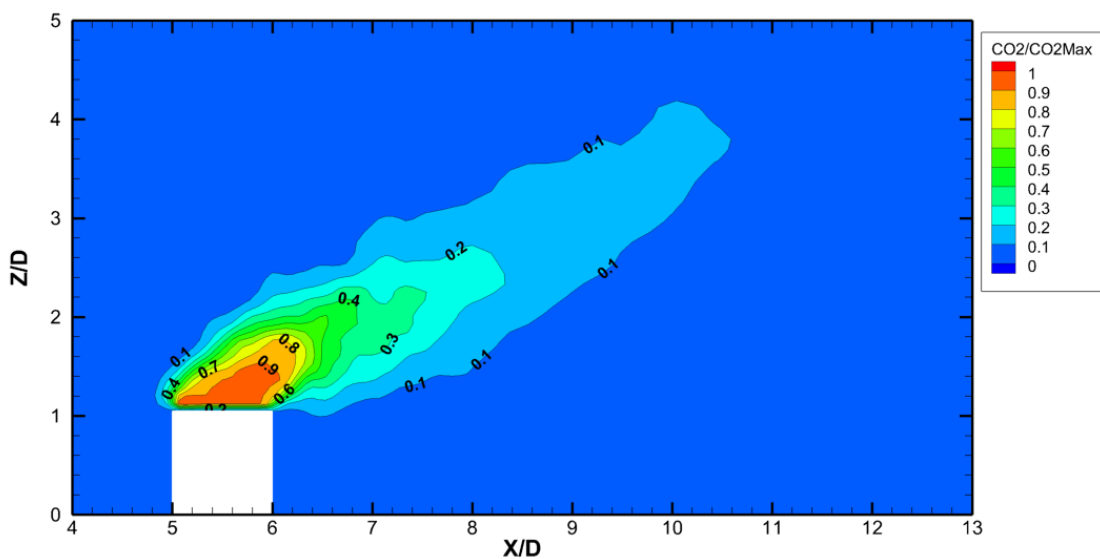
Στο Σχήμα 5-11 παρουσιάζεται το οριζόντιο ισοϋψές γράφημα του θερμοκρασιακού πεδίου στο ύψος του κυλίνδρου. Όπως και στο οριζόντιο ισοϋψές γράφημα αδιάστατων ταχυτήτων, η επίδραση της φωτιάς είναι ελάχιστη. Στο παρόν γράφημα παρατηρείται ότι η θερμοκρασία αυξάνεται στα σημεία όπου ο καπνός διαφεύγει προς τα πάνω. Άρα, στα σημεία όπου παρατηρείται αυξημένη θερμοκρασία είναι αυτή των προϊόντων της καύσης.



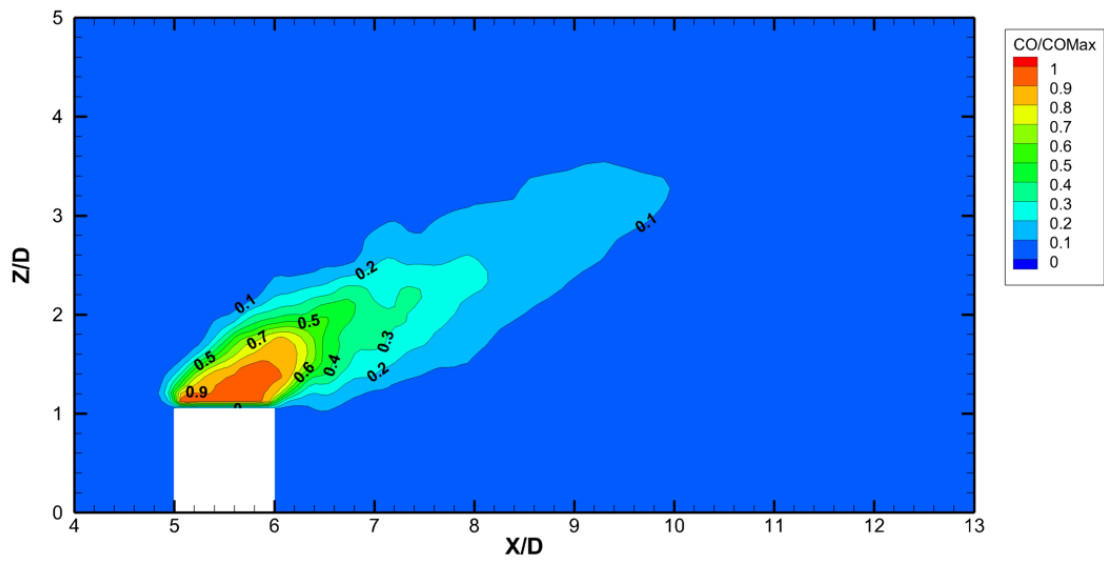
Σχήμα 5-9 Οριζόντιο ισοϋψές γράφημα θερμοκρασιακού πεδίου για $Z/D=1$.

5.4 Κατακόρυφα ισοϋψής γραφήματα τοξικών ρύπων

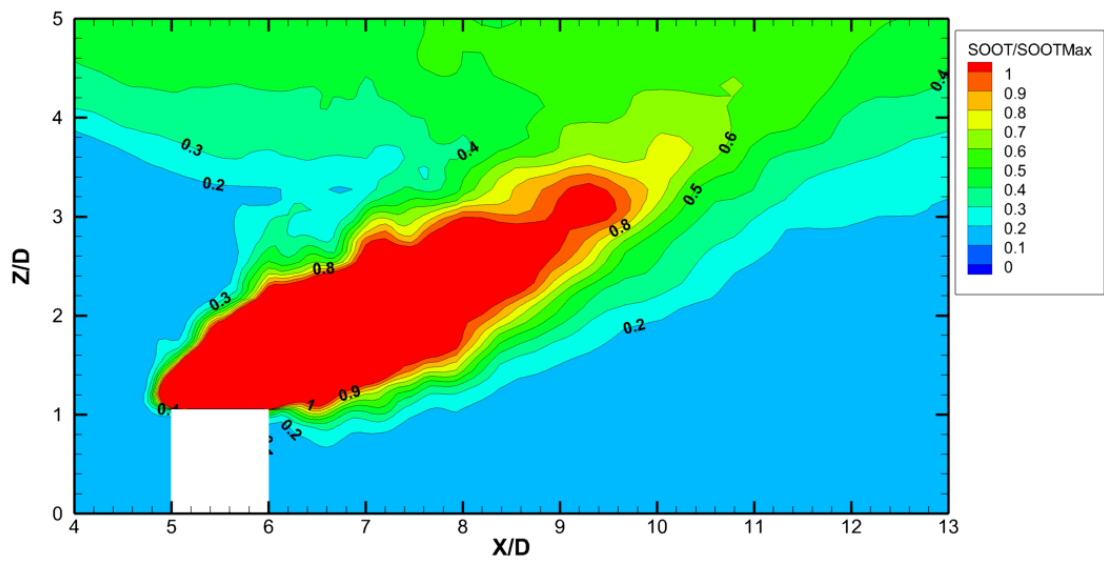
Στα Σχήμα 5-10, Σχήμα 5-11 και Σχήμα 5-12 δίδεται η αδιάστατη διασπορά των ρυπαντών, οι οποίοι προέκυψαν από την καύση αργού πετρελαίου. Αρχικά, γίνεται αντιληπτό ότι η πορεία των ρυπαντών είναι ανοδική. Αυτό οφείλεται στην υψηλή τους θερμοκρασία, δημιουργώντας ισχυρές ανωστικές δυνάμεις λόγω της διαφοράς πυκνότητας. Στη συνέχεια, το σύνολο τους κινείται προς την έξοδο του πεδίου ροής, κυρίως λόγω της ορμής της αδιατάραχτης ροής η οποία είναι ικανή να τους παρασύρει και να μην επιτρέψει τη δημιουργία ενός κατακόρυφου πλουμιού. Επίσης, αξίζει να τονιστεί ότι δεν υπάρχει εισχώρηση κανενός ρύπου εντός της θολωτής δίνης, αντιθέτως είναι ο κύριος παράγοντας της ανοδικής πορείας των ρυπαντών. Τέλος, η διάχυση τους οφείλεται κατά κύριο λόγο στα φαινόμενα τύρβης και όχι λόγω μοριακής διάχυσης, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η δυνάμεις αδράνειας είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από τις δυνάμεις συνεκτικότητας.



Σχήμα 5-10 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα διασποράς διοξειδίου του άνθρακα στο επίπεδο συμμετρίας.



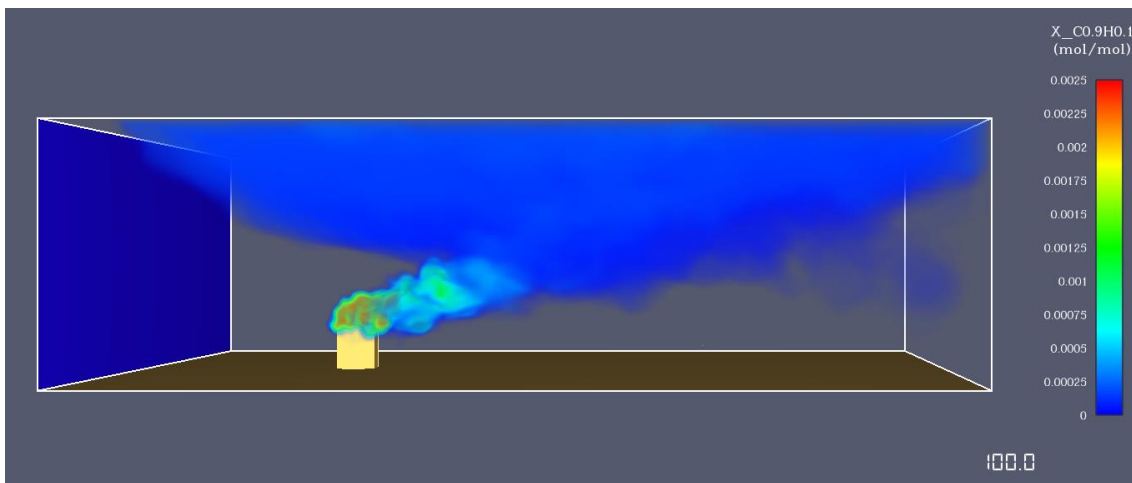
Σχήμα 5-11 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα διασποράς μονοξειδίου του άνθρακα στο επίπεδο συμμετρίας.



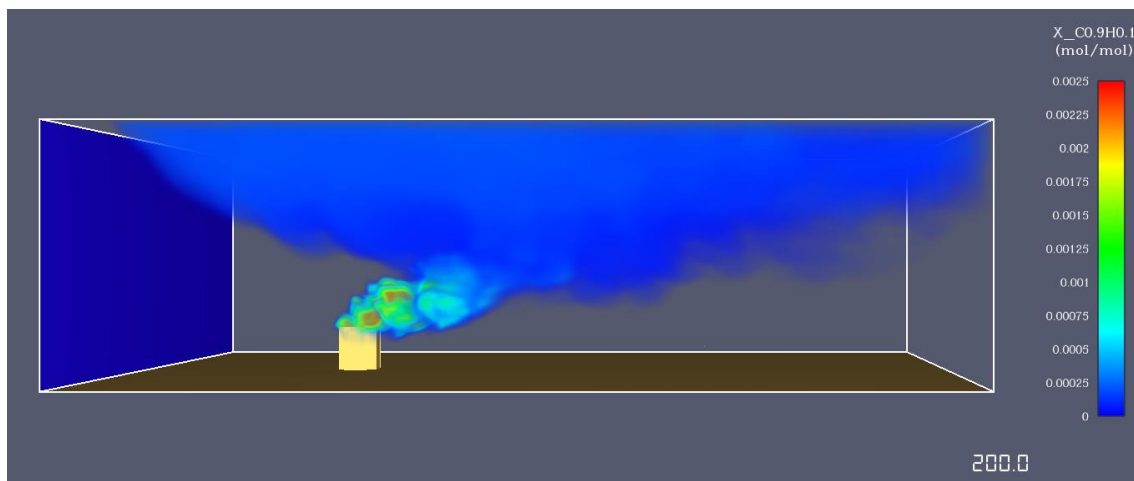
Σχήμα 5-12 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα διασποράς καπνού στο επίπεδο συμμετρίας.

5.5 Διασπορά καπνού

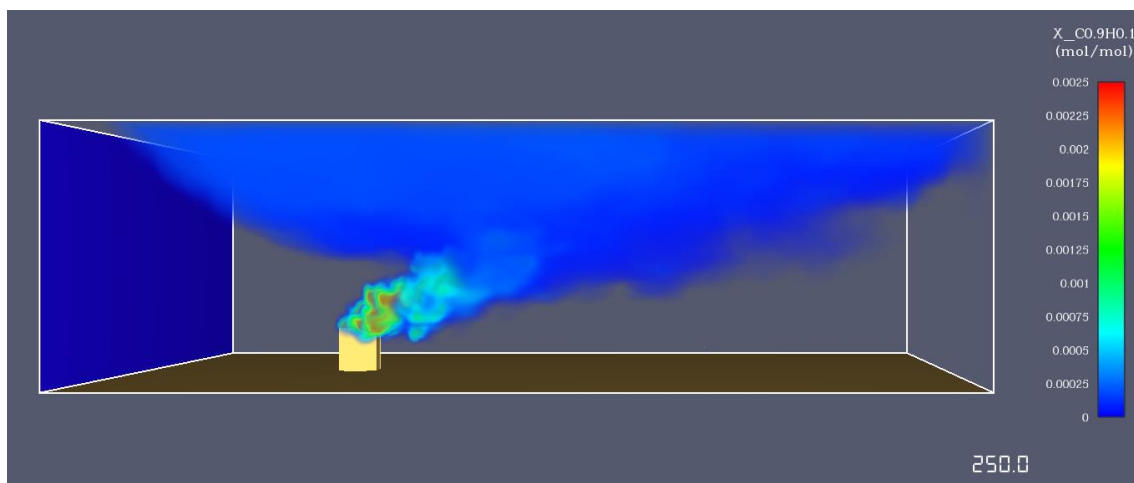
Στο Σχήμα 5-13, Σχήμα 5-14 και Σχήμα 5-15 δίδεται η διασπορά του καπνού για τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές ($t=100s$, $t=200s$ & $t=250s$). Είναι εμφανές ότι ο καπνός διαφεύγει απευθείας προς το άνω μέρος του πεδίου ροής. Αυτό οφείλεται αρχικά στην ταχύτητα του ανέμου που αναπτύσσεται από το παραβολικό προφίλ εισόδου. Ύστερα, έχοντας αναλύσει το θερμοκρασιακό πεδίο, παρατηρήθηκαν αρκετά υψηλές θερμοκρασίες, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η μεταβολή της πυκνότητας είναι τέτοια ώστε οι ανωστικές δυνάμεις να είναι πλέον υπολογίσιμες, οδηγώντας τον καπνό σε ανοδική πορεία. Τέλος, η ανοδική αυτή πορεία δημιουργεί δύο ανακυκλοφορίες στο άνω μέρος του πεδίου ροής. Η μία υφίσταται στο εμπρόσθιο μέρος, επηρεάζοντας το παραβολικό προφίλ εισόδου στο άνω μέρος του. Η δεύτερη βρίσκεται κατάντη της δεξαμενής, καθώς τα προϊόντα της καύσης διαφεύγουν στα ανώτερα στρώματα του πεδίου ροής.



Σχήμα 5-13 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα διασποράς καπνού στο επίπεδο συμμετρίας για $t=100s$.



Σχήμα 5-14 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα διασποράς καπνού στο επίπεδο συμμετρίας για t=200s.



Σχήμα 5-15 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα διασποράς καπνού στο επίπεδο συμμετρίας για t=250s.

5.6 Ζώνες επικινδυνότητας

Η ύπαρξη τοξικών ουσιών, ως αποτέλεσμα βιομηχανικού ατυχήματος φωτιάς αργού πετρελαίου, δύναται να έχει σημαντικές επιπτώσεις στον άνθρωπο και το περιβάλλον, ακόμη και σε μεγάλη απόσταση από το σημείο της αρχικής πηγής. Κατά την διαδικασία εκτίμησης των επιπτώσεων, γίνεται αντιληπτό πως πρόκειται για μια περιστασιακή έκθεση σε τοξικούς ρύπους, η οποία εξαρτάται από δύο μεγέθη ασταθή και ευμετάβλητα, δηλαδή από την έκταση του ατυχήματος και από τον χρόνο έκθεσης των ανθρώπων σε αυτούς. Προφανώς,

οι επιπτώσεις που εμφανίζονται αμέσως μετά τη διασπορά των ρύπων είναι και οι εντονότερες, αφού τότε εμφανίζονται οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις τους στο περιβάλλον.

Χρήσιμη, για την εκτίμηση επιπτώσεων σε περιπτώσεις διασποράς ρύπων, έχει καταδειχτεί η εξαγωγή ζωνών επικινδυνότητας (Yang, Chen et al. 2020). Σε περιστατικά φωτιάς, η ζώνη επικινδυνότητας χαρακτηρίζεται από έντονη μεταφορά θερμότητας και υψηλές τοξικές συγκεντρώσεις. Συνήθως, εκτείνεται ημισφαιρικά, με την πηγή της φωτιάς να αποτελεί το κέντρο της, έως κάποια απόσταση όπου θεωρείται πλέον ασφαλής για τον άνθρωπο. Η διασαφήνιση αυτών των ζωνών βασίζεται στους δείκτες για έκθεση σε τοξική ουσία, που αποτελούν, ουσιαστικά, κάποια όρια χαρακτηριστικών συγκεντρώσεων, για σταθερό χρόνο έκθεσης (συνήθως 30 λεπτών) (Assael and Kakosimos 2010). Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι είναι:

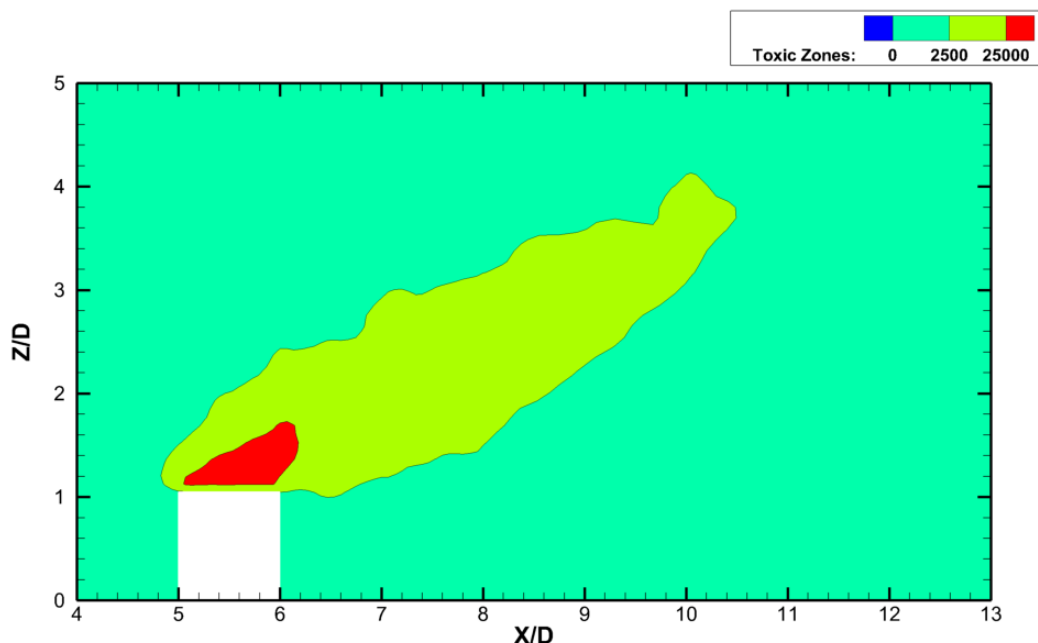
- LC_{50} [mg/m^3 αέρα] (Lethal Concentration 50 ή Θανατηφόρα Συγκέντρωση 50) ορίζεται ως η συγκέντρωση μια τοξικής ουσίας στον αέρα, η οποία δύναται να προκαλέσει θάνατο στο 50% του πληθυσμού, λόγω εισπνοής, για χρόνο έκθεσης 30 λεπτών.
- LC_1 [mg/m^3 αέρα] (Lethal Concentration 1 ή Θανατηφόρα Συγκέντρωση 1) ορίζεται ως η συγκέντρωση μια τοξικής ουσίας στον αέρα, η οποία πιθανόν να προκαλέσει θάνατο στο 1% του πληθυσμού, λόγω εισπνοής, για χρόνο έκθεσης 30 λεπτών.
- $IDLH$ [mg/m^3 αέρα] (Immediately Dangerous to Life and Health ή Άμεσα Επικίνδυνη στην ζωή και την Υγεία) ορίζεται ως η μέγιστη συγκέντρωση μια τοξικής ουσίας στον αέρα, για έκθεση ατόμων που δεν βρίσκονται σε ευπαθής ομάδες, σε χρονικό διάστημα 30 λεπτών, έχοντας της δυνατότητα διαφυγής χωρίς τραυματισμό και αποφυγής μη αναστρέψιμων βλαβών στην υγεία τους. Δύναται να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$IDLH = 0,10 \cdot LC_{50} \quad (5-1)$$

Τα προτεινόμενα όρια επικινδυνότητας για ρύπους καπνού από το National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) για την ζώνη LC_{50} είναι

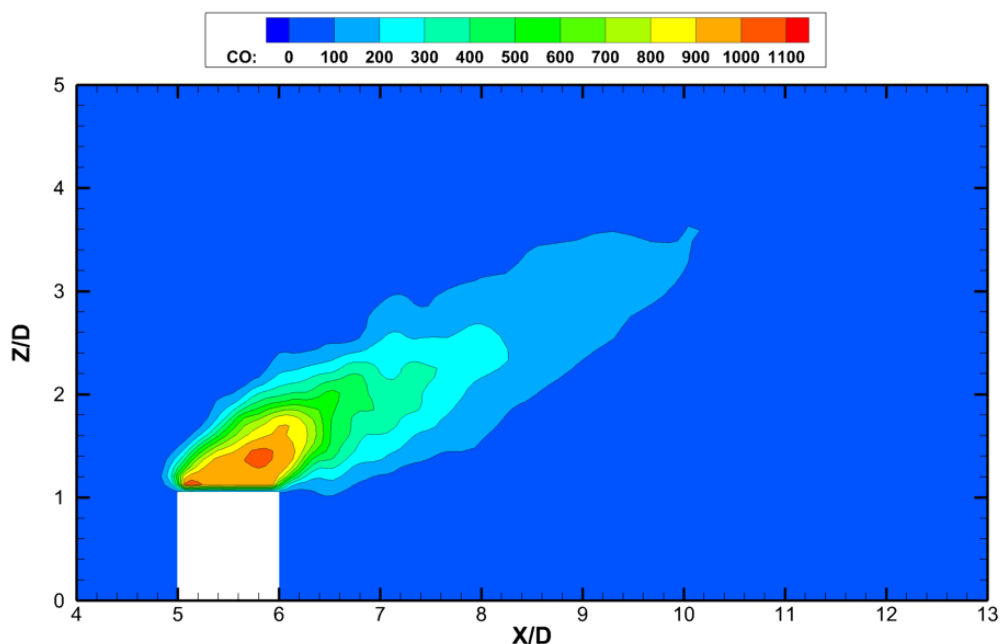
25.000mg/m³ και για την IDLH είναι 2.500mg/m³. Αντίστοιχα, για το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) είναι IDLH= 40.000ppm και για το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) είναι IDLH= 1.200ppm.

Στα Σχήμα 5-16, Σχήμα 5-17 και Σχήμα 5-18 διαφαίνονται οι ζώνες επικινδυνότητας στα 250 δευτερόλεπτα από την έναρξη του ατυχήματος φωτιάς. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 5-16 παρουσιάζεται το κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα ζώνης επικινδυνότητας καπνού στο επίπεδο συμμετρίας, όπου η κόκκινη περιοχή υπάγεται στην Ζώνη I – Σοβαρότατων Επιπτώσεων, η οποία καθορίζεται από τα όρια του δείκτη LC₅₀ (25.000mg/m³) στην περίπτωση καπνού (soot). Η Ζώνη I, ουσιαστικά, περιβάλλει την πηγή της φωτιάς, άρα και την πηγή του καπνού. Η πράσινη περιοχή υπάγεται στην Ζώνη III – Ήπιων Επιπτώσεων, η οποία καθορίζεται από τα όρια του δείκτη IDLH (2.500mg/m³) στην περίπτωση καπνού (soot). Η Ζώνη III αποτελεί και την τελική ζώνη επικινδυνότητας, που όπως καταδεικνύεται, εκτείνεται σε πολύ μεγαλύτερη απόσταση από την Ζώνη I. Όπως είναι λογικό, η μορφολογία των ζωνών ακολουθεί αυτή της διασποράς καπνού (Σχήμα 5-12).

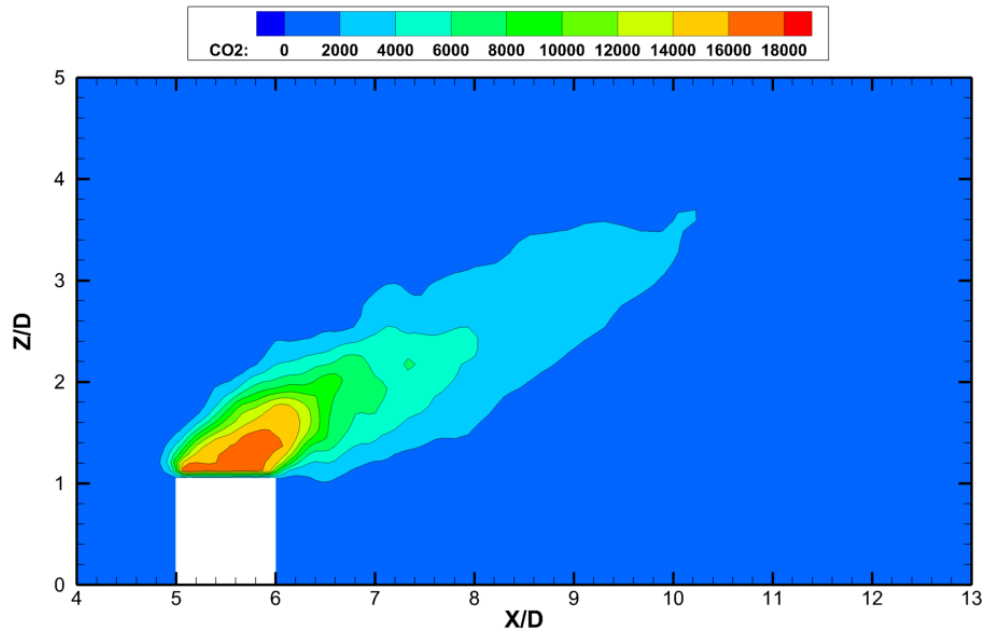


Σχήμα 5-16 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα ζώνης επικινδυνότητας καπνού στο επίπεδο συμμετρίας.

Στα Σχήμα 5-17 & Σχήμα 5-18 δεν δύναται να εξαχθούν οι ζώνες επικινδυνότητας με τα χρησιμοποιούμενα όρια $IDLH_{CO}=1.200ppm$ και $IDLH_{CO_2}=40.000ppm$, διότι οι υφιστάμενες συγκεντρώσεις βρίσκονται κάτω των προαναφερόμενων ορίων. Επομένως, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως δεν υπάρχει άμεσος κίνδυνος για τον άνθρωπο και το περιβάλλον από τις συγκεντρώσεις του μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα. Επίσης, και σε αυτές τις περιπτώσεις ρύπων, ακολουθείται η μορφολογία της διασποράς του CO_2 (Σχήμα 5-10) και του CO (Σχήμα 5-11).



Σχήμα 5-17 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα ζώνης επικινδυνότητας CO στο επίπεδο συμμετρίας.



Σχήμα 5-18 Κατακόρυφο ισοϋψές γράφημα ζώνης επικινδυνότητας CO₂ στο επίπεδο συμμετρίας.

6 Συμπεράσματα

Τα ζητήματα τα οποία πραγματεύθηκε η παρούσα διπλωματική εργασία ήταν η ανάλυση της ροής του ανέμου γύρω από μία μεμονωμένη κυλινδρική δεξαμενή αποθήκευσης υγρού καυσίμου, η επίδραση της μετά από ατύχημα λίμνης φωτιάς αργού πετρελαίου επί της δεξαμενής και κατά πόσο επηρεάστηκε η διασπορά αέριων τοξικών ρύπων στο περιβάλλον.

Εφόσον, πλέον, έχουν ολοκληρωθεί τα κεφάλαια των αναλύσεων τόσο του υπό κλίμακα μοντέλου όσο και της δεξαμενής πραγματικών διαστάσεων, είναι δυνατό να εξαχθούν τα συμπεράσματα αυτής της εργασίας. Ο λόγος για τον οποίο εξετάστηκε πρωταρχικά το υπό κλίμακα μοντέλο, ήταν για να διαπιστωθεί κατά πόσο το FDS (Fire Dynamics Simulator) δύναται να μοντελοποιήσει την συμπεριφορά του ανέμου σε υπό κλίμακα γεωμετρίες και να επαληθευθούν τα αριθμητικά αποτελέσματα με πειραματικές μετρήσεις. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της υπό κλίμακας γεωμετρίας στην αεροσήραγγα

Το πρώτο ζήτημα το οποίο εξετάστηκε ήταν αυτό των οριακών συνθηκών και της ομοιότητας της ροής που θα μπορούσε να προσομοιωθεί με τη ροή σε πραγματικές συνθήκες. Η αεροσήραγγα του εργαστηρίου δύναται να δημιουργήσει παραβολικό προφίλ ταχύτητας στην είσοδο της μέχρι και δύο ύψη κυλίνδρου. Μετρώντας την κατανομή των ταχυτήτων, διαμορφώθηκε το προφίλ ταχυτήτων της υπό κλίμακας προσομοίωσης στην είσοδο του πεδίου ροής. Για το υπό κλίμακα μοντέλο πραγματοποιήθηκε έλεγχος για την εδραιοποίηση του πεδίου ροής. Είναι σημαντικό να δοθεί μια εδραιωμένη ροή, καθώς στην παρούσα εργασία δεν θα αναλυθεί η οποιαδήποτε μεταβατική κατάσταση της ροής. Στα Σχήμα 4-4, Σχήμα 4-5, Σχήμα 4-6 και Σχήμα 4-7 δίνονται οι χρονοσειρές για τέσσερα σημεία του πεδίου ροής. Παρατηρείται ότι οι αδιάστατες ταχύτητες, πλέον, έχουν ένα σημείο γύρω από το οποίο ταλαντεύονται.

Αφού επιλύθηκε αριθμητικά η ροή του αέρα γύρω από την δεξαμενή, ελέγχθηκε η μοναδικότητα της λύσης. Αυτό επετεύχθη στην υποενότητα 4.4 με την εκτίμηση του σφάλματος διακριτοποίησης. Δοκιμάστηκαν τρία διαφορετικά πλέγματα, ένα αραιό, ένα μεσαίας πύκνωσης και ένα πυκνό πλέγμα (Πίνακας 4-3). Συγκρίνοντας

τα τρία πλέγματα μεταξύ τους διαπιστώθηκε ότι το μεσαίο πλέγμα επιλύει ικανοποιητικά το πεδίο ροής σε σχέση με το αραιό, το οποίο εμφάνιζε σημαντικές αποκλίσεις, καθώς και σε σχέση με το πυκνό, το οποίο εμφάνιζε, μεν, ελάχιστες αποκλίσεις, είχε όμως μεγάλο υπολογιστικό κόστος (Σχήμα 4-8 & Σχήμα 4-9).

Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω συμπεράσματα, έπρεπε να εξακριβωθεί η ταύτιση των αποτελεσμάτων αυτών με πειραματικές μετρήσεις. Για το λόγο αυτό έγινε ο υπολογισμός του συντελεστή πίεσης (C_p) τόσο στα αποτελέσματα της προσομοίωσης, όσο και του πειράματος. Η ταύτιση ήταν ικανοποιητική στο Σχήμα 4-22, προκειμένου πλέον να δειχθεί το πεδίο ροής και να σχολιαστούν τα αποτελέσματα του.

Η ροή γύρω από κύλινδρο με πεπερασμένο ύψος παρουσιάζει τρία κύρια χαρακτηριστικά, την πεταλοειδή δίνη ανάντη του κυλίνδρου, η οποία δημιουργείται στο σημείο ανακοπής, την αποκόλληση του οριακού στρώματος στο άνω μέρος του κυλίνδρου, λόγω της ορμής της αδιατάραχτης ροής, καθώς και την θολωτή δίνη στο πίσω μέρος του κυλίνδρου. Το μήκος της ανακυκλοφορίας είναι 1,1 διάμετροι κυλίνδρου (1,1D). Στο οριζόντιο επίπεδο η ροή μοιάζει αρκετά με εκείνης γύρω από κύλινδρο άπειρου μήκους και στο Σχήμα 4-18 παρατηρούνται δύο κατακόρυφες ανακυκλοφορίες, οι οποίες οριοθετούν το πλάτος της θολωτής δίνης. Η ασυμμετρία τους μπορεί να αποδοθεί στα φαινόμενα τύρβης τα οποία υπολογίζονται κανονικά στις προσομοιώσεις, αλλά και στις διακυμάνσεις του προφίλ της ταχύτητας στην είσοδο του πεδίου ροής.

Στην προσομοίωση του ατυχήματος σε πραγματικές διαστάσεις αρχικά γίνεται αντιληπτό ότι η πηγή της φωτιάς επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το πεδίο ροής, καθώς τα ισοϋψή γραφήματα της ανάλυσης υπό κλίμακας μοντέλου δεν συνέπιπταν με αυτά της προσομοίωσης ατυχήματος. Η μοναδική πιθανότητα να συμπίπτουν θα υφίστατο στο ενδεχόμενο απουσίας πηγή φωτιάς, και αυτό γιατί έχουν προηγηθεί υπολογισμοί με τη χρήση λόγων ομοιότητας. Από τα κατακόρυφα ισοϋψή γραφήματα συμπεραίνεται ότι το πεδίο ροής στον κατακόρυφο άξονα επηρεάζεται περισσότερο από οποιοδήποτε άλλο. Αιτία αποτελεί η ύπαρξη ανωστικών δυνάμεων λόγω των υψηλών θερμοκρασιών στην περιοχή του ατυχήματος.

Το πεδίο της θερμοκρασίας επηρεάζει άμεσα την πυκνότητα του αέρα, όπως αυτή υπολογίζεται από την καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων. Οι μεταβολές αυτές δημιουργούν ανωστικές δυνάμεις, οι οποίες μεταφράζονται στην δημιουργία ορμής. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο παρατηρούνται υψηλές ταχύτητες οριζόντια της περιοχής του ατυχήματος. Σε αντίθεση, το οριζόντιο πεδίο ροής δεν επηρεάζεται τόσο πολύ, δημιουργώντας μία ταλάντωση στην έξοδο του πεδίου. Οι ταλαντώσεις αυτές αποτελούν αποτέλεσμα της δίνης που δημιουργείται από την κατακόρυφη κίνηση των προϊόντων της καύσης. Αυτή η ανακυκλοφορία δημιουργεί διακυμάνσεις στο κατακόρυφο πεδίο, όμως, λόγω της παραδοχής ότι η τύρβη δεν είναι ισότροπη, είναι δυνατός ο επηρεασμός των οριζόντιων γραφημάτων.

Η διασπορά των προϊόντων της καύσης, όπως προαναφέρθηκε, οφείλεται στο έντονο πεδίο των ταχυτήτων και όχι στην μοριακή διάχυση. Αυτή είναι η αιτία για την οποία, παρότι παρουσιάζονται διαφορετικά προϊόντα καύσης, η μορφολογία των ισοϋψών γραφημάτων είναι όμοια μεταξύ τους. Από την εξαγωγή των ζωνών επικινδυνότητας συμπεραίνεται πως, μόνο για την περίπτωση του καπνού υφίσταται άμεσος κίνδυνος για τον άνθρωπο και το περιβάλλον, σε αντίθεση με τις περιπτώσεις μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα.

Τέλος, εφόσον έχουν θεμελιωθεί οι γνώσεις που προέκυψαν από την μελέτη ενός απλοποιημένου περιστατικού λίμνης φωτιάς σε μεμονωμένη δεξαμενή αποθήκευσης αργού πετρελαίου, για μελλοντική έρευνα δύναται να προταθεί μια, πλέον, όχι και τόσο απλουστευμένη περίπτωση. Ενδιαφέρον παρουσιάζει είτε η έρευνα για συστοιχία δεξαμενών, είτε για διάφορες ταχύτητες ανέμων, είτε ακόμη και για εναλλακτικό αποθηκευμένο καύσιμο.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abbasi, T. and S. A. Abbasi (2007). "Accidental risk of superheated liquids and a framework for predicting the superheat limit." Journal of Loss Prevention in the Process Industries **20**(2): 165-181.
- Abbasi, T., H. J. Pasman and S. A. Abbasi (2010). "A scheme for the classification of explosions in the chemical process industry." Journal of Hazardous Materials **174**(1): 270-280.
- Adaramola, M. S., O. G. Akinlade, D. Sumner, D. J. Bergstrom and A. J. Schenstead (2006). "Turbulent wake of a finite circular cylinder of small aspect ratio." Journal of Fluids and Structures **22**(6): 919-928.
- Agui, J. H. and J. Andreopoulos (1992). "Experimental Investigation of a Three-Dimensional Boundary Layer Flow in the Vicinity of an Upright Wall Mounted Cylinder (Data Bank Contribution)." Journal of Fluids Engineering **114**(4): 566-576.
- Argyropoulos, C. D., M. N. Christolis, Z. Nivolianitou and N. C. Markatos (2012). "A hazards assessment methodology for large liquid hydrocarbon fuel tanks." Journal of Loss Prevention in the Process Industries **25**(2): 329-335.
- Assael, M. J. and K. E. Kakosimos (2010). Fires, explosions, and toxic gas dispersions: effects calculation and risk analysis, CRC Press.
- Chang, J. I. and C.-C. Lin (2006). "A study of storage tank accidents." Journal of Loss Prevention in the Process Industries **19**(1): 51-59.
- Chatzimichailidis, A., C. Argyropoulos, M. Assael and K. Kakosimos (2019). "Qualitative and Quantitative Investigation of Multiple Large Eddy Simulation Aspects for Pollutant Dispersion in Street Canyons Using OpenFOAM." **10**: 17.
- Elhelw, M., A. El-Shobaky, A. Attia and W. M. El-Maghlany (2021). "Advanced dynamic modeling study of fire and smoke of crude oil storage tanks." Process Safety and Environmental Protection **146**: 670-685.
- Engineering, P. "Types of Storage Tanks." Retrieved 17/01/2022, 2022, from <https://www.pipingengineer.org/types-of-storage-tanks/>.
- Frederich, O., J. Scouten, D. M. Luchtenburg and F. Thiele (2009). Numerical Simulation and Analysis of the Flow Around a Wall-Mounted Finite Cylinder, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.
- Garratt, J. R. (1994). "Review: the atmospheric boundary layer." Earth-Science Reviews **37**(1): 89-134.
- Gunasekera, M. Y. and A. A. P. de Alwis (2008). "Process industry accidents in Sri Lanka: Analysis and basic lessons learnt." Process Safety and Environmental Protection **86**(6): 421-426.
- Habib Jr, E., X. Zhao, G. Yaluris, W. Cheng, L. Boock and J.-P. Gilson (2002). Advances in fluid catalytic cracking. Zeolites for Cleaner Technologies, World Scientific: 105-130.

- Hain, R., C. J. Kähler and D. Michaelis (2008). "Tomographic and time resolved PIV measurements on a finite cylinder mounted on a flat plate." Experiments in Fluids **45**(4): 715-724.
- Holroyd, R. J. (1983). "On the behaviour of open-topped oil storage tanks in high winds. Part I. Aerodynamic aspects." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics **12**(3): 329-352.
- Hölscher, N. and H. Niemann (1987). Some aspects about the flow around a surface-mounted circular cylinder in a turbulent shear flow. Proceedings of the 6th Symposium International on Turbulent Shear Flows, Toulouse.
- Hu, L. (2017). "A review of physics and correlations of pool fire behaviour in wind and future challenges." Fire Safety Journal **91**: 41-55.
- Joulain, P. (1998). "The behavior of pool fires: State of the art and new insights." Symposium (International) on Combustion **27**(2): 2691-2706.
- Kaimal, J. C. and J. J. Finnigan (1994). Atmospheric boundary layer flows: their structure and measurement, Oxford university press.
- Kawamura, T., M. Hiwada, T. Hibino, I. Mabuchi and M. Kumada (1984). "Flow around a Finite Circular Cylinder on a Flat Plate : Cylinder height greater than turbulent boundary layer thickness." Bulletin of JSME **27**(232): 2142-2151.
- Khan, F. I. and S. A. Abbasi (1999). "Major accidents in process industries and an analysis of causes and consequences." Journal of Loss Prevention in the Process Industries **12**(5): 361-378.
- Klassen, M. and J. P. Gore (1993). "Temperature and soot volume fraction statistics in toluene-fired pool fires." Combustion and Flame **93**(3): 270-278.
- Lautkaski, R. (1992). "Validation of flame drag correlations with data from large pool fires." Journal of Loss Prevention in the Process Industries **5**(3): 175-180.
- Leder, A. (2003). 3D-Flow Structures Behind Truncated Circular Cylinders. ASME/JSME 2003 4th Joint Fluids Summer Engineering Conference.
- Li, X., G. Chen, K. Huang, T. Zeng, X. Zhang, P. Yang and M. Xie (2021). "Consequence modeling and domino effects analysis of synergistic effect for pool fires based on computational fluid dynamic." Process Safety and Environmental Protection **156**: 340-360.
- Longo, R. (2016). CFD inflow conditions, turbulence models and dispersion study for flows around obstacles.
- Magee, J. and M. Mitchell Jr (1993). "Fluid Catalytic Cracking: Science and Technology." Fluid Catalytic Cracking: Science and Technology: 41.
- McGrattan, K., S. Hostikka, J. Floyd, H. Baum, R. Rehm, W. Mell and R. McDermott "Fire dynamics simulator (version 6) technical reference guide, National Institute of Standards and Technology 2013." NIST Special Publication: 1018-1015.

- Meyers, R. A. (2004). Handbook of petroleum refining processes, McGraw-Hill Education.
- Miao, Z., S. Wenhua, W. Ji and C. Zhen (2014). "Accident Consequence Simulation Analysis of Pool Fire in Fire Dike." Procedia Engineering **84**: 565-577.
- Mihailidou, E. K., K. D. Antoniadis and M. J. Assael (2012). "The 319 major industrial accidents since 1917." International review of chemical engineering **4**(6): 529-540.
- Modak, A. (1978). Radiation from products of combustion, FMRC No. OAOE6, BU-1. Technical report, Factory Mutual Corporation.
- MTR (Thailand) Co., L. (2022). Retrieved 19/01/2022, 2022, from <https://mtrth.com/product/internal-floating-roof-ifr/>.
- Nugroho, A., G. D. Haryadi, R. Ismail and S. J. Kim (2016). "Risk based inspection for atmospheric storage tank." AIP Conference Proceedings **1725**(1): 020055.
- Okamoto, S. and Y. Sunabashiri (1992). "Vortex Shedding From a Circular Cylinder of Finite Length Placed on a Ground Plane." Journal of Fluids Engineering **114**(4): 512-521.
- Palau-Salvador, G., T. Stoesser, J. Fröhlich, M. Kappler and W. Rodi (2009). "Large Eddy Simulations and Experiments of Flow Around Finite-Height Cylinders." Flow, Turbulence and Combustion **84**(2): 239.
- Pattenden, R. J., N. W. Bressloff, S. R. Turnock and X. Zhang (2007). "Unsteady simulations of the flow around a short surface-mounted cylinder." International Journal for Numerical Methods in Fluids **53**(6): 895-914.
- Pattenden, R. J., S. R. Turnock and X. Zhang (2005). "Measurements of the flow over a low-aspect-ratio cylinder mounted on a ground plane." Experiments in Fluids **39**(1): 10-21.
- Pipkin, O. and C. Sliepcevich (1964). "Effect of wind on buoyant diffusion flames. Initial correlation." Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals **3**(2): 147-154.
- Pourkeramat, A., A. Daneshmehr, S. Jalili and K. Aminfar (2021). "Investigation of wind and smoke concentration effects on thermal instability of cylindrical tanks with fixed roof subjected to an adjacent fire." Thin-Walled Structures **160**: 107384.
- Quintiere, J. G. and B. S. Grove (1998). "A unified analysis for fire plumes." Symposium (International) on Combustion **27**(2): 2757-2766.
- Reed, M. and E. Peterson (2012). "Enhancing fire risk evaluations of plant structures using finite element analysis." Process Safety Progress **31**(4): 411-412.
- Riesel, Y. (2002). "Explosion and fire in a gas-oil fixed roof storage tank: Case study and lessons learned." Process Safety Progress **21**(1): 67-73.
- Rodante, T. V. (2005). "Investigation of a naphtha storage tank fire." Process Safety Progress **24**(2): 98-107.

Rödiger, T., H. Knauss, U. Gaisbauer and E. Krämer (2008). Pressure and Heat Flux Measurements on the Surface of a Low-Aspect-Ratio Circular Cylinder Mounted on a Ground Plate, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.

Roh, S. and S. Park (2003). "Vortical flow over the free end surface of a finite circular cylinder mounted on a flat plate." Experiments in Fluids **34**(1): 63-67.

Sakamoto, H. and M. Arie (1983). "Vortex shedding from a rectangular prism and a circular cylinder placed vertically in a turbulent boundary layer." Journal of Fluid Mechanics **126**: 147-165.

Scherzer, J. (1989). "Octane-enhancing, zeolitic FCC catalysts: scientific and technical aspects." Catalysis Reviews—Science and Engineering **31**(3): 215-354.

Steinhaus, T., S. Welch, R. O. Carvel and J. L. Torero (2007). "Large-scale pool fires." Thermal Science **11**(2): 101-118.

Sumer, B. M., N. Christiansen and J. Fredsøe (1997). "The horseshoe vortex and vortex shedding around a vertical wall-mounted cylinder exposed to waves." Journal of Fluid Mechanics **332**: 41-70.

Sumner, D. (2013). "Flow above the free end of a surface-mounted finite-height circular cylinder: A review." Journal of Fluids and Structures **43**: 41-63.

Sumner, D. and J. L. Heseltine (2008). "Tip vortex structure for a circular cylinder with a free end." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics **96**(6): 1185-1196.

Sumner, D., J. L. Heseltine and O. J. P. Dansereau (2004). "Wake structure of a finite circular cylinder of small aspect ratio." Experiments in Fluids **37**(5): 720-730.

Sun, B., K. Guo and V. K. Pareek (2014). "Computational fluid dynamics simulation of LNG pool fire radiation for hazard analysis." Journal of Loss Prevention in the Process Industries **29**: 92-102.

Thomas, P. (1963). The size of flames from natural fires. Symposium (International) on Combustion, Citeseer.

Thomas, P. (1965). "Fire spread in wooden cribs: Part III the effect of wind." Fire Safety Science **600**: -1--1.

Thomas, P., R. Pickard and H. Wraight (1963). "On the size and orientation of buoyant diffusion flames and the effect of wind." Fire Safety Science **516**: -1--1.

Vasilopoulos, K., M. Mentzos, I. E. Sarris and P. Tsoutsanis (2018). "Computational Assessment of the Hazardous Release Dispersion from a Diesel Pool Fire in a Complex Building's Area." Computation **6**(4): 65.

Venuto, P. B. and J. Habib, E T (1979). Fluid catalytic cracking with zeolite catalysts. United States, Marcel Dekker, Inc., New York, NY.

Versteeg, H. K. and W. Malalasekera (2007). An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method, Pearson education.

Water Storage Tanks, I. Retrieved 19/01/2022, 2022, from <https://waterstoragetanksinc.com/water-tank-models/open-top-no-roof-water-tanks/>

Welker, J. R., O. A. Pipkin and C. M. Sliepcevich (1965). "The effect of wind on flames." Fire Technology **1**(2): 122-129.

Welker, J. R. and C. M. Sliepcevich (1966). "Bending of wind-blown flames from liquid pools." Fire Technology **2**(2): 127-135.

Wiff, D. (2006). "Incident investigation of an explosion at a styrene plant." Process Safety Progress **25**(2): 156-159.

Woodward, J. L. and J. Lygate (2002). "Establishing ignition conditions for the tank manifold fire at the Powell Duffryn tank terminal." Process Safety Progress **21**(3): 171-180.

Yamaguchi, T. and K. Wakasa (1986). "Oil pool fire experiment." Fire Safety Science **1**: 911-918.

Yang, D., G. Chen, J. Shi, Y. Zhu and Z. Dai (2020). "A novel approach for hazardous area identification of toxic gas leakage accidents on offshore facilities." Ocean Engineering **217**: 107926.

Zhang, D., L. Cheng, H. An and S. Draper (2021). "Flow around a surface-mounted finite circular cylinder completely submerged within the bottom boundary layer." European Journal of Mechanics - B/Fluids **86**: 169-197.

Zheng, B. and G.-h. Chen (2011). "Storage tank fire accidents." Process Safety Progress **30**(3): 291-293.

Zhou, F. (2019). "Numerical Simulation of Large Crude Oil Storage Tank Fire under Various Wind Speeds." Journal of Physics: Conference Series **1300**: 012003.

Ανδρίτσος, Ν. (2008). "Ενέργεια και περιβάλλον." Διδακτικές σημειώσεις, Βόλος.

Γεντεκάκης, Ι. (2010). ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ: επιπτώσεις, έλεγχος & εναλλακτικές τεχνολογίες.

Κισσόπουλος, Κ., Χ. Γιαννούλης and Ε. Χαϊδευτού (2004). "Η εξορυκτική-μεταλλευτική-μεταλλουργική βιομηχανία στην Ελλάδα μέσα από τον έντυπο τύπο." Δελτίον της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας **36**(1): 360-368.

Λαζαρίδης, Μ. (2005). "Ατμοσφαιρική ρύπανση με στοιχεία μετεωρολογίας." Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.

Τριανταφυλλίδης, Κ. (2009). Καταλυτική πυρόλυση βαρέων κλασμάτων πετρελαίου για την παραγωγή καυσίμων, Θεσσαλονίκη: Τζιόλας.

