

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA



ΜΠΑΓΛΑΤΖΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟ ΑΤΥΧΗΜΑ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ
ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΣΕ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ
ΥΓΡΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Ακαδημαϊκό Έτος: 2021 -2022

Επιβλέπων: Δρ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΣ
Επιβλέπων: Δρ. ΙΩΑΝΝΗΣ ΣΑΡΡΗΣ
Οκτώβριος 2022

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Ακαδημαϊκό Έτος: 2021-2022

ΜΠΑΓΛΑΤΖΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟ ΑΤΥΧΗΜΑ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ
ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΣΕ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ
ΥΓΡΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

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

Οκτώβριος 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.

ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟ ΑΤΥΧΗΜΑ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ
ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΣΕ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ
ΥΓΡΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής
τριμελή επιτροπή:

ΙΩΑΝΝΗΣ ΣΑΡΡΗΣ Καθηγητής	ΚΩΝ/ΝΟΣ ΜΟΥΣΤΡΗΣ Αναπληρωτής Καθηγητής	ΚΩΝ/ΝΟΣ ΒΑΣΙΛΟΠΟΥΛΟΣ Διδάκτορας ΕΣΠΑ
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

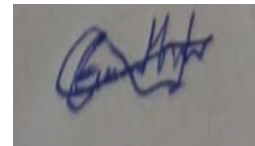
ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Μπαγλατζής Εμμανουήλ του Παναγιώτη, με αριθμό μητρώου 46147987, φοιτητής 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».

Ο Δηλών
Εμμανουήλ Μπαγλατζής



ABSTRACT

In the presence of industrial accidents involving the release of liquid fuels in petrochemical facilities containing large cylindrical liquid fuel storage tanks, they result in the occurrence of fire with devastating consequences for both human health and the environment. In this thesis, the air flow around an array of crude oil storage tanks was studied using Computational Fluid Dynamics (CFD). The simulation was achieved using the OpenFOAM open source program, RANS simulation using a k-epsilon model. Subsequently studied the flow around the array of cylindrical fuel storage tanks in the presence of a crude oil pool fire accident in one of the six tanks. The simulation of accident was carried out by using URANS simulation and a k-epsilon model with fireFOAM solver. The fire characteristics such as flame, smoke, and temperature distributions of array tanks were studied. Finally an environmental impact assessment took place by extracting the risk zones from the concentration of the soot spread.

Keywords: layout of storage tanks ; crude oil pool fire ; Open Field Operation And Manipulation (OpenFOAM) ; RANS, URANS method ; industrial accident, safety zones

Ευχαριστίες

Η περάτωση των προπτυχιακών σπουδών μου πραγματοποιείται με αυτή τη διπλωματική που δεν θα ήταν εφικτή χωρίς την βοήθεια, την καθοδήγηση και τη συμβολή κάποιων ατόμων. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Ιωάννη Σαρρή για τις θεωρητικές βάσεις που μου έδωσε καθώς και για την βοήθεια στη διπλωματική όσον αφορά την υπολογιστική ρευστομηχανική. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Ιωάννη Λεκάκη που με παρέμπειπε στον Δρ. Κωνσταντίνο Βασιλόπουλο που μου ανέθεσε αυτό το θέμα, ενώ καθ'ολη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής με επέβλεπε αφοπλισμένος με υπομονή και επιμονή.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον ίδιο, τον Παναγιώτη Τζέκο και τον Χαρίτων Παυλίδη που με τη βοήθεια και την εμπιστοσύνη τους με μύησαν στον κόσμο της υπολογιστικής ρευστομηχανικής καθώς υπήρξαν διαθέσιμοι προς επικοινωνία ανά πάσα στιγμή για την επίλυση τυχόν αποριών.

Τους φίλους μου και συμφοιτητές μου, Κωνσταντίνο Σύριο, Αλέξη Παπά για την βοήθειά τους και για τη συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια των προπτυχιακών σπουδών. Τους φίλους μου Θοδωρή Μπεκάκο και Γιώργο Μητρούση για τη κατανόηση που έδειξαν ειδικά το τελευταίο χρονικό διάστημα που πραγματοποίησα τη διπλωματική μου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την πίστη τους και για τη στήριξη που μου παρείχαν καθ'ολη τη διάρκεια των σπουδών μου. Σας ευχαριστώ για όλες τις θησίες που έχετε κάνει για μένα

Σας ευχαριστώ όλους

Περιεχόμενα

ABSTRACT	iii
Ευχαριστίες	iv
Κατάλογος Σχημάτων	vii
Κατάλογος Πινάκων	x
Κατάλογος Εξισώσεων	xi
Λίστα Συντομογραφιών	xii
1 Εισαγωγή	1
2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	3
2.1 Ροή γύρω από απομονωμένη κυλινδρική δεξαμενή	3
2.2 Ατυχήματα σε συστοιχία δεξαμενών	9
2.3 Βέλτιστη προτυποποιημένη διάταξη των δεξαμενών καυσίμων προς αποφυγή ατυχήματος φωτιάς	13
2.3.1 Ομοιόμορφη και ανομοιόμορφη συστοιχία κυλινδρικών δεξαμενών καυσίμων	16
3 Ανάλυση των παραμέτρων ατυχήματος φωτιάς	18
3.1 Ανάλυση των παραμέτρων του ατυχήματος	18
3.2 Βασικές έννοιες για καύση , φωτιά και καύσιμα	20
3.2.1 Σύσταση και ιδιότητες αργού πετρελαίου	21
3.2.2 Χαρακτηριστικά φωτιάς λίμνης αργού πετρελαίου.....	25
3.3 Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα (ΑΟΣ)	27
4 Μεθοδολογία επίλυσης ροής	31
4.1 Αριθμητική προσέγγιση	31
4.1.1 Κατηγορίες μοντέλων διασποράς.....	31
4.1.2 Μαθηματικό μοντέλο	32
4.1.3 Αριθμητική μέθοδος επίλυσης	34
4.1.4 Υπολογιστική προσομοίωση της ροής γύρω από συστοιχία δεξαμενών.....	36
4.1.5 Υπολογιστική προσομοίωση της ροής γύρω από συστοιχία δεξαμενών με τη παρουσία ατυχήματος φωτιάς λίμνης αργού πετρελαίου στην οροφή μίας εκ των έξι δεξαμενών	36
5 Ροή Ανέμου Γύρω Από Συστοιχία Δεξαμενών	38
5.1 Αρχικές και Οριακές Συνθήκες	38
5.1.1 Προφίλ Ταχύτητας και Τύρβης στην Είσοδο.....	38
5.1.2 Κατατομές Προφίλ Ταχυτήτων σε Θέσεις Ενδιάμεσα στις Δεξαμενές.....	41
5.2 Υπολογιστικό χωρίο	43
5.2.1 Υπολογιστικό Πλέγμα	44
5.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων	47
5.3.1 Κατακόρυφα Ισοϋψής Γραφήματα.....	48
5.3.2 Οριζόντια Ισοϋψής γραφήματα	53

6 Προσομοίωση Ατυχήματος φωτιάς.....	65
6.1 Κατακόρυφα Ισοϋψείς γραφήματα πεδίου ταχύτητας	66
6.2 Οριζόντιο ισοϋψής γραφήματα πεδίου ταχύτητας	69
6.3 Κατακόρυφο Ισοϋψής Γράφημα Θερμοκρασιακού Πεδίου	71
6.4 Οριζόντια Ισοϋψής Γραφήματα Θερμοκρασιακού Πεδίου	72
6.5 Κατακόρυφο Ισοϋψής Γραφήμα Τοξικού Ρύπου	72
6.6 Ζώνες επικινδυνότητας	73
7 Συμπεράσματα	77
8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	80

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1 Σχηματική αναπαράσταση τοπολογίας μιας μέσης ροής (Frederich 2009)	4
Σχήμα 2-2 Μέση χρονική τιμή του αδιάστατου συντελεστή πίεσης του εξωτερικού τοιχώματος της δεξαμενής για διαφορετικούς αριθμούς Re , εικόνα από Sun (2020)	6
Σχήμα 2-3 Μέση χρονική τιμή του αδιάστατου συντελεστή πίεσης του εσωτερικού τοιχώματος της δεξαμενής για διαφορετικούς αριθμούς Re , εικόνα από Sun (2020)	7
Σχήμα 2-4 Διαγράμματα ταχύτητας ανέμου για μια EFRT στο επίπεδο XY κατά μήκος του άξονα X σε ταχύτητες ανέμου περιβάλλοντος, εικόνα από Fang, Huang et al. (2020)	8
Σχήμα 2-5 Κατακόρυφο ισοϋψής γράφημα με ροϊκές γραμμές του πεδίου ροής στο επίπεδο συμμετρίας, εικόνα από Γκολέμι (2022)	9
Σχήμα 2-6 Κατηγοριοποίηση των λιμνών φωτιάς (Miao, Wenhua et al. 2014) .	12
Σχήμα 2-7 Κατανομή της θερμοκρασίας του καπνού για ταχύτητα ανέμου 9 m/sec, εικόνα από Elhelw, El-Shobaky et al. (2021).....	13
Σχήμα 2-8 Σχεδιασμένη διάταξη συγκροτήματος δεξαμενών (Zhang, Dou et al. 2017)	14
Σχήμα 2-9 α.κάτοψη τετράγωνης διάταξης ενός συγκροτήματος δεξαμενών β. κάτοψη τριγωνικής διάταξης ενός συγκροτήματος δεξαμενών, εικόνα από Sengupta (2011).....	15
Σχήμα 2-10 Διάταξη συγκροτήματος δεξαμενών (Ghasemi and Nourai 2017) .	16
Σχήμα 2-11 Διάταξη δεξαμενών καυσίμων α.ευθυγραμμισμένης βιομηχανικής συστοιχίας , β. Κατανεμημένη βιομηχανικής συστοιχίας.....	17
Σχήμα 2-12 Διάταξη δεξαμενών καυσίμων μη ομοιόμορφης βιομηχανικής συστοιχίας με μεταβαλλόμενα ύψη δεξαμενών	17
Σχήμα 3-1 Χαρακτηριστικά φωτιάς, παρουσία ανέμου .Σχήμα από τον Hu (2017)	19
Σχήμα 3-2 Χημικοί τύποι υδρογονανθράκων (Ανδρίτσος 2008)	24
Σχήμα 3-3 Ζώνες της ατμόσφαιρας ως προς το ύψος και οι αντίστοιχες επικρατούσες θερμοκρασίες και πιέσεις (Γεντεκάκης 2010)	28
Σχήμα 3-4 Ημερήσια διακύμανση του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος πάνω από το έδαφος (Μπάρμπας 2013).....	30
Σχήμα 5-1 Αδιάστατο προφίλ ταχύτητας στην είσοδο του υπολογιστικού χωρίου και σύγκριση με αυτό της εξίσωσης.	39

Σχήμα 5-2 Αδιάστατο προφίλ τυρβώδους κινητικής ενέργειας στην είσοδο του υπολογιστικού χωρίου.	40
Σχήμα 5-3 Αδιάστατο προφίλ ρυθμού σκέδασης ανά μονάδα όγκου στην είσοδο του υπολογιστικού χωρίου.	40
Σχήμα 5-4 Υπόδειξη θέσεων αδιάστατων κατατομών προφίλ ταχυτήτων εντός του υπολογιστικού χωρίου.	41
Σχήμα 5-5 Αδιάστατα προφίλ κατατομών ταχύτητας για το επίπεδο $Z/H=0$	42
Σχήμα 5-6 Διαστάσεις υπολογιστικού χωρίου.	44
Σχήμα 5-7 Αδομητο πλέγμα.	46
Σχήμα 5-8 Αδομητο πλέγμα και πρισματικά γεωμετρικά στοιχεία στις επιφάνειες της δεξαμενής.	47
Σχήμα 5-9 Κατακόρυφα ισοϋψείς γραφήματα της αδιάστατης ταχύτητας U_x/U_{ref} για το επίπεδο α) $Y/H=-2,43$, β) στο επίπεδο συμμετρίας $Y/H=0,49$	
Σχήμα 5-10 Κατακόρυφα ισοϋψείς γραφήματα ροϊκών γραμμών του πεδίου ροής για το επίπεδο $Y/H=-2,43$	50
Σχήμα 5-11 Κατακόρυφο ισοϋψής γράφημα της πίεσης p για τις θέσεις α) $Y/H=-2,43$ και β) $Y/H=2,43$	51
Σχήμα 5-12 Κατακόρυφο ισοϋψής γράφημα της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k για το επίπεδο $Y/H=-2,43$	52
Σχήμα 5-13 Κατακόρυφο ισοϋψής γράφημα του ρυθμού σκέδασης ϵ για το επίπεδο $Y/H=-2,43$	52
Σχήμα 5-14 Αδιάστατο πεδίο ροής αξονικών ταχυτήτων U_x/U_{ref}	53
Σχήμα 5-15 Απεικόνιση των συντεταγμένων σε μοίρες πάνω σε μια κυλινδρική δεξαμενή.	54
Σχήμα 5-16 Οριζόντια ισοϋψείς γραφήματα του πεδίου ροής για τα επίπεδα α) $Z/H=0,25$, β) $Z/H=0,5$ και γ) $Z/H=0,75$	57
Σχήμα 5-17 Οριζόντια ισοϋψής γραφήματα ροϊκών γραμμών του πεδίου ροής για τα επίπεδα α) $Z/H=0,25$, β) $Z/H=0,5$ και γ) $Z/H=0,75$	59
Σχήμα 5-18 Οριζόντια ισοϋψείς γραφήματα της πίεσης p για τα επίπεδα α) $Z/H=0,25$, β) $Z/H=0,5$ και γ) $Z/H=0,75$	61
Σχήμα 5-19 Κατανομή των ταχυτήτων για τις τρεις δεξαμενες για το επίπεδο $Z/H=1$, α) πρώτη δεξαμενή, β) δεύτερη δεξαμενή και γ) τρίτη δεξαμενή.	63
Σχήμα 5-20 Κατακόρυφο ισοϋψής γράφημα της τυρβώδους κινητικής ενέργειας για το επίπεδο $Z/H=0,5$	64
Σχήμα 6-1 Υπολογιστικό χωρίο προσομοίωσης ατυχήματος.	66

Σχήμα 6-2 Κατακόρυφο ισοϋψής γράφημα πεδίου ταχύτητας για το επίπεδο $Y/H=-2,43$	67
Σχήμα 6-3 Κατακόρυφο ισοϋψής γράφημα πεδίου ταχύτητας για το επίπεδο $Y/H=2,43$	67
Σχήμα 6-4 Κατακόρυφο ισοϋψής γράφημα ροϊκών γραμμών στο επίπεδο $Y/H=-2,43$	68
Σχήμα 6-5 Κατακόρυφο ισοϋψής γράφημα ροϊκών γραμμών στο επίπεδο $Y/H=2,43$	69
Σχήμα 6-6 Οριζόντιο ισοϋψής γράφημα πεδίου ταχύτητας στο επίπεδο $Z/H= 1$	70
Σχήμα 6-7 Οριζόντιο ισοϋψής γράφημα ροϊκών γραμμών στο επίπεδο $Z/H= 1$ 70	
Σχήμα 6-8 Κατακόρυφο ισοϋψής γράφημα θερμοκρασιακού πεδίου K° για το επίπεδο $Y/H=-2,43$	71
Σχήμα 6-9 Οριζόντιο ισοϋψής γράφημα θερμοκρασιακού πεδίου για το επίπεδο $Z/H=1$	72
Σχήμα 6-10 Κατακόρυφο ισοϋψής γράφημα διασποράς διοξειδίου του άνθρακα για το επίπεδο $Y/H=-2,43$	73
Σχήμα 6-11 Κατακόρυφο ισοϋψής γράφημα διασποράς καπνού για το επίπεδο $Y/H=-2,43$	75
Σχήμα 6-12 Κατακόρυφο ισοϋψής γράφημα σχηματισμού ζωνών επικυδυνότητας καπνού για το επίπεδο $Y/H=-2,43$	76
Σχήμα 6-13 Διάγραμμα εξέλιξης της πορείας του καπνού για το επίπεδο $Y/H=-2,43$	76

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3-1 Όρια περιεκτικότητας των συστατικών του πετρελαίου (Αχίλιας , Ελευθεριάδης et al. 2015).....	22
Πίνακας 3-2 Ταξινόμηση του αργού πετρελαίου σε σχέση με την πυκνότητα του (Ανδρίτσος 2008).....	25
Πίνακας 5-1 Διαστάσεις κυλινδρικής δεξαμενής υπολογιστικού	44
Πίνακας 5-2 Ορισμός χαρακτηριστικών μεγεθών ανακυκλοφοριών στο επίπεδο $Y/H=-2,43$	49
Πίνακας 5-3 Ορισμός χαρακτηριστικών μεγεθών ανακυκλοφοριών στο επίπεδο $Z/H=0,25$	55
Πίνακας 5-4 Ορισμός χαρακτηριστικών μεγεθών ανακυκλοφοριών στο επίπεδο $Z/H=0,5$	55
Πίνακας 5-5 Ορισμός χαρακτηριστικών μεγεθών ανακυκλοφοριών στο επίπεδο $Z/H=0,75$	56
Πίνακας 6-1 Κλίμακα έντασης ανέμου (Zhou 2019).....	66

Κατάλογος Εξιιώσεων

(3-1).....	24
(4-1).....	33
(4-2).....	33
(4-3).....	33
(4-4).....	33
(4-5).....	34
(4-6).....	34
(4-7).....	34
(4-8).....	35
(4-9).....	36
(4-10).....	36
(4-11).....	36
(5-1).....	38
(5-2).....	38
(5-3).....	39
(5-4).....	39
(6-1).....	65
(6-2).....	65
(6-3).....	74

Λίστα Συντομογραφιών

API	American Petroleum Institute
ARIS	Advanced Research Information System
CFD	Computational Fluid Dynamics
DNS	Direct Numerical Simulation
EPA	Environmental Protection Agency
FDS	Fire Dynamic Simulation
IDLH	Immediately Dangerous to Life and Health
LC1	Lethal Concentration 1
LC50	Lethal Concentration 50
LES	Large Eddy Simulation
NFPA	National Fire Protection Association
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
NIST	National Institute of Standards and Technology
OpenFOAM	Open Field Operation And Manipulation
RAM	Random-Access Memory
RANS	Reynolds-Averaged Navier Stokes
URANS	Unsteady Reynolds-Averaged Navier Stokes
ΑΟΣ	Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα
BAME	Βιομηχανικό Ατύχημα Μεγάλης Έκτασης
ΕΔΥΤΕ	Εθνικό Δίκτυο Υποδομών Τεχνολογίας & Έρευνας

1 Εισαγωγή

Το βιοτικό επίπεδο του ανθρώπου βελτιώθηκε με την λειτουργία των πετρελαϊκών βιομηχανιών, καλύπτοντας τις ανάγκες μεταφοράς, θέρμανσης και παραγωγής ενέργειας. Ωστόσο για την αδιάλειπτη κάλυψη των ανθρώπινων αναγκών, τίθενται το ζήτημα της βιομηχανικής ασφάλειας διότι εκτός από την συλλογή, την επεξεργασία και την μεταφορά των πετρελαϊκών προϊόντων προηγείται η αποθήκευση αυτών, είτε βρίσκεται σε υγρή μορφή είτε σε αέρια κατάσταση, αποθηκεύοντας σε διαφόρων ειδών δεξαμενές παρατηρώντας διάφορες αντιδράσεις μεταξύ του εξωτερικού περιβάλλοντος και των καυσίμων. Ως απόρροια των παραπάνω είναι η εξέλιξη διαφόρων φαινομένων που επιφέρουν καταστροφικές συνέπειες, όπως εκρήξεις, αναφλέξεις, διασπορά ρύπων και πρόκλησης ατυχήματος πυρκαγιάς. Για την επίλυση του θέματος έχουν εφαρμοστεί μεθοδολογίες πρόβλεψης, αποτίμησης και εμποπτείας του κινδύνου εδώ και αρκετές δεκαετίες. Ως εκ τούτου οι πιο επικίνδυνες και υπέρμετρες καταστάσεις να θεωρούνται γνωστές και αντιμετωπίσιμες, εντούτοις δεν έχουν πάψει να πραγματοποιούνται σοβαρά Βιομηχανικά Ατυχήματα Μεγάλης Έκτασης (BAME)

Εξαιτίας όμως της εμφάνισης πολύπλοκων φαινομένων που παρατηρούνται γύρω από μία δεξαμενή αποθήκευσης υγρών καυσίμων, θεωρείται ως πρόκληση η ενδελεχή μελέτη της εξελικτικής πορείας μίας πυρκαγιάς σε συστοιχία δεξαμενών αποθήκευσης αργού πετρελαίου με τη παρουσία ανέμου καθώς διαπιστώνονται συγκεκριμένα σημεία ενδιαφέροντος προς κατανόηση.

Ένα εξ' αυτών των σημείων ενδιαφέροντος, είναι η παρατήρηση των χαρακτηριστικών της ροής του αέρα γύρω από τη γεωμετρία συστοιχίας κυλινδρικών δεξαμενών. Στη παρούσα διπλωματική επιλέχθηκε να μελετηθεί η ροή του ανέμου γύρω από συστοιχία δεξαμενών αποθήκευσης αργού πετρελαίου και του φαινομένου που διακρίνεται κατά τη διάρκεια της πρόκλησης ατυχήματος μετά την εκδήλωση φωτιάς σε δεξαμενή. Η εξάπλωση της φωτιάς συνδέεται με παράγοντες όπως η επίδραση του ανέμου στα χαρακτηριστικά της φωτιάς (γωνία κλίση φλόγας) καθώς και η επίδραση της γεωμετρίας των δεξαμενών στην

διασπορά του καπνού λόγω της σύνθετης τυρβώδους ροής που δημιουργείται από την περίπλοκη διάταξη των δεξαμενών.

Στη συνέχεια αφού έχουμε διευθετήσει τη ροή του ανέμου γύρω από τη γεωμετρία της συστοιχίας των δεξαμενών, οι επικρατούσες συνθήκες, το υπολογιστικό χωρίο και το υλικό καύσης μελετάται φωτιάς λίμνης στην οροφή μίας εκ των δεξαμενών όπου καθορίζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η μελέτη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων προκύπτει από τη παρακολούθηση των σωματιδίων του καπνού που παράγονται κατά τη διάρκεια της καύσης με τη παρουσία ανέμου, έχοντας ως μέτρο τις ζώνες επικινδυνότητας .

Στην περίπτωση που η μελέτη ατυχήματος πραγματοποιείται σε φυσική κλίμακα με πραγματικές συνθήκες, το υψηλό κόστος προσομοίωσης είναι απαγορευτικό και απαιτείται εξειδικευμένος εξοπλισμός υψηλών προδιαγραφών. Προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι μελέτες ατυχημάτων δεξαμενών πετρελαίου, συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται εργαλεία της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (Computational Fluid Dynamics CFD), καθώς έχει καταδειχτεί ως η πλέον κατάλληλη μέθοδος προς επίλυση, μοντελοποίηση και προσομοίωση των ασυμπίεστων ροών με την εμφάνιση φωτιάς. Στην εν λόγω διπλωματική εργασία, χρησιμοποιήθηκε ο ανοιχτός κώδικας του OpenFOAM. Συγκεκριμένα εφαρμόστηκε η μέθοδος Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS), προκειμένου να επιλυθούν οι μερικές διαφορικές εξισώσεις που προσδιορίζουν την συμπεριφορά του ρευστού καθώς και την τυρβώδη ροή. Η συγκεκριμένη διπλωματική που μοντελοποιεί την συστοιχία δεξαμενών, χρήζει σημαντική υπολογιστική ισχύς η οποία διατίθεται από το υπερ υπολογιστικό σύστημα (cluster), φέροντας το όνομα ARIS (Advanced Research Information System) του Εθνικού Δικτύου Υποδομών Τεχνολογίας & Έρευνας (Ε.Δ.Υ.Τ.Ε).

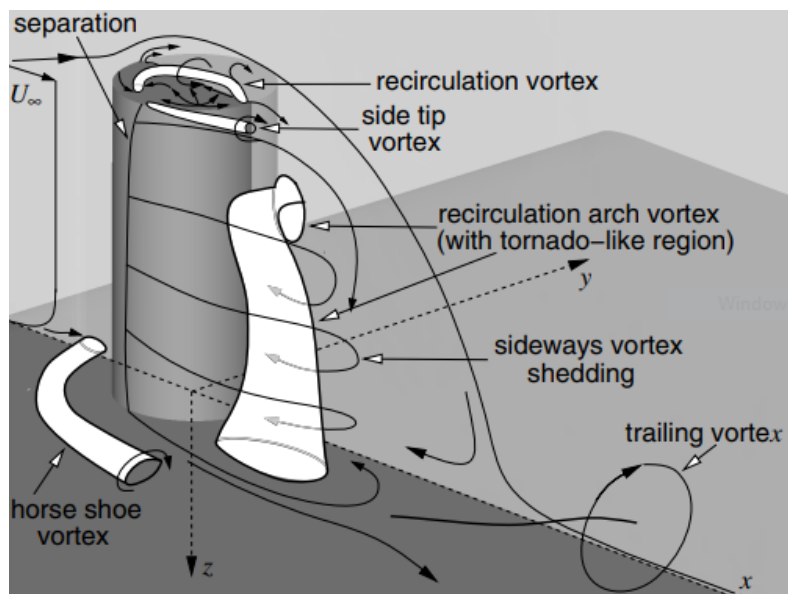
2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Ροή γύρω από απομονωμένη κυλινδρική δεξαμενή

Η ροή γύρω από κύλινδρο αποτελεί μία από τις βασικότερες ροές που απασχόλησαν και εξακολουθούν να απασχολούν τον κλάδο της ρευστομηχανικής, έχοντας ως απώτερο στόχο τη βελτιστοποίηση των απαντώμενων βασικών καθημερινών εφαρμογών, όπως οι ροές γύρω από δεξαμενές υγρών καυσίμων, πύργους ψύξης, καμινάδες, κυλινδρικά κτίρια, δηλαδή σε κυλινδρικές γεωμετρίες πεπερασμένης διαμέτρου, πεπερασμένου ύψους που βρίσκονται εκτεθειμένες στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα και αλληλεπιδρούν με τις εντάσεις των ανέμων. Οι Palau-Salvador, Stoesser et al. (2009) παρέθεσαν τη προσωπική τους μελέτη ροής του αέρα γύρω από έναν κύλινδρο πεπερασμένου ύψους τοποθετώντας τον σε κατακόρυφη θέση, ενώ υλοποίησαν μία βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με παρόμοιες πειραματικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί κατά καιρούς χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές. Κατά καιρούς έχουν πραγματοποιηθεί πειραματικές δοκιμές για ροές αέρα πέριξ κατακόρυφων κυλινδρικών γεωμετριών (Sumer, Christiansen et al. 1997, Fröhlich and Rodi 2004). Τα τελευταία χρόνια έχει παρουσιαστεί μία τάση προς τις αριθμητικές μεθόδους κατά κύριο λόγο των μοντέλων (Reynolds Averaged Navier-Stokes RANS) και (LES) με τις αντίστοιχες παραλλαγές. Όμως τα αριθμητικά μοντέλα (LES) φαίνεται να υπερτερούν έναντι των αριθμητικών μοντέλων (RANS), διότι κατά τη διεξαγωγή μελετών για ροές γύρω από μία τρισδιάστη κατακόρυφη κυλινδρική γεωμετρία προσεγγίζει καλύτερα το φυσικό πρόβλημα καθώς έχει διαπιστωθεί η εμφάνιση ποικιλόμορφων πολύπλοκων φυσικών φαινομένων που είναι κατά βάση ιδιαζόντως ασταθής, ενώ διακρίνεται η παρουσία και η αλληλεπίδραση διαφόρων συστημάτων από δίνες, όπως είναι η περιδίνηση (vortex shedding) που εμφανίζεται στο πίσω μέρος της κυλινδρικής γεωμετρίας. Ενώ τα στατιστικά μοντέλα τύρβης βρίσκονται σε πλεονεκτικότερη θέση.

Σύμφωνα με το Σχήμα 2-1) παρουσιάζεται ένα σύνολο από δίνες που μπορούν να εμφανισθούν γύρω από ένα κατακόρυφο κύλινδρο πεπερασμένου ύψους και διαμέτρου με την παρουσία πρόσκρουσης του ανέμου. Αρχικά διακρίνουμε τη

ροή πάνω από το έδαφος να εκτρέπεται άνωθεν, ενώ εξαιτίας της εμφάνισης υψηλότερης πίεσης ανακοπής ανάντη του κυλίνδρου εν σχέση με αυτή του επάνω ελεύθερου άκρου, η ροή ακολουθεί την άνω επιφάνεια του κυλίνδρου. Στη συνέχεια παρατηρείται ότι στο κατώτερο οριακό στρώμα η ροή εκτρέπεται κάτωθεν και δημιουργεί μια δίνη σε σχήμα πετάλου αλόγου (horse-shoe vortex). Έπειτα στο κατάντη τμήμα, οι δίνες τυλίγονται γύρω από τον κύλινδρο και προεκτείνονται με δύο συμμετρικά μέρη που αλληλεπιδρούν με αυτό. Εκτός από την εξέλιξη μιας πρωτεύουσας ισχυρής δίνης, παρατηρείται ότι αναπτύσσονται δευτερογενείς και τριτογενείς δίνες και ο συνδυασμός τους προκαλεί τη δημιουργία ενός πολύπλοκου συστήματος δινών, ενώ είναι εξαιρετικά ασταθές. Τέλος η ροή αποκολλάται στην άνω επιφάνεια, στη μπροστινή ακμή στο ύψος του κυλίνδρου, σχηματίζοντας ένα περίπλοκο ρεύμα άνωθεν του ελεύθερου άκρου του. Όμως η συμπεριφορά της ροής εξαρτάται από τη θέση της γεωμετρίας σε σχέση με το αν το σύνολό της βρίσκεται μέσα στο τυρβώδες οριακό στρώμα είτε κάποιο μέρος της παραμένει εκτός, συνεπώς η ροή στο πάνω τμήμα του κυλίνδρου να εμφανίζει επανακόλληση ή όχι.



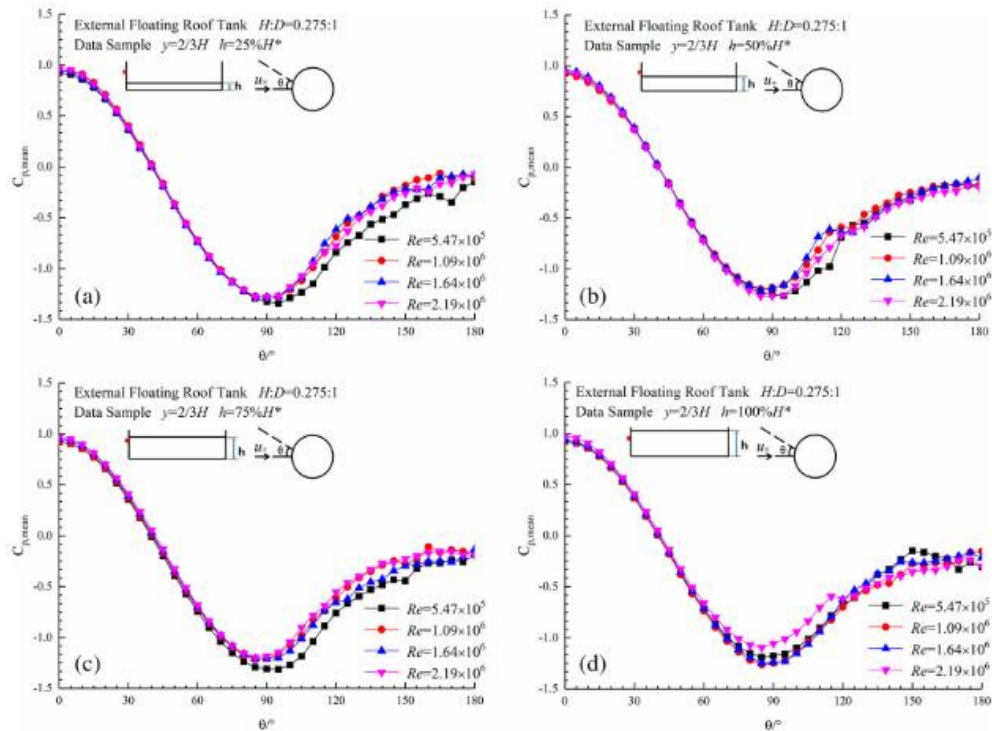
Σχήμα 2-1 Σχηματική αναπαράσταση τοπολογίας μιας μέσης ροής (Frederich 2009)

Μία από τις βασικές βιομηχανικές εφαρμογές που μελετώνται διεξοδικά, είναι η ροή του ανέμου γύρω από μία απομονωμένη δεξαμενή υγρών καυσίμων. Οι δεξαμενές αυτές ονομάζονται ατμοσφαιρικές και είναι ανοικτού ή κλειστού τύπου. Υπάρχουν μελετες που εξετάζουν τη μηχανική συμπεριφορά των κυλινδρικών δεξαμενών και των διατμητικών τάσεων που ασκούνται μεταξύ του κελύφους και των υγρών καυσίμων που περιέχονται εντός αυτής καθώς και των δυνάμεων που ασκούνται από τους υψηλούς ανέμους στην περιοχή, για την αποφυγή αστοχίας τους λόγω εμφάνισης λυγισμού (Macdonald 1988).

Η επίδραση του ανέμου και η πολύπλοκη γεωμετρία της διάταξης των δεξαμενών δημιουργούν μια σύνθετη ροή με έντονα φαινόμενα τύρβης. Μέσω του προσδιορισμού της ροής περίξ μιας κυλινδρικής δεξαμενής κατά τη διάρκεια εμφάνισης ενός βιομηχανικού ατυχήματος, μπορεί να προσδιοριστεί η διασπορά του ρύπου του καπνού καθώς και οι επικίνδυνες περιοχές που εγκλωβίζουν τους τοξικούς ρύπους. Για την προσέγγιση και μελέτη του θέματος έχουν πραγματοποιηθεί πολλές πειραματικές (Lauret 2015, Fang, Huang et al. 2020, Sun 2020) και αριθμητικές μελέτες (Fang, Huang et al. 2020, Sun 2020) χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές πειραματικών μεθόδων σε αεροσήραγγες ανοικτού και κλειστού κυκλώματος και μεθόδους υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD). Φαίνεται πως οι παράμετροι που παίζουν καθοριστικό ρόλο στη περίπτωση ροής γύρω από μία απομονωμένη δεξαμενή είναι ο αριθμός Reynolds (Re), ο λόγος ύψους- διαμέτρου (h/D), ο τύπος δεξαμενής καθώς και από την πληρότητα της δεξαμενής με καύσιμα.

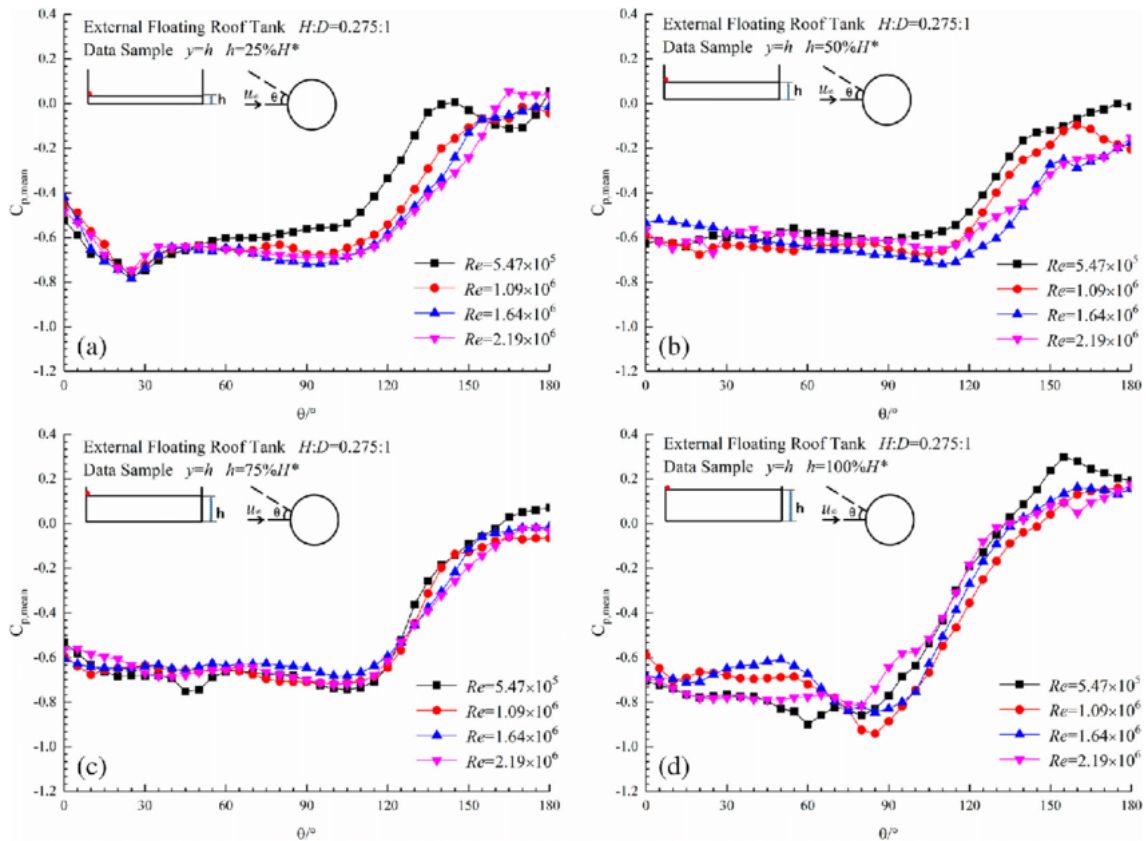
Συνακόλουθα σύμφωνα με τη μελέτη που πραγματοποίησαν οι (Sun 2020) εξακρίβωσαν την επίδραση του αριθμού Reynolds και της στάθμης που λαμβάνουν καθοριστικό ρόλο για ροή γύρω από δεξαμενή πλωτής οροφής (Floating Roof Tank) καθώς και τον συντελεστή πίεσης τόσο για το εξωτερικό όσο για το εσωτερικό τοίχωμα της δεξαμενής. Αρχικά η εξωτερική ροή του ανέμου για το εξωτερικό τοίχωμα και συντελεστή πίεσης, για αριθμούς Reynolds που λαμβάνουν τιμές από $5,47 \cdot 10^5$ έως $1,09 \cdot 10^6$ και από $1,64 \cdot 10^6$ έως $2,19 \cdot 10^6$ δηλαδή σε προσήνεμη για γωνία $\theta \leq 90$ δεν επηρεάζεται όσο αυτή που βρίσκεται

σε υπήνεμη για γωνία $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$ και για τις τέσσερις υπό εξέταση περιπτώσεις στάθμης υγρού Σχήμα 2-2



Σχήμα 2-2 Μέση χρονική τιμή του αδιάστατου συντελεστή πίεσης του εξωτερικού τοιχώματος της δεξαμενής για διαφορετικούς αριθμούς Re , εικόνα από Sun (2020)

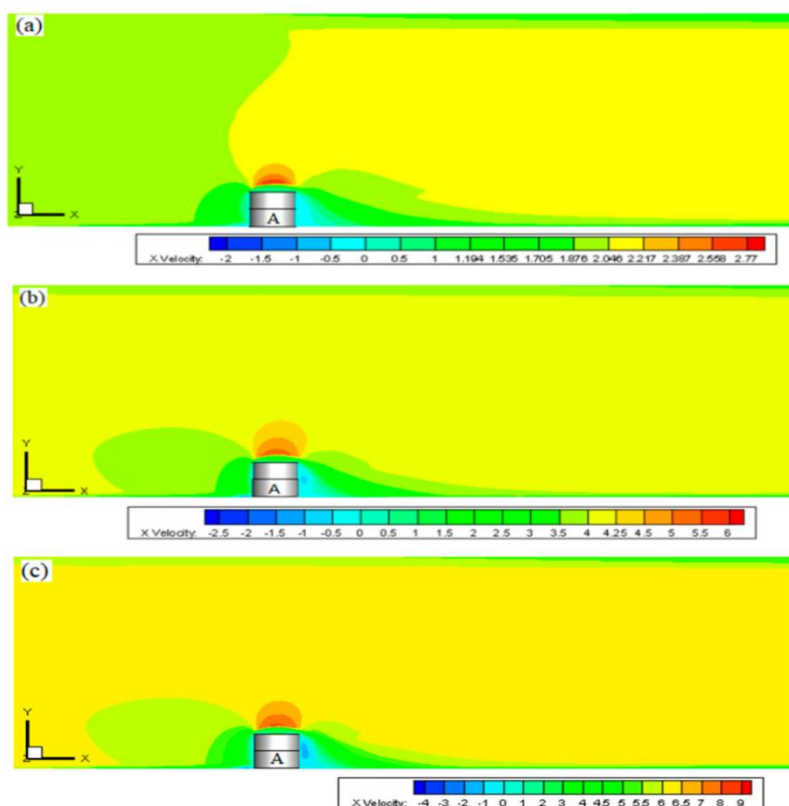
Εν αντιθέση ο συντελεστής πίεσης του εσωτερικού τοιχώματος Σχήμα 2-3) και για τις τέσσερις περιπτώσεις όταν η γωνία θ μεταβάλλεται από 0° έως 180° , δεν αλλάζει δραματικά, έως ότου η γωνία θ να υπερβεί τη κρίσιμη τιμή και μειώνεται με την αύξηση της στάθμης του υγρού. Σε μεγαλύτερους αριθμούς Re , με πληρότητα της δεξαμενής κατά 25 με 50 % επί του συνολικού ύψους της και για μεγάλες γωνίες θ , παρατηρήθηκε ότι μειώνεται η εσωτερική πίεση της δεξαμενής. Ενώ για πληρότητα της δεξαμενής κατά 75 με 100% η εσωτερική πίεση δεν διαφέρει τόσο για αριθμούς Re μεγαλύτερους από 10^6 .



Σχήμα 2-3 Μέση χρονική τιμή του αδιάστατου συντελεστή πίεσης του εσωτερικού τοιχώματος της δεξαμενής για διαφορετικούς αριθμούς Re, εικόνα από Sun (2020)

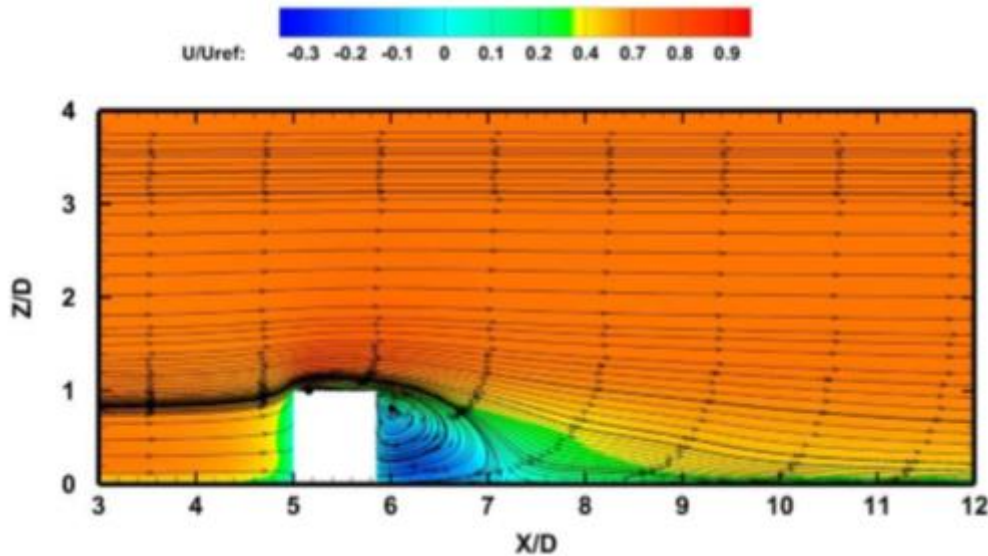
Οι Fang, Huang et al. (2020) υλοποίησαν πειράματα μικρής κλίμακας σε αεροσήραγγα παρατηρώντας τη ροή γύρω από μια απομονωμένη δεξαμενή, ενώ στη συνέχεια προσομοίωσαν με τη βοήθεια της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής τη ροή γύρω από μια απομονωμένη δεξαμενή πλωτής οροφής για τρεις διαφορετικές ταχύτητες ανέμων παρατηρώντας τα φαινόμενα ανάντη και κατάντη από τη δεξαμενή. Ανάντη από τη δεξαμενή η ροή του ανέμου σταδιακά ελαττώνεται έως ότου να λάβει τη τιμή μηδέν, ενώ σύμφωνα με το Σχήμα 2-4) διακρίνεται η περιοχή με τη ροή κοντά στο τοίχωμα της δεξαμενής να αναστρέφεται. Στην ίδια πλευρά κοντά στο έδαφος λαμβάνονται αρνητικές τιμές ως συνέπεια η αντιστροφή της ροής που συνεπάγεται με την εμφάνιση κινδύνου της υπέρθεσης ατμών. Στη κατάντη πλευρά δημιουργείται μια περιοχή με αρνητικές τιμές ταχύτητας. Πάνω από τη δεξαμενή σχηματίζεται μία περιοχή με μεγαλύτερες ταχύτητες από αυτές του περιβαλλοντικού ανέμου καθώς η περιοχή

άνωθεν του ύψους της δεξαμενής είναι πιο μικρή με αποτέλεσμα η ροή να οδηγείται σε επιταχυνόμενους ρυθμούς ροής.



Σχήμα 2-4 Διαγράμματα ταχύτητας ανέμου για μια EFRT στο επίπεδο XY κατά μήκος του άξονα X σε ταχύτητες ανέμου περιβάλλοντος, εικονα από Fang, Huang et al. (2020)

Η Γκολέμι (2022) παρατήρησε τη ροή γύρω από μια απομονωμένη κυλινδρική δεξαμενή σε μοντέλο υποκλίμακας υλοποιώντας πειράματα σε μία αεροσήραγγα κλειστού κυκλώματος και δοκιμών ανοικτού θαλάμου. Στη συνέχεια μελέτησε τη ροή του ανέμου γύρω από μια δεξαμενή χρησιμοποιώντας εργαλεία υπολογιστικής ρευστομηχανικής διαπιστώνοντας διάφορα φαινόμενα όπως φαίνονται στο Σχήμα 2-5) που εμφανίσθηκαν ανάντη και κατόντη από τη κυλινδρική δεξαμενή. Αρχικά παρατήρησε ανάντη από τη δεξαμενή την εμφάνιση μιας πεταλοειδούς δίνης που εμφανίστηκε εξαιτίας ενός σημείου ανακοπής. Στη συνέχεια παρατήρησε στο άνω μέρος μια αποκόλληση του οριακού στρώματος εξαιτίας της ορμής αδιατάραχτης ροής. Κατόντη από τη δεξαμενή παρατήρησε κοντά στο τοίχωμα την εμφάνιση μιας θολωτής δίνης.



Σχήμα 2-5 Κατακόρυφο ισοϋψής γράφημα με ροϊκές γραμμές του πεδίου ροής στο επίπεδο συμμετρίας, εικόνα από Γκολέμι (2022)

2.2 Ατυχήματα σε συστοιχία δεξαμενών

Οι δεξαμενές καυσίμων αποτελούν μια από τις πρωταρχικά και διεξοδικά μελετημένες βιομηχανικές εφαρμογές, εξαιτίας του σχηματισμού της γεωμετρίας τους, δηλαδή είτε κυλινδρική είτε σφαιρική μας παρέχουν τη δυνατότητα να διαφυλάξουμε, να μεταφέρουμε διάφορες εύφλεκτες χημικές ουσίες σε χημικές εγκαταστάσεις και πετρελαϊκές βιομηχανίες. Κατά καιρούς έχουν γίνει πολλές μελέτες για ατυχήματα σε δεξαμενές όπως των Αργυρόπουλος (2006). Το πιο σύνηθες, καταστροφικό ατύχημα που μπορεί να λάβει χώρα σε μία πετρελαϊκή βιομηχανία με την εμφάνιση επιπτώσεων σε τομείς όπως οικονομικούς (Chang 2006, Tauseef, Abbasi et al. 2018), κοινωνικούς (Rodante 2005), είναι αυτό της πρόκλησης φωτιάς (Miao, Wenhua et al. 2014). Εξαιτίας της ανάγκης αποθήκευσης υπέρογκων ποσοτήτων από εύφλεκτες πρώτες ύλες, απαιτείται η δημιουργία επιπρόσθετων δεξαμενών, με αποτέλεσμα να εμφανισθεί μία κατάσταση αλυσιδωτών ατυχημάτων που φέρει το όνομα αλυσιδωτά ατυχήματα (domino effect) (Ding, Khan et al. 2021, Sarvestani, Ahmadi et al. 2021). Παρά τις μελέτες που πραγματοποιούνται κατά καιρούς φαίνεται πως συμβαίνουν ακόμα ατυχήματα μεγάλου βεληνεκούς δηλαδή (BAME). Ως εκ τούτου η πολιτεία και διάφοροι φορείς όπως American Petroleum Institute (A.P.I), National Fire Protection Association (N.F.P.A), Enviromental Protection Agency (E.P.A) αλλά

και η επιστημονική κοινότητα θα πρέπει να εφησυχάζονται και να είναι σε διαρκή επαγρύπνηση για την αποφυγή ατυχημάτων (BAME).

Η έρευνα των Chang (2006) κατέγραψε με βάσει στατιστικών στοιχείων μεταξύ των χρονικών ετών 1960 έως 2003, 242 ατυχήματα σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις που περιέχουν δεξαμενές αποθήκευσης. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν πως το 74% των ατυχημάτων έλαβε χώρα σε διηλιστήρια πετρελαίου, σε τερματικούς σταθμούς πετρελαίου ή αποθήκευσης.

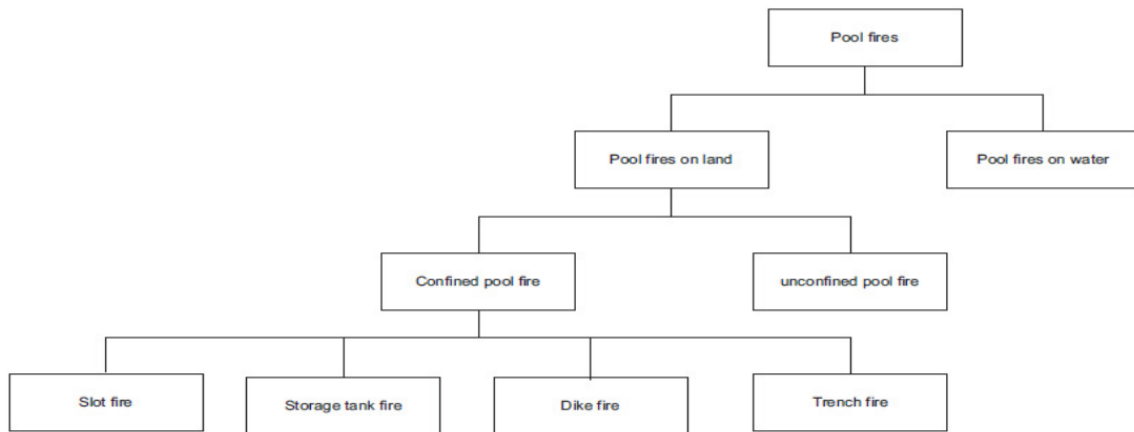
Άλλη μια βιβλιογραφική έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τους Zheng (2011) συγκέντρωσε στατιστικά στοιχεία από 50 ατυχήματα που συνέβησαν σε δεξαμενές καυσίμων, για τη χρονική περίοδο 1959 έως 2009. Σύμφωνα με την εν λόγω έρευνα το 76% των ατυχημάτων που συνέβησαν είχαν ως αποθηκευμένο καύσιμο αργό πετρέλαιο, βενζίνη, ντήζελ, ενώσεις βενζολίου (τολουόλιο, βενζόλιο, νιτροβενζόλιο κλπ.) καθώς και αλκοόλες όπως αιθανόλη και μεθανόλη. Έπειτα κατέδειξαν σε ποσοστά από τη πιο συχνή στη πιο αραιή εμφάνιση συμβάντων ατυχημάτων από υδρογονάνθρακες να είναι αυτή σε πετροχημικές εγκαταστάσεις (30%), σε διυλιστήρια πετρελαίου (22%), σε χώρους αποθήκευσης πετρελαίου (12%) και σε σταθμούς διανομής υγρών και αέριων καυσίμων (6%). Τέλος εκτός από τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις που έχουν ως κύριο καύσιμο τους υδρογονάνθρακες, σημειώθηκε το 24% των συμβάντων να οφείλεται από τα οινόποια και συγκεκριμένα κατά τη παραγωγή λιπασμάτων.

Η αιτία των ατυχημάτων σε δεξαμενές καυσίμων είναι συνιφασμένη με την εμφάνιση ατυχημάτων τύπου πυρκαγιάς και ανάφλεξης (Miao, Wenhua et al. 2014). Κάποιοι από τους λόγους που οδηγούν στη πρόκληση ατυχημάτων σε δεξαμενές είναι : η παρουσία εύφλεκτων ατμών και υγρών, κεραυνός, κακή συντήρηση, αστοχία εξοπλισμού, εργασίες συντήρησης, στατικός ηλεκτρισμός, ρωγμές και ρήξεις εξαιτίας γύρασης των υλικών της δεξαμενής, διαρροές ,αυτανάφλεξη και φυσικές καταστροφές (Argyropoulos, Christolis et al. 2012, Nivolianitou, Argyropoulos et al. 2012). Σύμφωνα με την έρευνα των (Chang 2006, Zheng 2011) κατέδειξαν τους πιο κοινούς λόγους ανάφλεξης :

- Ανοιχτή φωτιά
- Αυτανάφλεξη

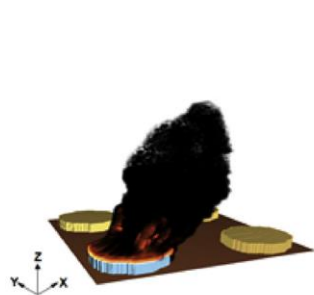
- Ηλεκτρικοί σπινθήρες
- Κεραυνοί
- Στατικός ηλεκτρισμός

Σύμφωνα με τους (Miao, Wenhua et al. 2014, Ahmadi 2019), η πλειονότητα των βιομηχανικών ατυχημάτων αντιστοιχεί στη παρουσία λίμνης φωτιάς (pool fire). Εκτός από τη λίμνη φωτιάς έχουν διαπιστωθεί και άλλα είδη φωτιάς όπως η γλώσσα φωτιάς (jet fire), πύρινης σφαίρας (fire ball) και στιγμιαίας ανάφλεξης (flash fire). Μια λίμνη φωτιάς αποτελεί συνέπεια πολλών διαφορετικών περιπτώσεων. Η πρόκλησή της κυρίως οφείλεται στην απελευθέρωση –διαρροή εύφλεκτου περιεχομένου από τον εξοπλισμό. Εάν το περιεχόμενο είναι υγρό, η δημιουργία της λίμνης προκύπτει εξαιτίας της χαμηλής θερμοκρασίας αυτού από το κανονικό σημείο ζέσεώς του. Η γεωμετρία της λίμνης εξαρτάται από την οριοθέτηση του εξοπλισμού όπως αυτή του αναχώματος, εκτός αν η ποσότητα που διέρρευσε αποτελεί μεγάλο μέρος από αυτή που έχει την ικανότητα να συγκρατήσει το ανάχωμα. Αν το υγρό περιεχόμενο βρίσκεται αποθηκευμένο υπό πίεση καθώς και σε θερμοκρασία που υπερβαίνει το σημείο ζέσεώς του, διαπιστώνεται πως ένα μέρος εκτονώνεται υπό μορφή ατμού ενώ το υγρό που δεν υπέστη εκτόνωση θα σχηματίσει μια υγρή λίμνη. Με την εμφάνιση κάποιας πηγής ανάφλεξης θα δημιουργηθεί η λίμνη φωτιάς (Ντεμίρη 2009). Με τη δημιουργία λίμνης φωτιάς είναι εμφανής η εξάτμιση και δημιουργίας μιας τυρβώδης διάχυσης φλόγας. Η εμφανής διαφορά που διακρίνεται σε σχέση με τα άλλα είδη φωτιάς είναι η αρχική μικρή ορμή καθώς και ο επηρεασμός από τις ανωστικές δυνάμεις. Η κατηγοριοποίηση πραγματοποιείται με κριτήρια όπως το μέσω εμφάνισης, την οριοθέτηση της φωτιάς και τον χώρο εμφάνισης Σχήμα 2-6).

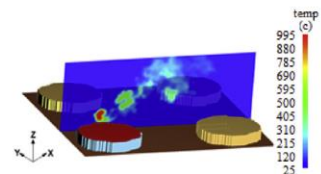
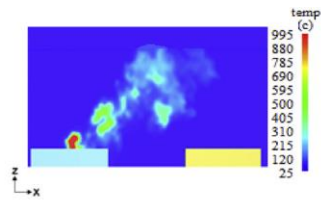


Σχήμα 2-6 Κατηγοριοποίηση των λιμνών φωτιάς (Miao, Wenhua et al. 2014)

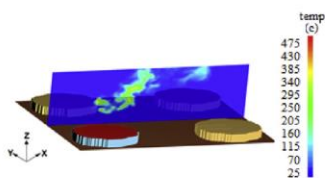
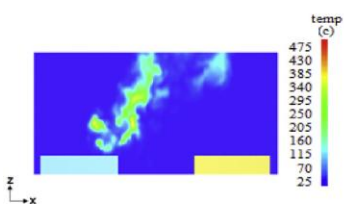
Ο Elhelw, El-Shobaky et al. (2021) στην μελέτη τους προσομοίωσαν πυρκαγιά, τύπου λίμνης φωτιάς σε μια συστοιχία δεξαμενών πετρελαίου. Στην μελέτη τους προσδιόρισαν την κατανομή της θερμοκρασίας της φλόγας και του καπνού και την μεταβολή τους για διαφορετικές ταχύτητες του ανέμου (Σχήμα 2-7). Συγκεκριμένα μελετήθηκε η επίδραση του ανέμου για ταχύτητες με τιμές 3, 9 και 18 m/s σε πυρκαγιά που εκδηλώθηκε σε μια από τις 4 δεξαμενές μιας συστοιχίας δεξαμενών αργού πετρελαίου. Η μελέτη αυτή εκτός από την χαρτογράφηση της θερμοκρασίας του καπνού στις δεξαμενές πραγματικής κλίμακας αναφέρθηκε στην επίδραση της ταχύτητας του ανέμου στην κατανομή της θερμοκρασίας. Όσο υψηλότερη είναι η ταχύτητα του ανέμου τόσο ο βαθμός κλίσης της φλόγας αυξάνεται και επηρεάζει σημαντικά την άνοδο της κατανομής της θερμοκρασίας.



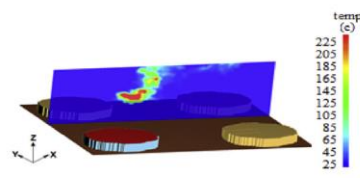
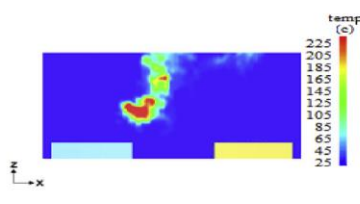
(a) FDS Smoke output



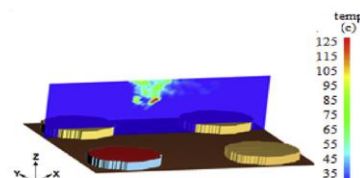
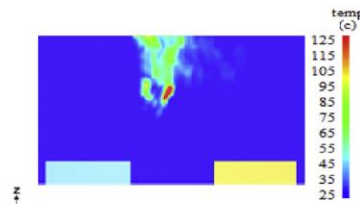
(b) plane-cut [II]



(c) Horizontal plane-cut [III]



(d) Horizontal plane-cut [IV]



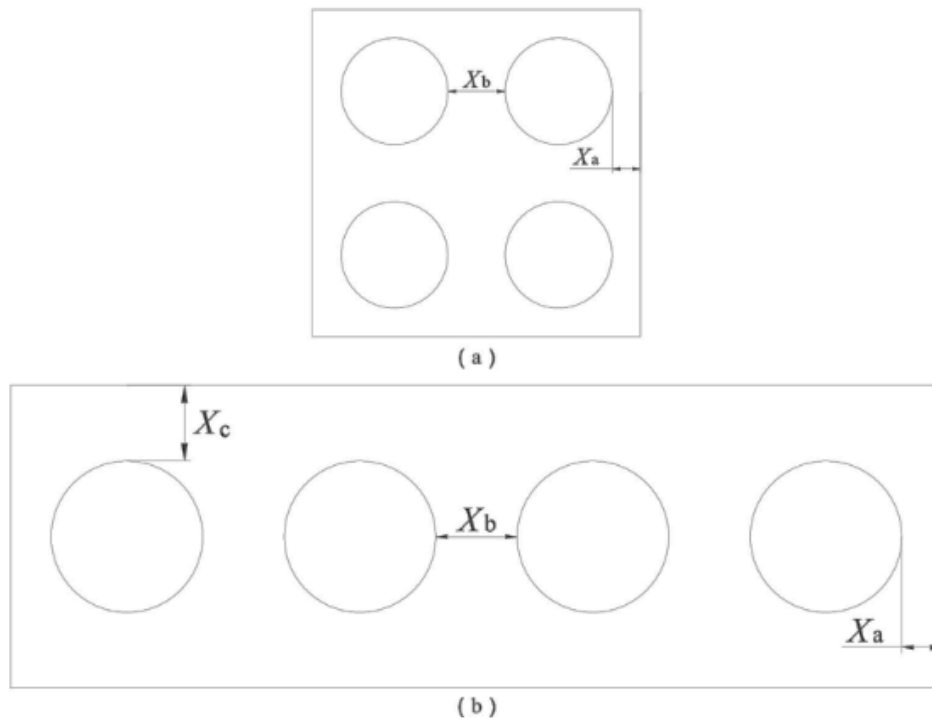
(e) Horizontal plane-cut [V]

Σχήμα 2-7 Κατανομή της θερμοκρασίας του καπνού για ταχύτητα ανέμου 9 m/sec, εικόνα από Elhelw, El-Shobaky et al. (2021)

2.3 Βέλτιστη προτυποποιημένη διάταξη των δεξαμενών καυσίμων προς αποφυγή ατυχήματος φωτιάς

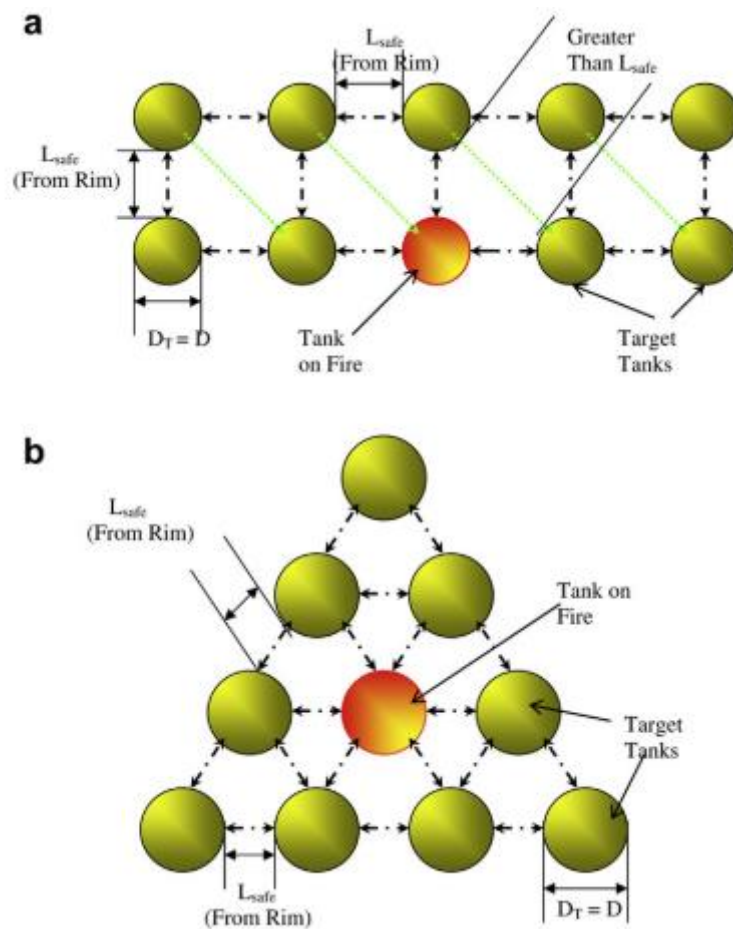
Προκειμένου αυτού του είδους τα ατυχήματα να παραμείνουν υπό έλεγχο σύμφωνα με τους Zhang, Dou et al. (2017), έχουν προταθεί δύο ειδών βέλτιστες προτυποποιημένες διατάξεις δεξαμενών καυσίμων. Η πρώτη διάταξη δεξαμενών (Σχήμα 2-8α) αποτελείται από μία συμμετρική διάταξη τεσσάρων δεξαμενών παρατεταγμένες ανά δύο η μία απέναντι από την άλλη και η μεταξύ τους απόσταση ίση με X_b και X_a ως η πλησιέστερη απόσταση από μία άλλη αυθαίρετη δεξαμενή. Ενώ η δεύτερη διάταξη δεξαμενών (Σχήμα 2-8β) αποτελείται από μία συμμετρική διάταξη τεσσάρων δεξαμενών αποθήκευσης υγρών καυσίμων

παρατεταγμένες σε σειρά με τις αντίστοιχες αποστάσεις X_a , X_b και X_c ως η μακρινή απόσταση που θα έχει από μία άλλη αυθαίρετη δεξαμενή. Προκειμένου να αποφευχθεί η εμφάνιση θερμικής ακτινοβολίας μπορούν να προσδιοριστούν οι αποστάσεις X_a και X_c καθώς και η απόσταση X_b .



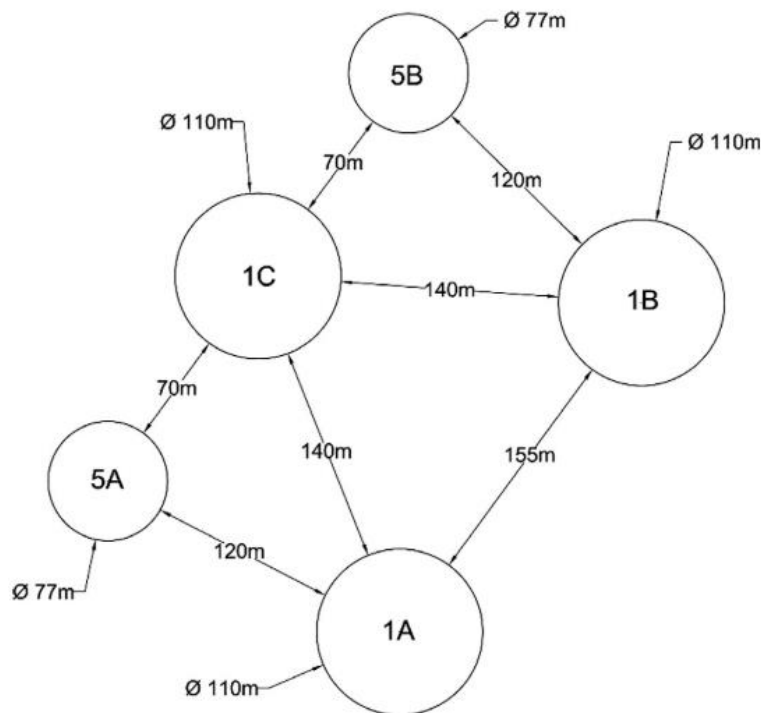
Σχήμα 2-8 Σχεδιασμένη διάταξη συγκροτήματος δεξαμενών (Zhang, Dou et al. 2017)

Στη συνέχεια σύμφωνα με τους Sengupta (2011) έχουν προτείνει με τη σειρά τους άλλα δύο είδη διατάξεων δεξαμενών καυσίμων (Σχήμα 2-9α) για δέκα δεξαμενές παρατεταγμένες σε τετραγωνική διάταξη και αυτή του (Σχήμα 2-9β) δέκα δεξαμενών τοποθετημένες σε τριγωνική διάταξη ώστε σε περίπτωση εμφάνισης πυρκαγιάς να διευκολύνουν το έργο των πυροσβεστών καθώς και τη δημιουργία μίας ζώνης προστασίας των κατοικημένων περιοχών για περιβαλλοντικούς σκοπούς.



Σχήμα 2-9 α.κάτοψη τετράγωνης διάταξης ενός συγκροτήματος δεξαμενών β. κάτοψη τριγωνικής διάταξης ενός συγκροτήματος δεξαμενών, εικόνα από Sengupta (2011)

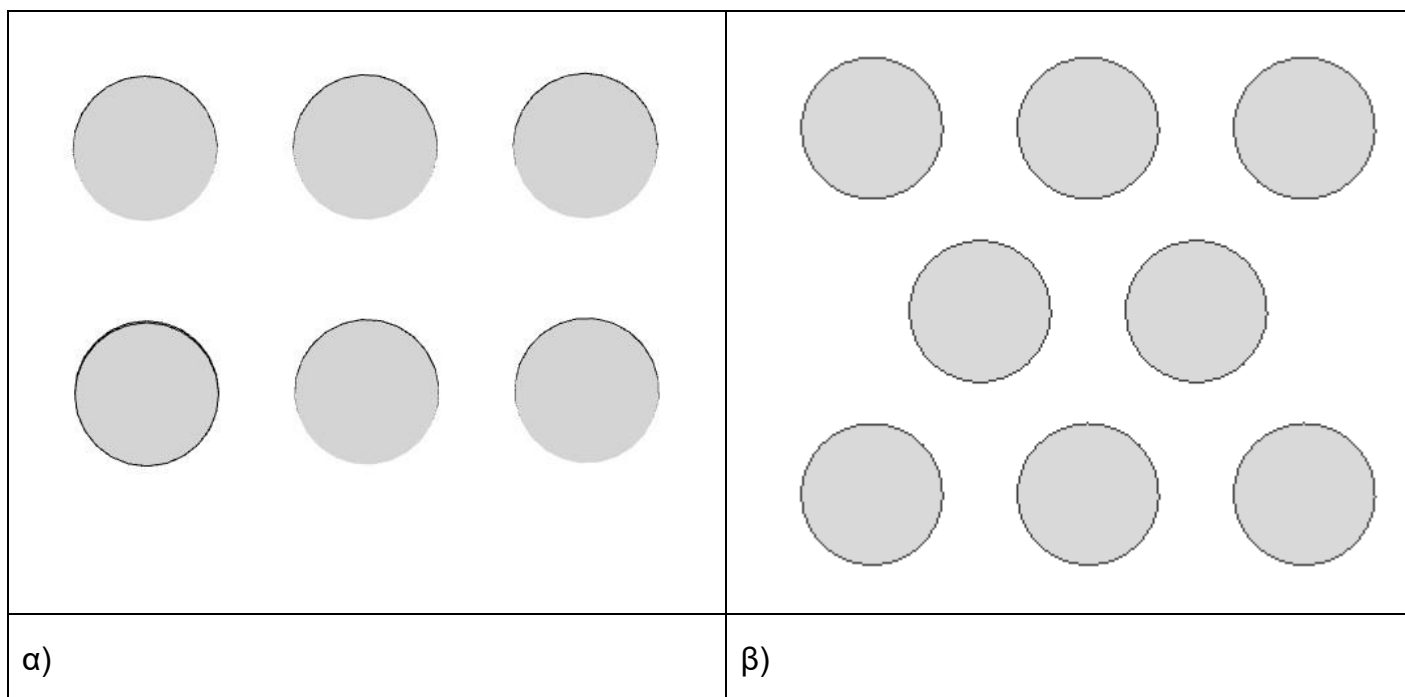
Τέλος οι Ghasemi and Nourai (2017) παρουσίασαν τη δική τους διάταξη ενός συγκροτήματος που απαρτίζεται από τρεις δεξαμενές ανοικτής πλωτής οροφής με διάμετρο 110 m και από δύο δεξαμενές ανοικτής πλωτής οροφής με διάμετρο 77 m (open-top floating roof) (Σχήμα 2-10), ενώ το ύψος των πέντε δεξαμενών είναι 20 m. Σύμφωνα με τη διάταξη του συγκροτήματος οι Ghasemi and Nourai (2017) έδειξαν πως ανταποκρίνεται κατά την εμφάνιση του χειρίστου σεναρίου πολλαπλασιαστικότητας (domino) καθώς και στον περιορισμό αυτού εφαρμόζοντας τεχνικές πυρόσβεσης για τη προστασία των δεξαμενών.



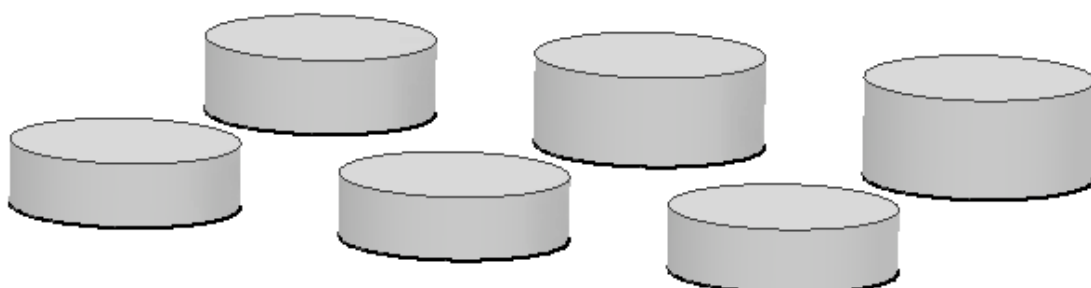
Σχήμα 2-10 Διάταξη συγκροτήματος δεξαμενών (Ghasemi and Nourai 2017)

2.3.1 Ομοιόμορφη και ανομοιόμορφη συστοιχεία κυλινδρικών δεξαμενών καυσίμων

Η χρησιμοποίηση ομοιόμορφων (staggered) και ανομοιόμορφων (unstaggered) συστοιχιών κυλίνδρων δημιουργεί ένα μοντέλο ενός βιομηχανικού περιβάλλοντος που μπορούν να προκύψουν αποτελέσματα συναφή με αυτά των κυλινδρικών δεξαμενών. Οι ομοιόμορφες συστοιχίες κυλινδρικών δεξαμενών είτε είναι ευθυγραμμισμένες (Σχήμα 2-11α) είτε είναι κατανεμημένες (Σχήμα 2-11β) που παρουσιάζουν κοινό ύψος, κοινή διάμετρο καθώς και κοινές αποστάσεις ενώ εμπεριέχουν τον ίδιο τύπο καυσίμου συγκριτικά με μια ανομοιόμορφη συστοιχία (Σχήμα 2-12) κυλινδρικών δεξαμενών που έχουν κοινές αποστάσεις αλλά διαφορετικό ύψος και αυτό διότι περιέχουν διαφορετικούς τύπους καυσίμων όπως νάφθα (naphtha), αργό πετρέλαιο (crude oil) και ντήζελ (diesel).



Σχήμα 2-11 Διάταξη δεξαμενών καυσίμων α.ευθυγραμμισμένης βιομηχανικής συστοιχίας , β. Κατανομημένη βιομηχανικής συστοιχίας



Σχήμα 2-12 Διάταξη δεξαμενών καυσίμων μη ομοιόμορφης βιομηχανικής συστοιχίας με μεταβαλλόμενα ύψη δεξαμενών

3 Ανάλυση των παραμέτρων ατυχήματος φωτιάς

3.1 Ανάλυση των παραμέτρων του ατυχήματος

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναφέρθηκαν τα χαρακτηριστικά και οι ζώνες που απαντώνται σε μία φωτιά λίμνης αργού πετρελαίου ,χωρίς να ληφθούν υπόψιν οι επικρατούσες κλιματολογικές συνθήκες. Μια από τις κλιματολογικές συνθήκες που επηρεάζουν τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της φωτιάς, είναι η παρουσία ανέμου. Εξαιτίας της παρουσίας ανέμου δημιουργήθηκε μία κατηγορία γεωμετρικών χαρακτηριστικών που χαρακτηρίζουν τη φωτιά.

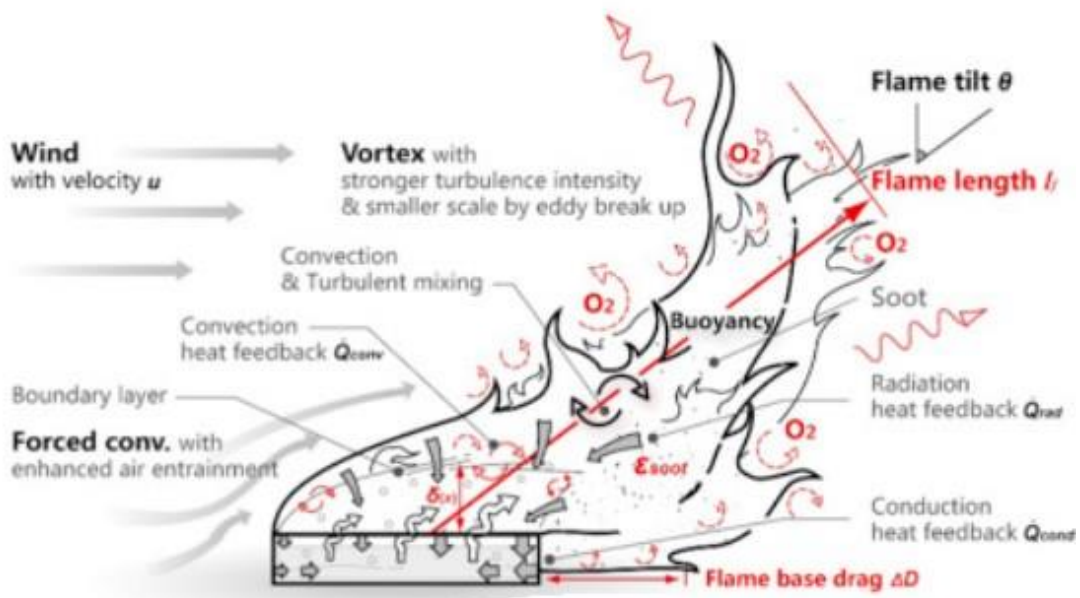
Το μήκος της φλόγας (flame length l_f) παίζει σημαντικό ρόλο στον κίνδυνο πυρκαγιάς. Αποτελεί την υπέρθεση της οριζόντιας ορμής του ανέμου και της κατακόρυφης άνωσης της φλόγας. Αυτό το φαινόμενο αλλάζει από την ύπαρξη τριών μηχανισμών :

- i. τη μεταβολή της εισροής αέρα
- ii. τη γωνία κλίσης θ της φλόγας
- iii. τον ρυθμό εξάτμισης του καυσίμου εξαιτίας της μεταβαλλόμενης ανάδρασης της θερμοκρασίας

Η κλίση της φλόγας (flame tilt θ) θεωρείται ένας από τα βασικά χαρακτηριστικά της φλόγας και επηρεάζεται από τη παρουσία ανέμου. Με τη παρουσία ανέμου η κεκλιμένη φλόγα κινείται προς το κατώρρευμα αυξάνοντάς του, την ένταση της ακτινοβολία με αποτέλεσμα να επιτευχθεί η εξάπλωση της φωτιάς. Επιπροσθέτως ορίζουν την ανατροφοδότηση της μεταβαλλόμενης ακτινοβολίας από τη φλόγα προς τη καιόμενη επιφάνεια.

Τέλος η οπισθέλκουσα βάση της φλόγας (base flame drag Δ_D) (Σχήμα 3-1) αποτελεί ένα ασταθές φαινόμενο μιας λίμνης φωτιάς με την εμφάνιση ανέμου. Η εμφάνιση αυτού του ασταθούς φαινομένου, σχηματίζεται ως προέκταση της βάσης της φλόγας με ένα συγκεκριμένο μήκος με τη κατεύθυνση του ανέμου στο κατώρρευμα κατάντη της δεξαμενής (Hu, Zhang et al. 2016). Η εμφάνιση αυτού του φυσικού μηχανισμού οφείλεται στη δημιουργία μιας λίμνης φωτιάς υπό τη παρουσία ανέμου με τη προϋπόθεση η πυκνότητα των ατμών του καυσίμου να βρίσκεται σε υψηλότερες τιμές από αυτή της πυκνότητας του περιβάλλοντικού

αέρα ως απόρροια οι ατμοί που χαρακτηρίζονται πιο βαριοί να βρίσκονται στη περιοχή πλησίον της υγρής επιφάνειας, συμπαρασύρονται κατευθυνόμενες προς το ύψος της βάσης και καίγονται στη κατεύθυνση του κατωρεύματος. Με το πέρασ κάποιας απόστασης, η πυκνότητα των καιόμενων ατμών θερμαίνεται λιγότερο από αυτή του ατμοσφαιρικού αέρα ως αποτέλεσμα να ελαχιστοποιείται. Συνεπώς η οπισθέλκουσα βάσης της φλόγας διέπεται από τον αριθμό Froude που αποτελεί ένα αδιάστατο αριθμό που ορίζει τον λόγο των αδρανειακών δυνάμεων προς τις ανωστικές δυνάμεις της φλόγας και από τον λόγο της πυκνότητας ατμών του καυσίμου προς του περιβάλλοντα αέρα.

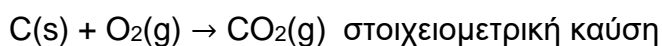


Σχήμα 3-1 Χαρακτηριστικά φωτιάς, παρουσία ανέμου .Σχήμα από τον Hu (2017)

3.2 Βασικές έννοιες για καύση , φωτιά και καύσιμα

Στη παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκε ως καύσιμο το αργό πετρέλαιο (crude oil), αφού βρίσκεται σε ακατέργαστη μορφή και αποθηκεύεται σε μεγάλες κυλινδρικές δεξαμενές έως ότου να διυλιστεί. Όμως κατά τη διάρκεια αποθήκευσής του σε δεξαμενές, πολύ συχνά παρατηρείται η εμφάνιση ατυχήματος φωτιάς από την αντίδραση του καυσίμου με τη δεξαμενή.

Η καύση θεωρείται ως μια χημική αντίδραση οξειδωσης του καυσίμου και απελευθέρωσης ποσοτήτων ενέργειας (Cengel and Boles 2015). Η οξειδωση πραγματοποιείται με τη βοήθεια του οξειδωτικού μέσου που συνήθως είναι ο αέρας. Οι αντιδράσεις καύσης είναι εξώθερμες ενώ παρατηρείται η εμφάνιση φλόγας και έκλυσης θερμών αέριων προϊόντων στο περιβάλλον. Κατά τη καύση οργανικών και ανόργανων ενώσεων, μετατρέπεται η χημική ενέργεια σε θερμική με τη βοήθεια του οξυγόνου. Με τη καύση των υδρογονανθράκων δημιουργείται το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) αν η καύση είναι στοιχειομετρική, ενώ η παρουσία του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) ή/και αιθάλης (C) υποδηλώνει ότι η καύση χαρακτηρίζεται ως ατελής.



Ως καύσιμο μπορεί να θεωρηθεί κάθε υλικό κατά τη διάρκεια της καύσης απελευθερώνει θερμική ενέργεια. Τα καύσιμα συγκαταλέγονται σε δύο ειδών κατηγορίες. Τα φυσικά καύσιμα που προέρχονται από τη φύση και τα τεχνητά καύσιμα που προέρχονται από τη φύση και υφίστανται κάποια επεξεργασία. Η πλειονότητα των καυσίμων αποτελείται από υδρογόνο (H) και από άνθρακα (C) που αποτελούν τους υδρογονάνθρακες με γενικό χημικό τύπο C_nH_m. Τα καύσιμα στη φύση εμφανίζονται σε τρεις φάσεις. Σε αέρια (φυσικό αέριο), σε υγρή (αργό πετρέλαιο) και σε στερεή (γαιάνθρακας), που έχουν προέλθει από την αναερόβια βακτηριακή αποσύνθεση των ζωικών και φυτικών οργανισμών (Αχίλιας , Ελευθεριάδης et al. 2015).

3.2.1 Σύσταση και ιδιότητες αργού πετρελαίου

Το αργό πετρέλαιο αποτελεί το πρωτεύον και ακατέργαστο προϊόν που συλλέγεται με την διαδικασία της άντλησης με τη βοήθεια των γεωτρήσεων. Μολονότι της πρωταρχικής κατάστασης που βρίσκεται το πετρέλαιο, ακολουθεί μία σειρά από ενέργειες ώστε να είναι σε θέση να μεταφερθεί είτε με δεξαμενόπλοια είτε με βυτιοφόρα είτε με αγωγούς μεταφοράς και στη συνέχεια να αποθηκευτεί σε μεγάλες κυλινδρικές δεξαμενές. Αρχικά πριν τη μεταφορά του επειδή κατά τη διάρκεια της άντλησής του περιέχονται νερό και αέρια συνίσταται η απομάκρυνσή τους, ενώ στη συνέχεια με το πέρας αυτής της διαδικασίας αφότου αποθηκευτεί μεταβαίνει στη διαδικασία πολύπλοκων φυσικών και χημικών διεργασιών της διύλισης.

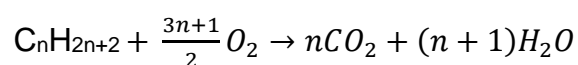
Το πετρέλαιο είναι ένα υγρό ορυκτό ανομοιογενές μείγμα υδρογονανθράκων που εμφανίζει οργανικές ενώσεις που περιέχουν άζωτο (N), θείο (S), οξυγόνο (O) και ίχνη από μέταλλα όπως νικέλιο (Ni), βανάδιο (V), σίδηρο (Fe) και χαλκό (Cu). Η σύστασή του ποικίλει ανάλογα με τη τοποθεσία, την ηλικία και το βάθος εξόρυξής του. Ενώ είθισται να λαμβάνει τιμές σε περιεκτικότητα τα όρια όπως αναγράφονται στον Πίνακα 3-1). Κατά την απόσταξη πετρελαίων που παρουσιάζουν ενώσεις με μεγάλη περιεκτικότητα σε θείο δυσκολεύουν την επεξεργασία και την αξιοποίησή του, καθώς μπορεί να προκαλέσουν διάβρωση σε αγωγούς, εξαρτήματα και στον εξοπλισμό, με αποτέλεσμα να διαφύγουν ενώσεις θείου προς το εξωτερικό περιβάλλον αναγνωρίζωντάς τις από την χαρακτηριστική οσμή που είναι βλαβερή για την ανθρωπότητα (Sadare, Obazu et al. 2017). Οι ενώσεις θείου δηλαδή το υδρόθειο (H_2S) εκτός από τη χαρακτηριστική οσμή και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, εξαιτίας της ευφλεκτότητας με την απελευθέρωση προς το περιβάλλον αντιδρά με τον αέρα και παράγεται το διοξείδιο του θείου (SO_2) που είναι ένας εκ των πολλών αέριων ρυπαντών (Jones and Pujad 2006). Το χρώμα του μπορεί να είναι μαύρο, πράσινο ή φαιοκίτρινο, ενώ είναι αδιάλυτο στο νερό (Ανδρίτσος 2008). Η πυκνότητα και το ιξώδες ποικίλουν ενώ το σημείο ζέσεώς του κυμαίνεται από $160^{\circ}C$ έως $540^{\circ}C$.

Πίνακας 3-1 Όρια περιεκτικότητας των συστατικών του πετρελαίου (Αχίλιας , Ελευθεριάδης et al. 2015)

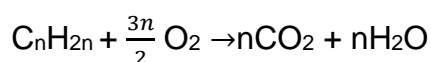
Συστατικό	Όρια
Άνθρακας	83 – 87 %
Υδρογόνο	10 – 14 %
Άζωτο	0.1 – 2.0 %
Οξυγόνο	0.05 – 1.5 %
Θείο	0.05 – 6.0 %
Μέταλλα (Ni, V, κλπ)	< 1000 ppm

Λόγω της σπουδαιότητας του πετρελαίου και των προϊόντων του συνεχίστηκε η ενδελεχή έρευνα αναλογικά με τη σύστασή του όπου διαπιστώθηκε ότι οι κυριότερες οργανικές ενώσεις οι οποίες ανάλογα με τη περιεκτικότητα των υδρογονανθράκων, καθορίζονται τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά σε σειρές όπως οι παραφινικές, ολεφινικές, ναφθενικές και αρωματικές που είθισται να έχουν από πέντε έως είκοσι άτομα άνθρακα.

Τα αλκάνια ή παραφίνες είναι κορεσμένοι αλειφατικοί υδρογονάνθρακες, που χαρακτηρίζονται ως απλές οργανικές ενώσεις αφού περιέχουν μόνο άτομα άνθρακα, υδρογόνου και απλούς ομοιοπολικούς δεσμούς. Ο γενικός χημικός τύπος είναι C_nH_{2n+2} και το όνομα κάθε μέλους της ομάδας έχει κατάληξη –ανιο όπως το αιθάνιο και το εξάνιο (Σχήμα 3-2α). Η δομή τους είναι είτε κανονική είτε διακλαδισμένη όπως το 2-2 διμέθυλοβουτάνιο (C_6H_{14}). Τα αλκάνια με αριθμό ατόμων άνθρακα $n < 5$ βρίσκονται σε αέρια φάση υπό συνθήκες περιβάλλοντος, ενώ όταν ο αριθμός ατόμων άνθρακα είναι $n > 15$ είναι ιξώδης (κηρώδη) υγρά. Οι παραφίνες υπάρχουν σε κάθε αργό πετρέλαιο με εξαίρεση αυτό της περιοχής του Οχάιο (ΗΠΑ). Τα αλκάνια αντιδρούν με περίσσεια οξυγόνου και έχουν ως παράγωγα προϊόντων το διοξείδιο του άνθρακα και το νερό. Απαραίτητη προϋπόθεση για την έναρξη της αντίδρασης καύσης είναι η παρουσία ενός σπινθήρα. Η γενική χημική αντίδραση είναι η παρακάτω :

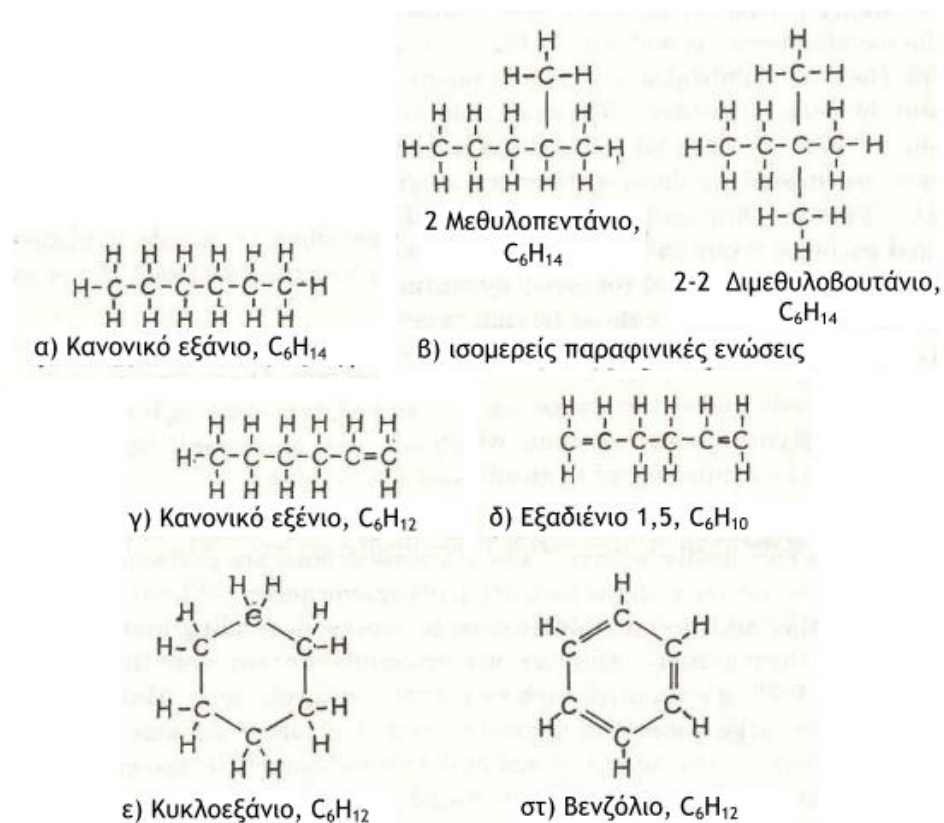


Τα αλκένια ή ολεφίνες είναι ακόρεστοι αλειφατικοί υδρογονάνθρακες, με ένα διπλό δεσμό, ενώ έχουν την δυνατότητα να ενώνονται με άλλα στοιχεία ή ομάδες (Cl ,Br , κ.α). Ο γενικός χημικός τύπος είναι C_nH_{2n} και το όνομα κάθε μέλους της ομάδας φέρει τη κατάληξη –ενιο όπως το εξένιο και το αιθυλένιο (Σχήμα 3-2). Οι ολεφίνες αντιδρούν και διαλύονται με τη παρουσία του θειικού οξέως (H_2SO_4) ώστε να απομακρυνθούν από τους υπόλοιπους υδρογονάνθρακες. Επειδή τα ελαφριά κλάσματα ολεφίνων δεν απαντώνται στο πετρέλαιο αλλά εμφανίζονται στα προϊόντα της πυρόλυσης. Κατά τη πλήρη καύση των αλκενίων, παράγεται το CO_2 και H_2O σύμφωνα με τη γενική αντίδραση :



Οι ναφθενικές ενώσεις είναι κυκλικές κορεσμένες ενώσεις και έχουν τον ίδιο γενικό χημικό τύπο C_nH_{2n} με αυτό των αλκενίων. Στην ονομασία τους προηγείται το πρόθεμα κύκλο- όπως κυκλοβουτάνιο (C_4H_8), κυκλοπεντάνιο (C_5H_{10}) και κυκλοεξάνιο (C_6H_{12}).

Οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες είναι ακόρεστοι κυκλικοί υδρογονάνθρακες που αποτελούνται από έναν έως περισσότερους βενζολικούς δακτύλιους ενώ αποτελούν παράγωγα του βενζολίου (C_6H_6) (Σχήμα 3-2στ). Έχουν γενικό χημικό τύπο C_nH_{2n-6} και απαρτίζουν μία ιδιαίτερη κατηγορία υδρογονανθράκων καθώς έχουν ιδιαίτερη δομή και ιδιάζουσες χημικές ιδιότητες.



Σχήμα 3-2 Χημικοί τύποι υδρογονανθράκων (Ανδρίτσος 2008)

Η ταξινόμηση του πετρελαίου μπορεί να πραγματοποιηθεί με ποικίλους τρόπους. Όμως ο πιο διαδεδομένος τρόπος ταξινόμησης είναι αυτός που σχετίζεται με τη πυκνότητά του, σε συγκεκριμένη θερμοκρασία στη κλίμακα $^{\circ}API$ και ορίζεται με τον παρακάτω τύπο :

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{\rho - 131,5} \quad (3-1)$$

όπου ρ είναι το ειδικό βάρος του πετρελαίου στους $15,6^{\circ}C$. Συνεπώς, $API=10$ αντιστοιχεί σε $\rho=1g/ml$, όπως παρουσιάζεται και στο (Πίνακας 3-2). Η πλειονότητα των πετρελαίων ανήκει στη κατηγορία των ελαφρών και ενδιάμεσων αργών πετρελαίων. Τα βαρύτερα πετρέλαια χαρακτηρίζονται ως μη συμβατικά, ενώ ένα ελαφρύ αργό πετρέλαιο παράγει κατά τη διύλισή του πολλά περισσότερα ελαφρά προϊόντα (βενζίνη) και λιγότερα βαριά από ότι παράγει ένα βαρύ αργό πετρέλαιο.

Πίνακας 3-2 Ταξινόμηση του αργού πετρελαίου σε σχέση με την πυκνότητα του (Ανδρίτσος 2008)

	°API	ρ (στους 15,6°C)
Ελαφρύ	>40 ° API	<0,825
Μέσο	30 - 40 ° API	0,825-0,875
Βαρύ	< 30 ° API	0,825- 0,875
Πολύ Βαρύ	< 10 ° API	> 1

3.2.2 Χαρακτηριστικά φωτιάς λίμνης αργού πετρελαίου

Με το πέρας της ανάλυσης τόσο των βασικών εννοιών που διέπουν τους μηχανισμούς καύσης όσο τη σύσταση και τις ιδιότητες του αργού πετρελαίου που παίζουν καθοριστικό ρόλο στη πορεία της καύσης, κρίνεται αναγκαίο να αναφερθούν τα χαρακτηριστικά μιας φωτιάς λίμνης αργού πετρελαίου σε μια κυλινδρική ατμοσφαιρική δεξαμενή κλειστής οροφής.

Τα πιο κοινά χαρακτηριστικά που απαντώνται σε όλες τις λίμνες φωτιάς που διαχωρίζουν τη καύση, είναι η φωτεινή και η μη φωτεινή ζώνη (Hamins, Fischer et al. 1994, Steinhaus, Welch et al. 2007). Ενώ για τις φωτιές λιμνών υδρογονανθράκων παρατηρείται ότι η καύση χωρίζεται σε τέσσερις ζώνες (Rew, Hulbert et al. 1997) που είναι οι ακόλουθες :

- Είδος υγρού καυσίμου. Ανάλογα με το αποθηκευμένο υγρό καύσιμο σε δεξαμενές μεγάλου βάθους και με τη παρουσία του μηχανισμού συναγωγής δύναται να εξατμίζεται με αυξανόμενο ρυθμό με αποτέλεσμα να επηρεάζει την εξέλιξη της φωτιάς.
- Ζώνη άκαυστων ατμών (μη φωτεινή ζώνη) καυσίμου διακρίνοντάς τις από την έντονη παρουσία καπνού κωνικού σχήματος με μερική εμφάνιση της φωτεινής ζώνης.
- Ζώνη φωτιάς (φωτεινή ζώνη) καθαρής καύσης που περικλύει τη ζώνη ατμών με την εμφάνιση φωτιάς κωνικού σχήματος.

- Υπερνίκηση του καπνού με την αύξηση του ύψους μέχρι να μην διακρίνεται η φλόγα. Σε αυτή τη ζώνη παύει η καύση και δημιουργείται ένα νέφος από προϊόντα της καύσης καθώς και άκαυστων συστατικών του καυσίμου.

Οι παραπάνω ζώνες έχουν μελετηθεί από τη βιβλιογραφία, καθώς με την εμφάνιση φωτιάς να μπορεί να ποσοτικοποιηθεί μέσω των έξι μετρήσιμων μεγεθών :

- Ρυθμός εξάτμισης ή ρυθμός απώλειας μάζας. Έχουν στενή σύνδεση με τον ρυθμό έκκλησης θερμότητας καθώς συνεπάγεται με τον ρυθμό καύσης.
- Ρυθμός έκλυσης θερμότητας (Heat Release Rate). Θεωρείται σημαντική μεταβλητή καθώς υποδεικνύει τον ρυθμό με τον οποίο η φωτιά απελευθερώνει ενέργεια υπό μορφή θερμότητας ανά μονάδα χρόνου (kW).
- Ύψος φλόγας .Η καθ'υψος απόσταση από τη φλεγόμενη επιφάνεια έως το πάνω τμήμα της φλόγας.
- Θερμοκρασία φλόγας. Είθισται να γίνεται αναφορά στον κεντρικό άξονά της ή σε μία μέση τιμή που προκύπτει από μετρήσεις της θερμοκρασίας σε διαφορετικά σημεία κατακόρυφα της φλόγας.
- Ρυθμός έκλυσης πλούμιου. Ο ρυθμός με τον οποίο εκλύεται το πλούμιο από μια καιόμενη επιφάνεια ενός τετραγωνικού μέτρου και εκφράζεται είτε ογκομετρικά (m^3/sec) είτε βαρυμετρικά (kg/sec).
- Ακτινοβολία. Εμφανίζεται είτε ως σύνολο των απωλειών θερμότητας εξαιτίας της ακτινοβολίας (kW), είθισται να αντιστοιχίζεται με το ρυθμό έκλυσης θερμότητας (HRR).

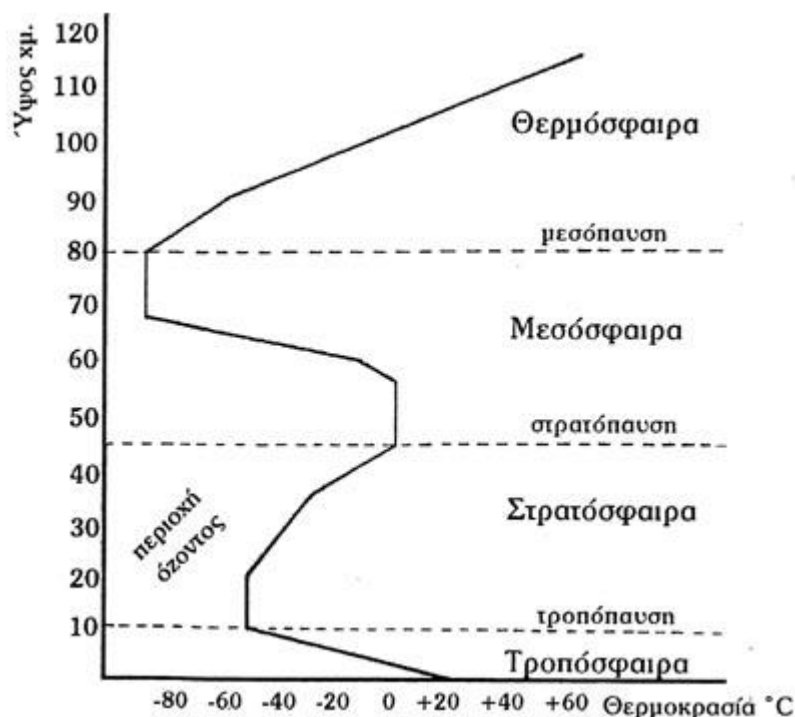
Τα μετρήσιμα μεγέθη εξαρτώνται από τα στοιχεία που καθορίζουν τις θερμικές επιπτώσεις ενός ατυχήματος

- Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δεξαμενής (διάμετρος, βάση, βάθος) συνεπώς και της λίμνης φωτιάς εφόσον περικλείεται εντός σε αυτήν.
- Η σύσταση του καυσίμου

- Οι συνθήκες αερισμού (φυσική κυκλοφορία ανέμου ή τεχνητή κυκλοφορία ανέμου)
- Περικλειόμενη γεωμετρία (ύψος τυχόν διαχωριστικού (αναχώματος), ανοιχτό περιβάλλον, απόσταση από τείχους)
- Πρώτες Ύλες κατασκευής των δεξαμενών προς αποθήκευση καυσίμων

3.3 Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα (ΑΟΣ)

Η ατμόσφαιρα της Γης αποτελείται από ένα λεπτό αεριώδες περίβλημα το οποίο αποτελείται κατά βάση από μοριακό οξυγόνο, από μοριακό άζωτο, από λοιπά χημικά στοιχεία μικρότερης περιεκτικότητας και καταλαμβάνει μεγάλη έκταση περίπου 150 km. Μελετώντας την καθ' ύψος, είναι φανερή η μεταβλητότητα τόσο της θερμοκρασίας όσο και της πυκνότητας καθώς έχει παρατηρηθεί η διακριτοποίηση της ατμόσφαιρας σε τρεις κύριες ζώνες εμπλεκόμενες στη διασπορά του ρύπου. Αρχικά διακρίνουμε την χαμηλότερη ζώνη που έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια της Γης και ονομάζεται τροπόσφαιρα (troposphere). Το ύψος του προσεγγίζει τα 18 km και αναφέρεται ως τροπόπαυση. Αμέσως μετά ακολουθεί η ζώνη της στρατόσφαιρας (stratosphere) ξεκινώντας από το ύψος της τροπόπαυσης έως τα 50 km, δηλαδή στο ύψος της στρατόπαυσης. Ενώ από το ύψος της στρατόπαυσης έως τα 80 km διακρίνουμε την μεσόσφαιρα (mesosphere).



Σχήμα 3-3 Ζώνες της ατμόσφαιρας ως προς το ύψος και οι αντίστοιχες επικρατούσες θερμοκρασίες και πιέσεις (Γεντεκάκης 2010)

Εν συνεχεία παρατηρώντας τον καθ' ύψος διαχωρισμό της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας, (Σχήμα 3-3) διακρίνεται μία ροπή ως προς την ελάττωση της θερμοκρασίας ενόσω απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια της Γης, δηλαδή στη ζώνη της τροπόσφαιρας. Μετά από τη τροπόσφαιρα εξαιτίας της απορρόφησης της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας φαίνεται μία αναστροφή αυτής της τάσης ως συνέπεια η σταθεροποίηση της θερμοκρασίας με το ύψος στο μέσο της στρατόσφαιρας και μετά αύξηση της θερμοκρασίας άνω της μεσόσφαιρας.

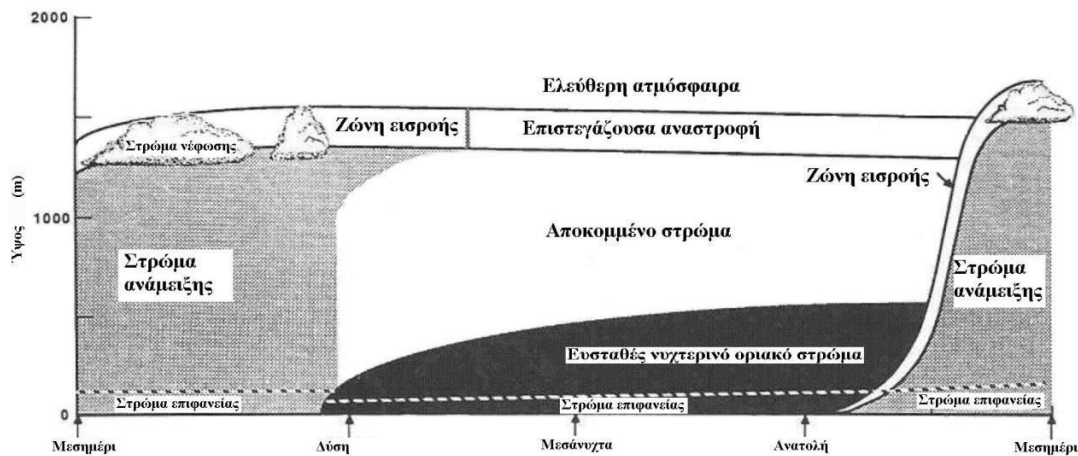
Όπως προαναφέραμε η διασπορά του ρύπου πραγματώνεται κυρίως στις ζώνες της στρατόσφαιρας και της τροπόσφαιρας. Όμως επειδή η ζώνη της στρατόσφαιρας δεν έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του πλανήτη μας καθώς βρίσκεται μακριά του, επικεντρωνόμαστε στη ζώνη της τροπόσφαιρας και ιδιαίτερος στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα (ΑΟΣ) (Atmospheric Boundary Layer-ABL) ή αλλιώς όπως αναφέρεται ως πλανητικό οριακό στρώμα (Planetary

Boundary Layer-PBL), καθώς παρατηρείται στα χαμηλότερα ύψη που λαμβάνουν χώρα οι περισσότερες ανθρώπινες, βιολογικές δραστηριότητες επηρεάζοντας και αντιδρώντας άμεσα με την επιφάνεια της Γης καθώς παρατηρώντας διάφορες επιδράσεις προς αυτό και από την ελεύθερη ατμόσφαιρα που απαρτίζει το υπόλοιπο τμήμα της τροπόσφαιρας (Τριανταφύλλου 2017). Οι επιδράσεις αυτές είναι κυρίως δυνάμεις τριβής, εξάτμισης νερού, εξατμισοδιαπνοής, μετάδοση θερμότητας, τροποποίηση της ροής του ανέμου εξαιτίας του ανάγλυφου που παρουσιάζει το έδαφος και από τις εκλύσεις των ρύπων (Μπάρμπας 2013, Τριανταφύλλου 2017). Το πάχος του ΑΟΣ μεταβάλλεται χωρικά παρουσιάζοντας μία διακυμαινόμενη μεταβολή κατά την διάρκεια της ημέρας της τάξης του 1~1,5 km, του εκτεινόμενου ύψους από την επιφάνεια της Γης, ενώ την νύχτα εμφανίζει μία διακυμαινόμενη μεταβολή μικρότερη από αυτή της ημέρας της τάξης των 300~500 m. Ωστόσο μεταβάλλεται χρονικά παρατηρώντας διαφορές κατά τη διάρκεια της ημέρας συγκριτικά με τη νύχτα καθώς και μεταξύ των εποχών του χειμώνα και του καλοκαιριού. Στο οριακό στρώμα της ατμόσφαιρας υπάρχουν αρκετά υψηλοί ρυθμοί μεταφοράς μάζας, ορμής και θερμότητας που συντηρούνται από τυρβώδεις κινήσεις που λαμβάνουν χώρα στην ίδια κλίμακα μήκους με αυτό (Μπάρμπας 2013). Έτσι εμφανίζει τρία δομικά χαρακτηριστικά (Σχήμα 3-4):

- Το αναμειγμένο στρώμα (Mixed Layer) το οποίο αποτελεί περίπου το 75% του ασταθούς οριακού στρώματος (Μπάρμπας 2013). Κατά περιόδους ηλιοφάνειας μεταδίδεται θερμότητα από την επιφάνεια του εδάφους προς τα κατώτερα στρώματα του ΑΟΣ ως αποτέλεσμα είτε εξαναγκασμένη είτε συνδυασμός ελεύθερης και εξαναγκασμένης συναγωγής, ως εκ τούτου η δημιουργία ανωστικών κινήσεων των αέριων μαζών και ισχυρές τυρβώδεις ροές. Εντός του στρώματος, οι κύριες μεταβλητές, λόγω της έντασης της τύρβης είναι σταθερές. Γενικά, η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται από έντονη ανάμειξη, δηλαδή αστάθεια (Μπάρμπας 2013).
- Το ευσταθές οριακό στρώμα (Stable Layer) εμφανίζεται κατά τη νυχτερινή περίοδο με τη παρουσία ευστάθειας εξαιτίας της ψύξης του

εδάφους από τη νυχτερινή εκπομπή της υπέρυθρης ακτινοβολίας (Μπάρμπας 2013). Η εμφάνιση αυτής της στατικής ευστάθειας συμβάλλει στην εξασθένηση της τύρβης παρόλο που εξακολουθεί να υφίσταται κοντά στο έδαφος εξαιτίας της παραγωγής της μέσω της διάτμησης .

- Το αποκομμένο οριακό στρώμα (Residual Layer). Με το πέρας του σχηματισμού του νυχτερινού οριακού στρώματος, το υπερκείμενο στρώμα αέρα αποκόπτεται από το έδαφος ως εκ τούτου να μην επηρεάζεται άμεσα από αυτό και κατά συνέπεια να διατηρεί τις αρχικές του ιδιότητες, όπως η ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας (Μπάρμπας 2013).



Ωρα

Σχήμα 3-4 Ημερήσια διακύμανση του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος πάνω από το έδαφος (Μπάρμπας 2013).

4 Μεθοδολογία επίλυσης ροής

4.1 Αριθμητική προσέγγιση

Επειδή τα πειράματα που υλοποιούνται σε πραγματικές συνθήκες απαιτούν υλικούς πόρους, δαπανηρό εργαστηριακό εξοπλισμό πόσο μάλλον όταν πρόκειται για πειράματα ροών γύρω από κυλινδρικές δεξαμενές (κλειστής οροφής) που εμφανίζουν μία λίμνη φωτιάς στο επάνω τμήμα τους, το οποίο κατά τη πειραματική διαδικασία ενέχει διάφορους κινδύνους τόσο για την υγεία των πειραματιστών εξαιτίας των εκλύσεων από τα προϊόντα της καύσης, όσο και για τον ίδιο τον εργαστηριακό χώρο καθώς υπάρχει πιθανότητα να σημειωθούν εκρήξεις (Baum 2000). Έτσι η επιστημονική κοινότητα για να αποφύγει τους ενεχόμενους κινδύνους που μπορούν να εμφανισθούν, προσεγγίζει τέτοιου είδους προβλήματα με την αρωγή των εμπειρικών και των ημι-εμπειρικών μοντέλων. Με τη πάροδο των χρόνων διευρύνθηκαν οι ορίζοντες της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics CFD) μιας και μπορούν να επιλύσουν δυναμικές προσομοιώσεις φωτιάς και λίμνες φωτιάς χωρίς να τεθεί κάποιος ή κάτι σε κάποια παρακινδυνευμένη κατάσταση που μπορεί να επιφέρει αλόγιστες ζημίες.

4.1.1 Κατηγορίες μοντέλων διασποράς

Τα μαθηματικά μοντέλα που απαντώνται για την εκτίμηση των λιμνών φωτιάς είναι τα μοντέλα υπολογιστικής ρευστομηχανικής, τα Gaussian και τα εμπειρικά μοντέλα. Τα εμπειρικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για να προβλέψουν τις συνέπειες μίας λίμνης φωτιάς και αποτελούνται από το μοντέλο σημειακής πηγής (Point Source Model) και από το μοντέλο συμπαγούς φλόγας (Solid Flame Model SFM). Το μοντέλο της σημειακής πηγής (Ντεμίρη 2009) έχει ως παραδοχή ότι υπάρχει ένα κεντρικό σημείο εντός της φωτιάς όπου μέσα από αυτό μέσα από τη διαδικασία της καύσεως, ένα τμήμα της ενέργειας εκπέμπεται ως θερμική ακτινοβολία προς πάσα κατεύθυνση. Συνακόλουθα εμφανίζει τη παραδοχή ότι η θερμική ακτινοβολία είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης από το σημείο πηγής. Ενώ το μοντέλο συμπαγούς φλόγας βασίζεται στο σχήμα της φλόγας που είναι είτε κυλινδρικό είτε κωνικό συγκεντρώνοντας πληροφορίες

από τη συσχέτιση πειραμάτων, σε παράγοντες όπως ο τύπος του καυσίμου και η ταχύτητα του ανέμου.

Ωστόσο τα μοντέλα συμπαγούς φλόγας και σημειακής πηγής περιλαμβάνουν αρκετούς περιορισμούς ενώ παύουν να είναι αποτελεσματικά όταν πρόκειται να προσομοιωθεί μια δυναμική λίμνη φωτιάς σε όλο το φάσμα των ανακυκλοφοριών εξαιτίας της αποκόλλησης του ανεπτυγμένου πεδίου τύρβης. Επιπλέον αυτού του είδους τα μοντέλα δεν είναι ικανά να μελετήσουν διαφορετικά σενάρια κλίσεων φωτιάς κατά τη παρουσία ανέμου (Luketa 2022) ή για τη πρόβλεψη των ιδιοτήτων της καύσης σε περιστατικά πυρκαγιάς μεγάλου βεληνεκούς.

Μέχρι πρότεινος τα εμπειρικά μοντέλα ήταν διαθέσιμα προς χρήση από τους μηχανικούς φωτιάς (fire engineering) καθώς είναι σε θέση να παρέχουν άμεσα και ικανά αποτελέσματα προς χρήση. Ωστόσο η συνεχής χρήση και έρευνα της CFD, έχει σημειώσει μεγάλη πρόοδο στο τμήμα της δυναμικής μοντελοποίησης της φωτιάς. Για τη μοντελοποίηση των προβλημάτων φωτιάς έχει δημιουργηθεί από τον NIST (National Institute of Standards and Technology) ένα πρόγραμμα φιλικό προς χρήση το FDS (Fire Dynamic Simulation).

Σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναλύσεις που έχουν πραγματοποιηθεί κατά το παρελθόν, ενώ εξακολουθούν να πραγματοποιούνται, έχουν εξαχθεί στατιστικά στοιχεία τα οποία υποδυναμίζουν τη πιο συχνή πρόκληση ατυχημάτων, αυτά της φωτιάς σε δεξαμενές καυσίμων που έχουν ως καύσιμη ύλη προς αποθήκευση το αργό πετρέλαιο.

4.1.2 Μαθηματικό μοντέλο

Ο ανοικτός κώδικας OpenFOAM αποτελεί ένα ελεύθερο σε προσβασιμότητα πρόγραμμα CFD που έχει τη δυνατότητα να προσομοιώσει δυναμικές λίμνες

φωτιάς. Αναπτύχθηκε από την OpenCFD.Ltd και με τη βοήθεια των αριθμητικών μεθόδων επιλύει τις μερικές διαφορικές εξισώσεις Navier-Stokes :

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho \cdot g - \nabla p + \mu \nabla^2 u \quad (4-1)$$

που απαντώνται για ροές χαμηλών ταχυτήτων με αριθμό Mach < 1

Παρακάτω διατυπώνεται ένα σύστημα από εξισώσεις που αποτελούν αυτές των Navier-Stokes για συμπιεστή ροή:

i. Εξίσωση αρχής διατήρησης μάζας

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho U = 0 \quad (4-2)$$

Η παραπάνω εξίσωση (4-2) αποτελεί μια μη μόνιμη τρισδιάστατη εξίσωση διατήρησης μάζας σε κάποιο σημείο ενός συμπιεστού ρευστού. Το πρώτο μέλος αριστερά της εξίσωσης αποτελεί τον ρυθμό μεταβολής της πυκνότητας στο χρόνο. Ο δεύτερος όρος υποδυκνύει την ρυθμό καθαρής εκροής ανά μονάδα όγκου και αποτελεί όρο συναγωγής (convective term).

ii. Εξίσωση της αρχής διατήρησης της ορμής

Η εξίσωση της αρχής διατήρησης της ορμής προέρχεται από τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα.

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot \rho U_i U_j = -\nabla p + \nabla \cdot \tau_{ij} + \rho g \quad (4-3)$$

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

$$\tau_{ij} = \nabla \cdot [\mu(\nabla U + (\nabla U)^T) - \lambda(\nabla \cdot U)I] \quad (4-4)$$

Ο συντελεστής $\lambda = -\frac{2}{3}\mu$

iii. Εξίσωση της αρχής διατήρησης της ενέργειας

Επειδή η θερμοκρασία αλλάζει με το χρόνο αλλάζουν και η πυκνότητα και το δυναμικό ιξώδες. Έτσι για την επίλυση η εξίσωση της αρχής διατήρησης της

ενέργειας έρχεται σε δύο πεδία: στη διατήρηση της εσωτερικής ενέργειας e και διατήρηση της ενθαλπίας h , διατυπώνοντάς την ως $h=e+\frac{p}{\rho}$

➤ **Διατήρηση της εσωτερικής ενέργειας**

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \nabla \cdot \rho U e + \nabla \cdot U p = \nabla \cdot k \nabla T + \nabla \tau_{ij} \cdot U \quad (4-5)$$

➤ **Διατήρηση της αισθητής ενθαλπίας**

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla \cdot \rho U h = \frac{dp}{dt} + \nabla \cdot k \nabla T + \nabla \tau_{ij} \cdot U \quad (4-6)$$

iv. **Εξίσωση της αρχής διατήρησης των συστατικών**

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + \nabla \cdot \rho U Y_i = \nabla \cdot (D_i \nabla \rho Y_i) + \rho \omega_i \quad (4-7)$$

4.1.3 Αριθμητική μέθοδος επίλυσης

Το OpenFOAM χρησιμοποιεί μοντέλα που απαιτούν είτε λιγότερη υπολογιστική ισχύς δηλαδή μοντέλα τύρβης για τις εξισώσεις RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) είτε προσομοίωση μεγάλων δινών LES (Large Eddy Simulation) και άμεσης αριθμητικής προσομοίωσης DNS (Direct Numerical Simulation), που απαιτούν αυξημένη υπολογιστική ισχύς, ενώ και τα τρία μοντέλα έχουν ως στόχο να επιλύσουν τις μερικές διαφορικές εξισώσεις ροής ρευστού. Η μεθοδολογία RANS θεωρείται η πιο γνωστή και ευρέως διαδεδομένη μεθοδολογία υπολογιστικής ρευστομηχανικής, ενώ συνάμα συχνά προτιμάται για την επίλυση προβλημάτων βιομηχανικών εφαρμογών μιας και παράγουν σχετικά άμεσα αποτελέσματα χωρίς να απαιτείται η κατασκευή ενός πυκνού υπολογιστικού πλέγματος. Όμως επειδή στη παρούσα διπλωματική εξετάζεται μία συστοιχία από έξι δεξαμενές που η μια δεξαμενή εμφανίζει μια λίμνη φωτιάς, απαιτεί αύξηση της υπολογιστικής ισχύος ως απόρροια η απαίτηση μεγάλης μνήμης τυχαίας προσπέλασης (RAM). Εντούτοις με τη βοήθεια του υπερ-υπολογιστικού συστήματος (cluster) που φέρει το όνομα ARIS (Advanced Research Information

System) του Εθνικού Δικτύου Υποδομών Τεχνολογίας & Έρευνας (Ε.Δ.Υ.Τ.Ε.) επιλύεται το ζήτημα της απαίτησης μεγάλης μνήμης τυχαίας προσπέλασης.

Τα τυρβώδη φαινόμενα προσομοιώθηκαν με τη βοήθεια της μεθόδου Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes (URANS) με του επιλυτή πεπερασμένων όγκων fireFoam χρησιμοποιώντας το μοντέλο k-epsilon. Ο λύτης βρίσκεται ως μία βιβλιοθήκη της γλώσσας C++ μέσα από το πρόγραμμα ανοικτού κώδικα OpenFOAM. Ο συγκεκριμένος λύτης ξεκίνησε να χρησιμοποιείται σε πολύπλοκες βιομηχανικές πυρκαγιές σε συνδυασμό με πειράματα μεγάλης κλίμακας. Επίσης έχει χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της καταστολής πυρκαγιών καθώς και για τη πυρόλυση διάφορων στερεών καυσίμων (Ghaderi, Ghodrat et al. 2020). Συνακόλουθα το fireFoam έχει χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση λιμνών φωτιάς με την επίδραση του ανέμου. Ο συγκεκριμένος λύτης είναι ένας μεταβατικός λύτης που εμπεριέχει υπομοντέλα για την περιγραφή των διεργασιών όπως πυρόλυση, μεταφορά της θερμότητας μέσω ακτινοβολίας, τυρβώδη φαινόμενα και καύση.

Ο επιλυτής fireFOAM χρησιμοποιεί ένα σύστημα εξισώσεων για να επιλύσει τις εξισώσεις Navier-Stokes για συμπιεστή ροή. Η ιδιαιτερότητα του λύτη διακρίνεται στις παρακάτω εξισώσεις καθώς στην εξίσωση (4-9) προστίθεται ένας όρος υδροδυναμικής πίεσης p_{rgh} και ένας όρος ροής πηγής ή καταβόθρας ακτινοβολία στην εξίσωση (4-10) Q_{rad}, Q_{rxn} κατά τη διάρκεια της ακτινοβολίας και της αντίδρασης. Ενώ στην ίδια εξίσωση το K αντιπροσωπεύει την ειδική κινητική ενέργεια, το h αναφέρεται στην ειδική αισθητή ενθαλπία, το a_{eff} αναφέρεται στη θερμική διαχυτότητα. Ενώ στην εξίσωση (4-11) το Y_i αντιπροσωπεύει το κλάσμα της μάζας ενός i χημικού συστατικού και το ω_i δείχνει το κλάσμα μάζας ενός i χημικού συστατικού. Τέλος το S_p δείχνει έναν όρο πηγής σωματιδίων Lagrange και το S_f δείχνει τις πηγές υγρού φιλμ.

i. Εξίσωση της αρχής διατήρησης της μάζας

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{U} = S_p + S_f \quad (4-8)$$

ii. Εξίσωση της αρχής διατήρησης της ορμής

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot \rho U_i U_j = -\nabla p_{rgh} + \nabla \cdot \tau_{ij} + \rho g + S_p \quad (4-9)$$

iii. Εξίσωση της αρχής διατήρησης της ενέργειας

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla \cdot \rho U h + \frac{\partial \rho K}{\partial t} + \nabla \cdot \rho U K = \nabla \cdot (\alpha_{eff} \nabla \rho h) + \frac{\partial p}{\partial t} + Q_{rxn} + Q_{rad} + S_p + S_f \quad (4-10)$$

iv. Εξίσωση της αρχής διατήρησης των συστατικών

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + \nabla \cdot \rho U Y_i = \nabla \cdot (\alpha_{eff} \nabla \rho Y_i) + \rho \omega_i + S_p + S_f \quad (4-11)$$

4.1.4 Υπολογιστική προσομοίωση της ροής γύρω από συστοιχία δεξαμενών

Η ροή γύρω από τη συστοιχία δεξαμενών προσομοιώθηκε με χρονικό βήμα ίσο με 1. Η υπολογιστική προσομοίωση πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια της προσομοίωσης RANS και συγκεκριμένα με το μοντέλο k-epsilon μιας και το συγκεκριμένο απαιτεί λιγότερους υπολογιστικούς πόρους και άμεση σταθερότητα της ροής. Οι εξισώσεις αναπτύσσονται σταθερά στο χρόνο καθώς έχουμε μόνιμη ροή. Για τη σύζευξη της πίεσης και της ταχύτητας, χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος Simple. Για τους όρους συναγωγής χρησιμοποιήθηκε ένα σχήμα bounded Gauss linearUpwind. Τέλος η εξίσωση της πίεσης λύθηκε με τη βοήθεια ενός PCG.

4.1.5 Υπολογιστική προσομοίωση της ροής γύρω από συστοιχία δεξαμενών με τη παρουσία ατύχηματος φωτιάς λίμνης αργού πετρελαίου στην οροφή μίας εκ των έξι δεξαμενών

Το υπό μελέτη ατύχημα φωτιάς λίμνης αργού πετρελαίου προσομοιώθηκε με τη βοήθεια του επιλυτή FireFOAM με ένα μοντέλο URANS(Unsteady Reynolds

Averaged Navier-Stokes) με μεταβλητό χρονικό βήμα που οριοθετείτε από τον αριθμό Courant που είναι ίσος με 0,6. Για τους όρους συναγωγής χρησιμοποιήθηκε το αριθμητικό σχήμα bounded Gauss upwind. Για τη σύζευξη της πίεσης και της ταχύτητας χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος PIMPLE. Τέλος η εξίσωση της πίεσης λύθηκε με τη βοήθεια ενός GAMG(Geometric Algebraic Multi-Grid) λύτη με έναν Gauss-Seidel smoother.

5 Ροή Ανέμου Γύρω Από Συστοιχία Δεξαμενών

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη προσομοίωση RANS, για τη ροή γύρω από μία συστοιχία δεξαμενών υγρών καυσίμων. Πιο αναλυτικά θα διερευνηθούν οι αρχικές και οριακές συνθήκες της προσομοίωσης, η κατανομή της ταχύτητας του ανέμου, η κατανομή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και της απώλειας της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, σε όλο το υπολογιστικό χωρίο.

5.1 Αρχικές και Οριακές Συνθήκες

Προκειμένου να επιλυθούν οι μερικές διαφορικές εξισώσεις, επιβάλλεται να οριστούν οι αρχικές και οριακές συνθήκες του προβλήματος. Με τον ορθό ορισμό των αρχικών και οριακών συνθηκών αφενός μεν αρχίζει η επίλυση ενός προβλήματος υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, αφετέρου δε αντιπροσωπεύουν το προς επίλυση πρόβλημα ροής καθώς και στην αποφυγή αριθμητικού σφάλματος .

5.1.1 Προφίλ Ταχύτητας και Τύρβης στην Είσοδο

Το προφίλ κατατομής της ταχύτητας εισόδου της υπολογιστικής προσομοίωσης εντός του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος είναι λογαριθμικό:

$$U(z) = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) \quad (5-1)$$

$$u_* = \frac{kU_{ref}}{\ln \left(\frac{z_{ref}}{z_0} \right)} \quad (5-2)$$

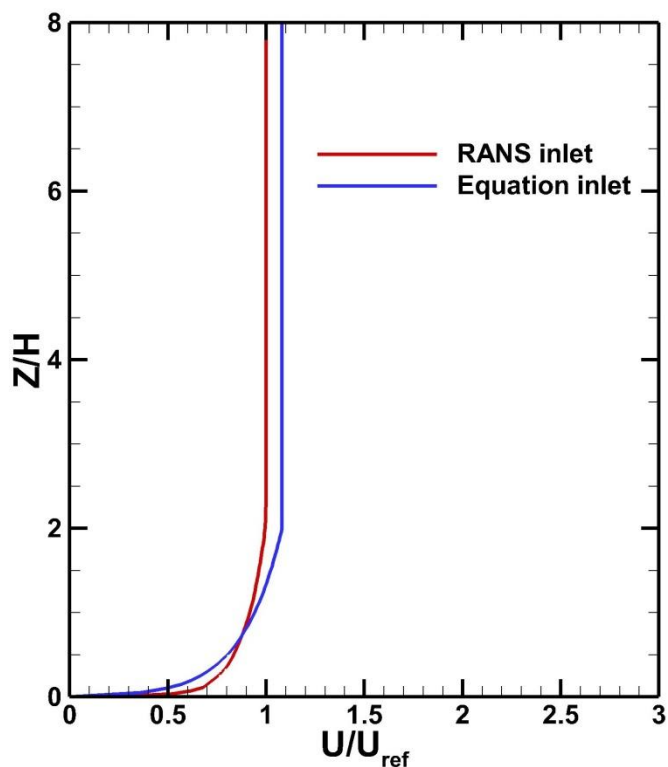
Όπου η ταχύτητα του αέρα στο ύψος αναφοράς, $z_{ref} = 60 \text{ m}$ είναι $U_{ref} = 13,16 \text{ m/sec}$, $u_* = 0,62 \text{ m/sec}$ και το ύψος τραχύτητας $z_0 = 0,01 \text{ m}$.

Στην είσοδο του υπολογιστικού πεδίου ορίζεται η τυρβώδης κινητικής ενέργειας $k(z)=1,41$ εξίσωση (5-3), που υποδुकνύει τη δημιουργία της τύρβης και ο ρυθμός σκέδασης ε , εξίσωση (5-4), που υποδुकνύει τη σκέδαση αυτής

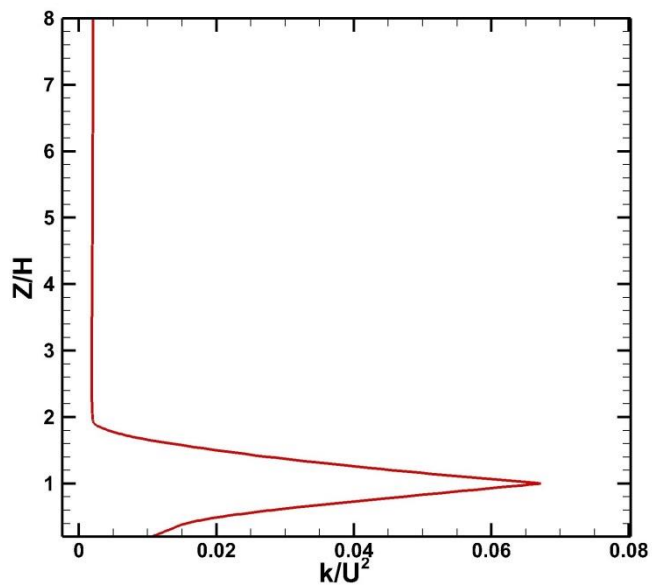
$$k(z) = \frac{u_{\tau}^2}{\sqrt{C_{\mu}}} \quad (5-3)$$

$$\varepsilon(z) = \left(\frac{u_{\tau}^3}{k(z + z_0)} \right) \quad (5-4)$$

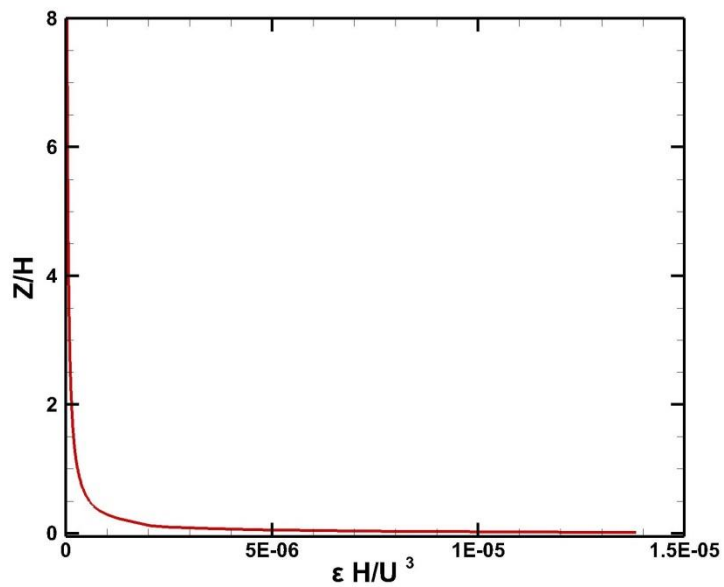
Όπου το $C_{\mu} = 0,09$ είναι μία σταθερά του μοντέλου, $u_{\tau} = 0,63$ m/sec είναι η ταχύτητα της τραχύτητας και $k=0,4$ είναι η σταθερά του Von Karman.



Σχήμα 5-1 Αδιάστατο προφίλ ταχύτητας στην είσοδο του υπολογιστικού χωρίου και σύγκριση με αυτό της εξίσωσης.



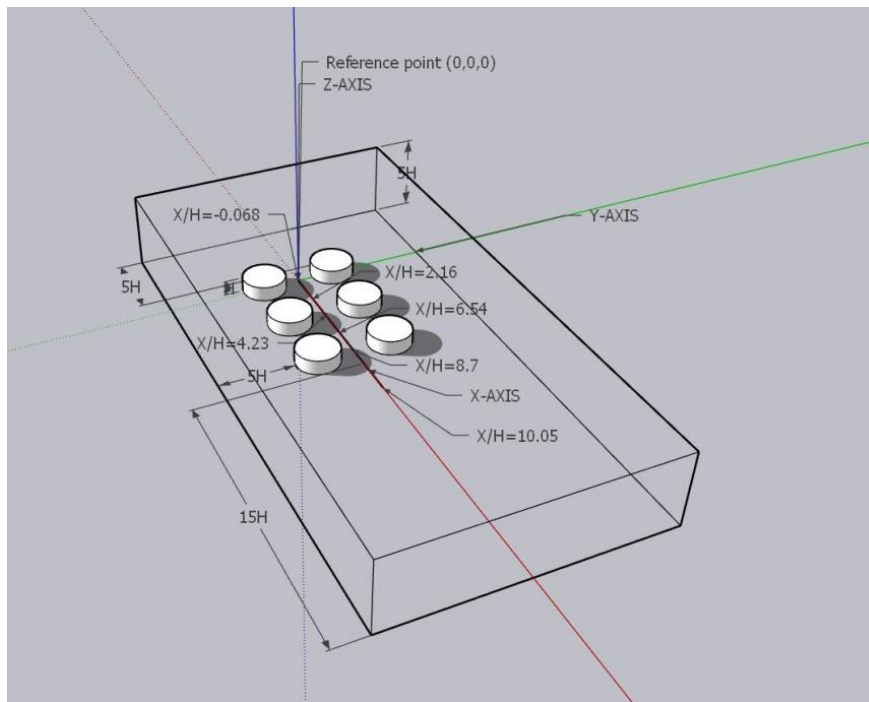
Σχήμα 5-2 Αδιάστατο προφίλ τυρβώδους κινητικής ενέργειας στην είσοδο του υπολογιστικού χωρίου.



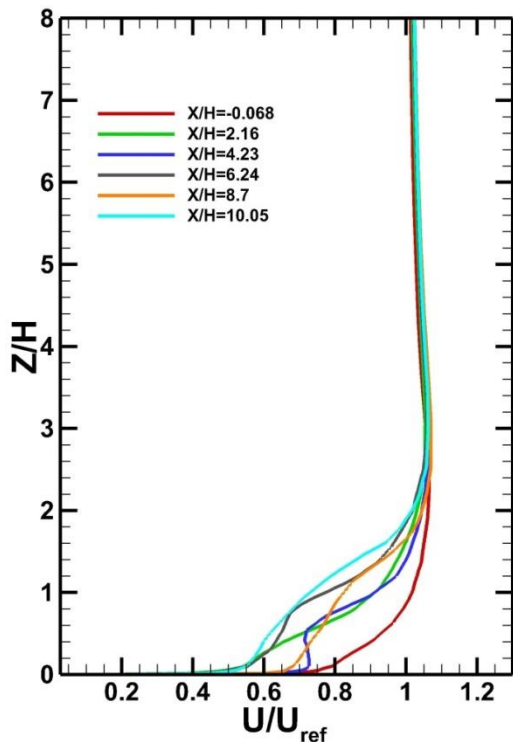
Σχήμα 5-3 Αδιάστατο προφίλ ρυθμού σκέδασης ανά μονάδα όγκου στην είσοδο του υπολογιστικού χωρίου.

5.1.2 Κατατομές Προφίλ Ταχυτήτων σε Θέσεις Ενδιάμεσα στις Δεξαμενές

Σε αυτό το υποκεφάλαιο, θα πραγματευτούμε τα αδιάστατα προφίλ κατατομών των ταχυτήτων που εμφανίζονται με το πέρασ της ροής από τη συστοιχία σε συγκεκριμένες θέσεις όπως φαίνονται στο (Σχήμα 5-4).



Σχήμα 5-4 Υπόδειξη θέσεων αδιάστατων κατατομών προφίλ ταχυτήτων εντός του υπολογιστικού χωρίου



Σχήμα 5-5 Αδιάστατα προφίλ κατατομών ταχύτητας για το επίπεδο $Z/H=0$

Τα αδιάστατα προφίλ κατατομών των ταχυτήτων φαίνονται στο (Σχήμα 5-5) στο επίπεδο $Z/H=0$ και συγκεκριμένα στη μέση της συστοιχίας και έχουν προκύψει για όλο το υπολογιστικό χωρίο. Τα έξι προφίλ ταχύτητας από τα $(2H)$ και μετά παρουσιάζουν σταθερό λογαριθμικό προφίλ. Το προφίλ της ταχύτητας που αναφέρεται στη θέση $X/H=-0,068$ η οποία βρίσκεται στο κέντρο των πρώτων δεξαμενών και παρατηρείται ότι αυξάνεται ακολουθώντας ένα λογαριθμικό προφίλ εισόδου. Στη συνέχεια ακολουθεί το προφίλ της ταχύτητας που αναφέρεται στη θέση $X/H=2,16$ που βρίσκεται στο κέντρο μεταξύ των πρώτων και δεύτερων δεξαμενών και παρατηρείται ότι μέχρι το ύψος της δεξαμενής παραμένει σταθερά μεταβαλλόμενο. Το επόμενο προφίλ ταχύτητας αναφέρεται στη θέση $X/H=4,23$ που βρίσκεται στο κέντρο των δεύτερων δεξαμενών. Παρατηρείται ότι μέχρι τα $0,5H$ το προφίλ της ταχύτητας παραμένει σταθερό και αντίθετο με τη διεύθυνση της ροής. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στη παρουσία δύο ανακυκλοφοριών που έχουν δημιουργηθεί ανάμεσα στη πρώτη και στη δεύτερη δεξαμενή. Ύστερα έχει καταγραφεί το προφίλ ταχύτητας στη θέση $X/H=6,24$ που βρίσκεται στο κέντρο μεταξύ των δεύτερων και τρίτων δεξαμενών. Παρατηρείται ότι το προφίλ της ταχύτητας κοντά στο $1H$, παραμένει σταθερό και

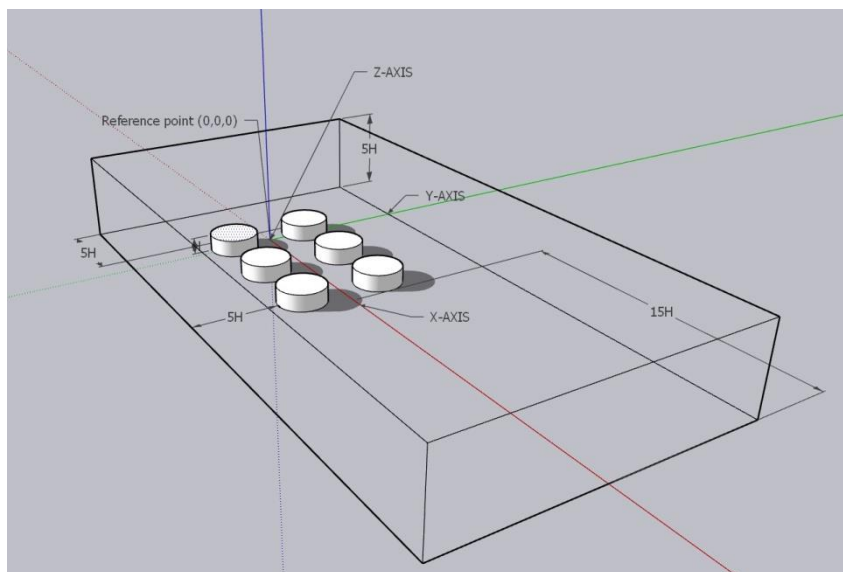
αντίθετο από τη ροή εξαιτίας της δημιουργίας μιας ανακυκλοφορίας. Το επόμενο κατά σειρά προφίλ που έχει καταγραφεί είναι στη θέση $X/H=8,7$ που βρίσκεται στο κέντρο των τρίτων δεξαμενών. Μέχρι το ύψος των δεξαμενών ($1H$), παρατηρείται ότι είναι σχεδόν γραμμικό αυξανόμενο. Τέλος καταγράφηκε το προφίλ της ταχύτητας που ανήκει στον απόρρους για τη θέση $X/H=10.05$ και παρατηρείται ότι μέχρι τα $2H$ παραμένει σταθερά αυξανόμενο.

5.2 Υπολογιστικό χωρίο

Το υπολογιστικό χωρίο αποτελεί ένα διακριτοποιημένο πεπερασμένο χώρο που με τη βοήθεια των αριθμητικών μεθόδων θα επιλυθούν οι εξισώσεις όλων των φαινομένων και μεγεθών της ροής. Η επιλογή του πραγματοποιείται με γνώμονα τη διασφάλιση της αριθμητικής ευστάθειας και της ορθότητας των αποτελεσμάτων. Προκειμένου να διασφαλιστεί η αριθμητική ευστάθεια ακολουθούνται τυπικές διαστάσεις που προκύπτουν τόσο από δημοσιεύσεις όσο και από τη διεθνή βιβλιογραφία. Στη παρούσα διπλωματική προσομοιώνεται ένα βιομηχανικό περιβάλλον που αποτελείται από μία συστοιχία κυλινδρικών δεξαμενών. Οι διαστάσεις του υπολογιστικού χωρίου επιλέχθηκαν σύμφωνα με τους (Frank 2007) όπως διακρίνεται στο (Σχήμα 5-6). Κάθε διάσταση του υπολογιστικού χωρίου ορίζεται ως αναλογία με βάση το ύψος μίας δεξαμενής που είναι $H=29,75$ m. Από την είσοδο του πεδίου έως το κέντρο της πρώτης δεξαμενής απέχει ($5H$) καθώς και από τα αριστερά και δεξιά των τοιχωμάτων της δεξαμενής υπάρχει απόσταση ($5H$). Οι αποστάσεις μεταξύ των κέντρων των δεξαμενών κατά τον άξονα- y είναι 195 m. Ενώ οι μεταξύ αποστάσεις των κέντρων των δεξαμενών κατά τον άξονα- x είναι 130 m. Από το κέντρο του τελευταίου κυλίνδρου απέχει ($15H$). Τέλος από τη πίσω επιφάνεια του κυλίνδρου υπάρχει απόσταση ($15H$). Στον (Πίνακας 5-1) ορίζονται τα γεωμετρικά στοιχεία του κυλίνδρου καθώς και ο λόγος ύψους προς διάμετρο της δεξαμενής για την αδιαστατοποίηση της γεωμετρίας ώστε να εμπίπτει με συγκρίσιμα αποτελέσματα με τη διεθνή βιβλιογραφία.

Πίνακας 5-1 Διαστάσεις κυλινδρικής δεξαμενής υπολογιστικού

Διάμετρος δεξαμενής D(m)	Ύψος δεξαμενής H (m)	Λόγος ύψους προς διάμετρο (H/D)
85	29,75	0,35



Σχήμα 5-6 Διαστάσεις υπολογιστικού χωρίου

5.2.1 Υπολογιστικό Πλέγμα

Οι εξισώσεις ροής όπως αυτή της ορμής και του Poisson, ανήκουν στη κατηγορία των μερικών διαφορικών εξισώσεων (Partial Differential Equation- PDE) που δεν επιδέχονται αναλυτική λύση καθώς περιέχουν μη γραμμικούς όρους. Για την επίλυση αυτών των εξισώσεων, πραγματοποιείται μια διαδικασία που ονομάζεται διακριτοποίηση.

Με τη διακριτοποίηση επιτυγχάνουμε τον διαχωρισμό του χωρίου σε επιμέρους μικρότερα χωρία του υπολογιστικού χωρίου ώστε να λυθεί με τη βοήθεια των αριθμητικών μεθόδων.

Η διακριτοποίηση μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους και εξαρτάται από τη πολυπλοκότητα της γεωμετρίας. Το πλέγμα μπορεί να είναι δομημένο (structured) ή αδόμητο (unstructured) .

Στην εν λόγω διπλωματική η διακριτοποίηση του υπολογιστικού χωρίου πραγματοποιήθηκε με τη δημιουργία ενός αδόμητου πλέγματος εξαιτίας της συστοιχίας από κυλινδρικές γεωμετρίες. Τα πλεονεκτήματα ενός αδόμητου πλέγματος σύμφωνα με τους (Versteeg 2007) είναι ότι μπορούν να θεωρηθούν ως μια οριακή περίπτωση που απαρτίζεται από πολλά στοιχεία και κάθε μεμονωμένο κελί αντιμετωπίζεται ως δομικό στοιχείο. Ως εκ τούτου να μην παρουσιάζεται κάποια πεπλεγμένη δομή και μπορεί να πυκνώσει όπου κρίνεται αναγκαίο. Οι όγκοι ελέγχου δεν εμφανίζουν περιορισμούς ως προς τη δημιουργία γεωμετρικών σχημάτων. Το εργαλείο snappyHexmesh το οποίο δημιουργεί δομημένα πλέγματα γύρω από τη γεωμετρία που ανήκει στο ελεύθερο λογισμικό του OpenFOAM, δεν διαθέτει δημιουργία αδόμητου πλέγματος.

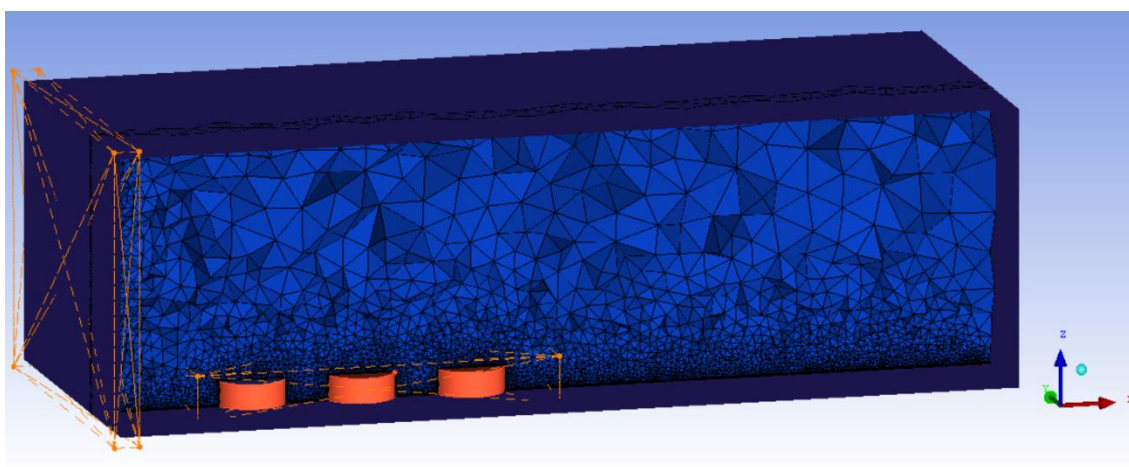
Για τη κατασκευή του υπολογιστικού πεδίου και του αδόμητου πλέγματος χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ANSYS ICEM CFD. Αρχικά η γεωμετρία των έξι δεξαμενών σε συστοιχία παράχθηκε σε ψηφιακό μοντέλο 3D. Εν συνεχεία έγινε η εισαγωγή του στο λογισμικό ANSYS ICEM CFD όπου παράχθηκε ένα αδόμητο πλέγμα κελιών τετραεδρικού τύπου με επαρκή πυκνωση κοντά στις στερεές επιφάνειες για τη βέλτιστη επίλυση των σημαντικών τυρβωδών σχηματισμών και διαταραχών που δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση του επερχόμενου ανέμου και των δεξαμενών.

Οι διαστάσεις του υπολογιστικού πεδίου και τα χαρακτηριστικά του υπολογιστικού πλέγματος έγινε με έλεγχο της αρχικής κατακόρυφης κατανομής της ταχύτητας του ανέμου στην είσοδο του υπολογιστικού πεδίου και της εξίσωσης (5-1) που εφαρμόστηκε στις οριακές συνθήκες του.

Τα βασικά στοιχεία του υπολογιστικού πεδίου και του πλέγματος που χρησιμοποιήθηκαν έχουν ως εξής:

- Συνολικός αριθμός κελιών: 1,783,714 με 454,617 κόμβους
- Οι δεξαμενές περιβάλλονται με περιοχές / όγκους πυκνωσης
- Απόσταση πρώτου κόμβου από την επιφάνεια των δεξαμενών: 0,3 m
- Συντελεστής ανάπτυξης των κελιών μακριά από την επιφάνεια των δεξαμενών 1,1

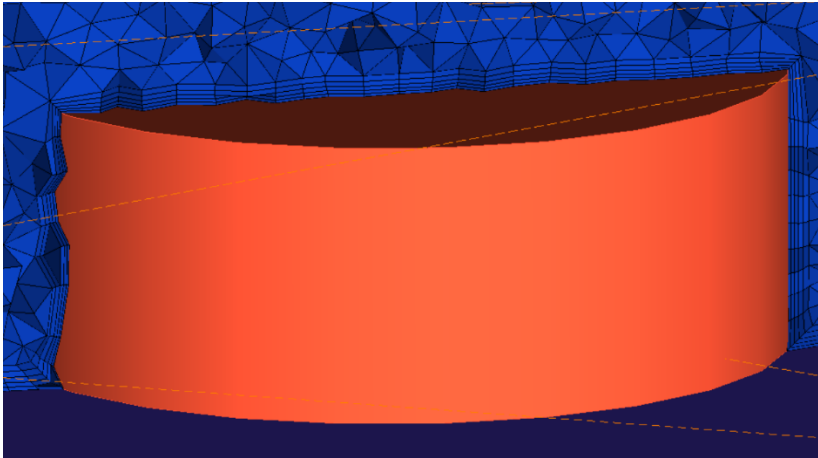
Η τελική μορφή του πλέγματος συνολικά, παρουσιάζεται στο (Σχήμα 5-7) διακρίνουμε σε οριζόντιο επίπεδο που τέμνει την δεξαμενή ότι το υπολογιστικό χωρίο αποτελείται από τετράεδρα, εξαέδρα και πρισματικά γεωμετρικά στοιχεία. Φαίνεται ότι γύρω από τις κυλινδρικές δεξαμενές και κοντά στο έδαφος αυτών, γίνεται πύκνωση από διακριτοποιημένα μικρότερα τριγωνικά στοιχεία καθώς αποτελούν τα υπό μελέτη σημεία ενδιαφέροντος. Ενώ με την απομάκρυνση από τα σημεία ενδιαφέροντος διακρίνουμε μεγαλύτερα γεωμετρικά στοιχεία με μικρότερη πύκνωση.



Σχήμα 5-7 Αδομητο πλέγμα

Στις επιφάνειες των δεξαμενών, (Σχήμα 5-8) γίνεται η χρήση πρισματικών στρωμάτων (layer) προκειμένου να αποφευχθεί το πρόβλημα της αριθμητικής διάχυσης. Η εφαρμογή τους κατέστη αναγκαία για τον καλύτερο έλεγχο της επέλασης του πλέγματος και για την ποιοτική διασφάλιση του πλέγματος για την επίλυση κρίσιμων φαινομένων κοντά στα τοιχώματα των δεξαμενών.

Τα πρισματικά στρώματα αυτά έχουν συγκεκριμένο αριθμό κελιών, εξωθούνται σε συγκεκριμένο ύψος και πρέπει να διασφαλιστεί η ομαλή μετάβαση από τα πρισματικά κελιά στα τετράεδρα, ώστε να μειωθεί η αριθμητική διάχυση. Χρησιμοποιήθηκαν τα εξής χαρακτηριστικά. Επιλέχθηκε ομαλή μετάβαση με λόγο 0,25, αριθμός στρωμάτων 5 και ρυθμός ανάπτυξης 1,1.



Σχήμα 5-8 Αδομητο πλέγμα και πρισματικά γεωμετρικά στοιχεία στις επιφάνειες της δεξαμενής

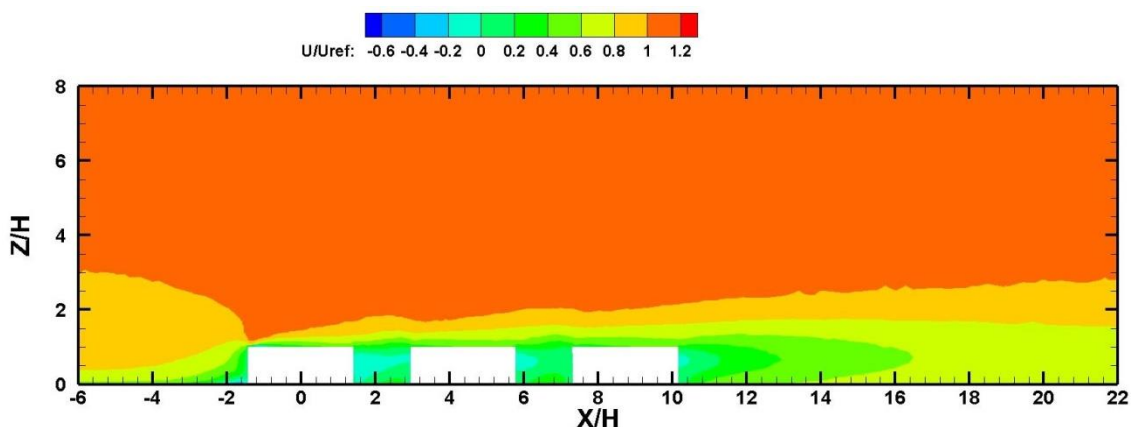
5.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Μετά το πέρας της προσομοίωσης της ροής γύρω από την συστοιχία δεξαμενών και αφού παρατηρηθεί ότι νοείται η φυσική σημασία της ροής, είμαστε σε θέση να επεξεργαστούμε τα δοθέντα αποτελέσματα. Η αποτίμηση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε με βάση τη διαστατική ανάλυση, δηλαδή με την αδιαστατοποίηση των μεγεθών ώστε να μπορούν να είναι συγκρίσιμα με αυτά άλλων μελετών. Αρχικά οι άξονες αδιαστατοποιήθηκαν ως προς το ύψος μιας δεξαμενής (H), λαμβάνοντας Y/H και Z/H . Ενώ στη συνέχεια αδιαστατοποιήθηκε η ταχύτητα του ανέμου ως προς την ταχύτητα αναφοράς δηλαδή αυτή της μέγιστης ταχύτητας που εμφανίζεται εντός του ροϊκού πεδίου, λαμβάνοντας U/U_{ref} . Επίσης δόθηκε ένα τρισδιάστατο αδιάστατο πεδίο αξονικών ταχυτήτων καθώς και διαστατοποιημένο πεδίο πιέσεων, τυρβωδούς κινητικής ενέργειας και ρυθμού σκέδασης.

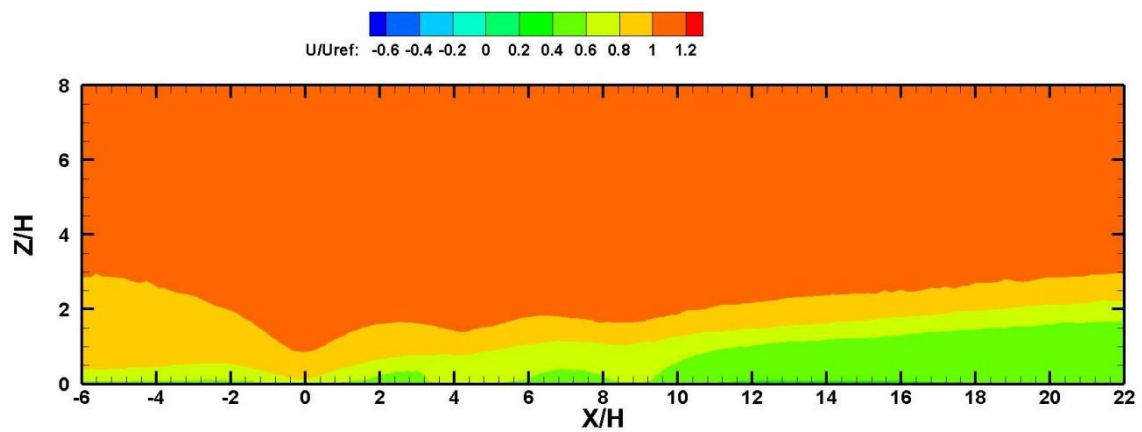
Τέλος τα ισοϋψή γραφήματα πραγματοποιήθηκαν για τα οριζόντια επίπεδα για τις θέσεις $Z/H=0,25$, $Z/H=0,5$, $Z/H=0,75$ και για τα κατακόρυφα επίπεδα για τις θέσεις $Y/H=2,43$, $Y/H=0$ και $Y/H=-2,43$ ώστε να αναλυθούν οι ανακυκλοφορίες καθώς και η εμφάνιση διαφόρων τύπων δινών γύρω από τις δεξαμενές.

5.3.1 Κατακόρυφα Ισοϋψής Γραφήματα

Στο Σχήμα 5-9) για τα επίπεδα $Y/H=2,43$ και $Y/H=-2,43$ διακρίνουμε μια δισδιάστατη απεικόνιση της ροής του αέρα γύρω από μια συστοιχία που αποτελείται από έξι δεξαμενές. Τα δύο επίπεδα έχουν την ίδια μορφολογία ροής διότι έχουν συμμετρικό πεδίο ταχύτητας. Στο Σχήμα 5-10 διακρίνουμε την οπτικοποίηση της ροής με βάση το εφαπτομενικό διάνυσμα των γραμμών ροής. Αρχικά ανάντη του πρώτου κυλίνδρου η ροή διαχωρίζεται και δημιουργεί δύο μέρη. Το ένα μέρος κινείται προς το έδαφος και δημιουργεί έναν ανεστραμμένο στρόβιλο που δημιουργεί τη πεταλοειδή δίνη. Το δεύτερο μέρος της ροής ακολουθεί το πάνω τμήμα του κυλίνδρου με την εμφάνιση στο $(1H)$, ένα σημείο ανακοπής ως εκ τούτου η αποκόληση του οριακού στρώματος και η δημιουργία μιας ανακυκλοφορίας. Στη συνέχεια η ροή λίγο πριν το τέλος του ύψους της πρώτης δεξαμενής $(-0,5H)$, επανακολλάται αφού το σύνολο της γεωμετρίας βρίσκεται εντός του τυρβώδους οριακού στρώματος. Έπειτα μεταξύ της πρώτης και της δεύτερης δεξαμενής, δημιουργείται μια θολωτή δίνη καθώς και ανάντη της δεύτερης δεξαμενής άλλες δύο μικρότερες συμμετρικές δίνες κοντά στο τοίχωμά της. Ενώ μεταξύ της δεύτερης και τρίτης δεξαμενής δημιουργείται μία ανακυκλοφορία κοντά στο ύψος της δεξαμενής. Τέλος κατόντη της τρίτης δεξαμενής δημιουργείται μια πηγή ροής.



α)

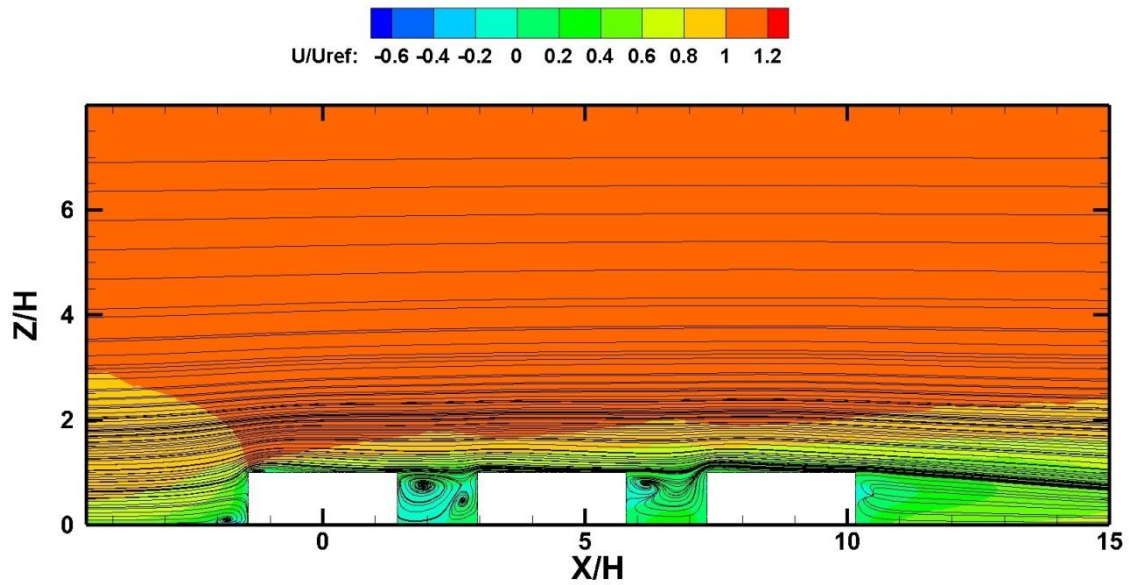


β)

Σχήμα 5-9 Κατακόρυφα ισοϋψείς γραφήματα της αδιάστατης ταχυτήτας U_x/U_{ref} για το επίπεδο α) $Y/H=-2,43$, β) στο επίπεδο συμμετρίας $Y/H=0$

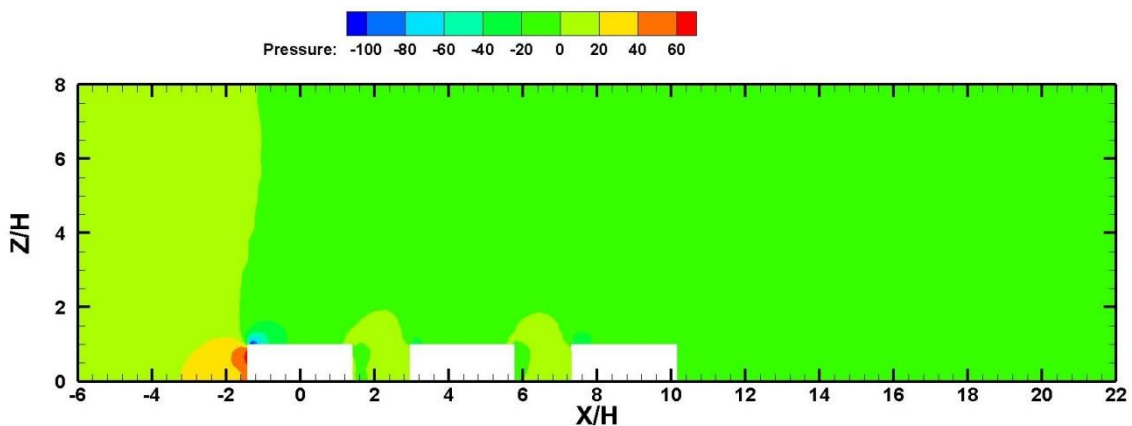
Πίνακας 5-2 Ορισμός χαρακτηριστικών μεγεθών ανακυκλοφοριών στο επίπεδο $Y/H=-2,43$

Ανακυκλοφορία	Στο ύψος της πρώτης δεξαμενής	Ανάντη στο κατώρευμα της πρώτης δεξαμενής	Ανάμεσα στη πρώτη και στη δεύτερη δεξαμενή		Ανάμεσα στη δεύτερη και στη τρίτη δεξαμενή
Αδιάστατο Μήκος X/H	-1,5H	- 2H	2H	3H	6H
Αδιάστατο Ύψος Z/H	1H	0,1H	0,8H	0,1H	0,8H

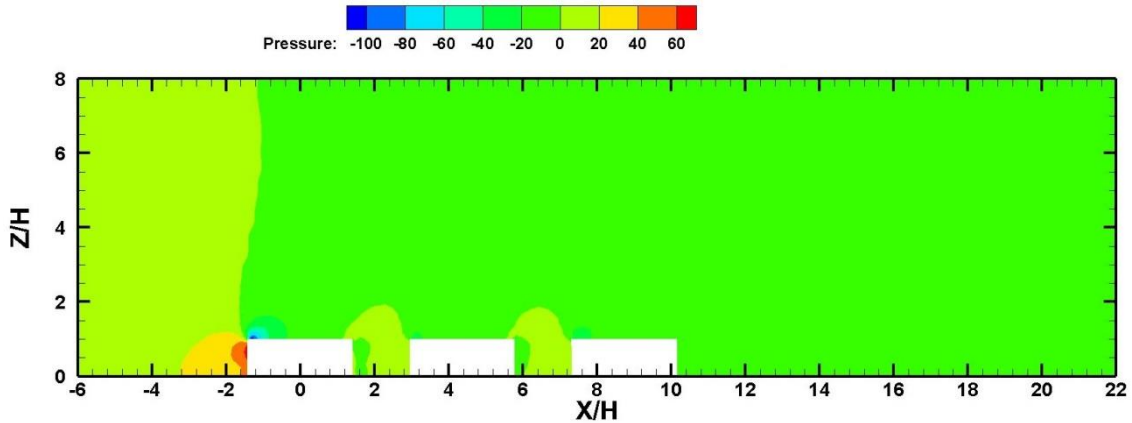


Σχήμα 5-10 Κατακόρυφα ισοϋψείς γραφήματα ροϊκών γραμμών του πεδίου ροής για το επίπεδο $Y/H=-2,43$

Στο (Σχήμα 5-11) παρατηρούμε το πεδίο της πίεσης για το επίπεδο $Y/H=-2,43$. Αρχικά ανάντη της πρώτης δεξαμενής η πίεση είναι μεγάλη. Στο ύψος του στην αρχή της πρώτης δεξαμενής φαίνεται ότι η πίεση λαμβάνει αρνητικές τιμές δηλαδή έχουμε υποπίεση. Ενδιάμεσα στη πρώτη και τη δεύτερη δεξαμενή καθώς και μεταξύ της δεύτερης και της τρίτης δεξαμενής παρατηρείται η ελάτωση της πίεσης μέχρι το ύψος μιας δεξαμενής. Τελος στο πάνω μέρος της τρίτης δεξαμενής διακρίνουμε άλλο ένα τμήμα που φαίνεται ότι εμφανίζει αρνητικές τιμές.



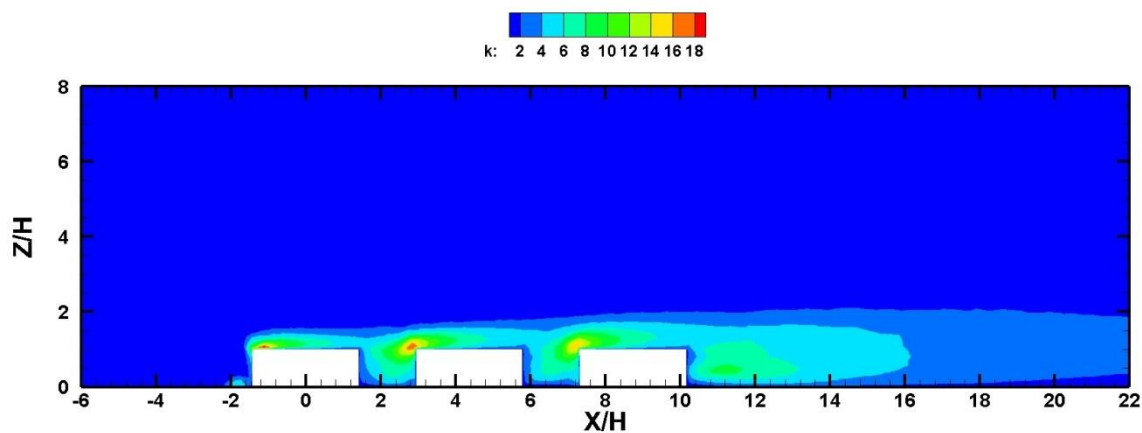
α)



β)

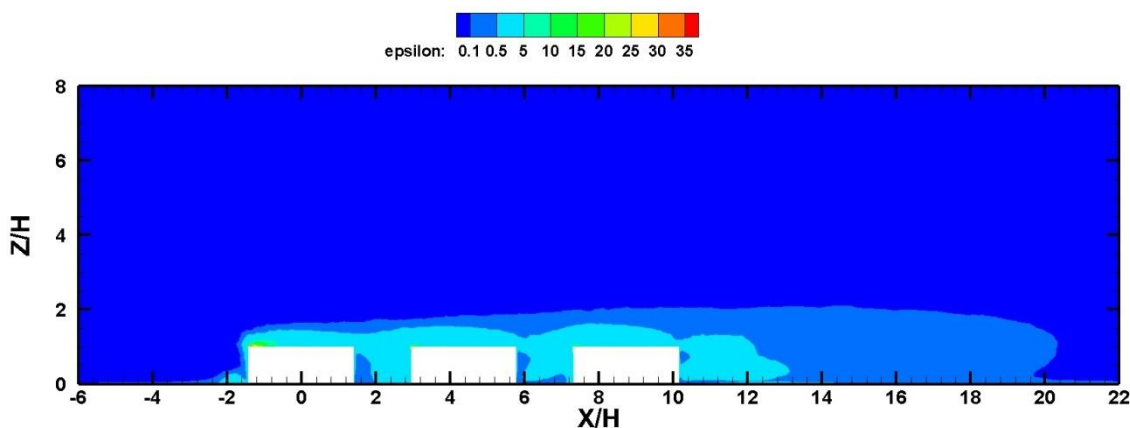
Σχήμα 5-11 Κατακόρυφο ισοϋψής γράφημα της πίεσης p για τις θέσεις α) $Y/H=-2,43$ και β) $Y/H=2,43$

Στο (Σχήμα 5-12) παρατηρούμε το πεδίο της τυρβώδους κινητικής ενέργειας για τη θέση $Y/H=-2,43$. Αρχικά το πεδίο για $X/H=-3$ και $Z/H=2$ εμφανίζει χαμηλές τιμές τυρβώδους κινητικής ενέργειας καθώς βρισκόμαστε απομακρυσμένοι από τις δεξαμενές. Στη συνέχεια ανάντη και κοντά στο τοίχωμα της πρώτης δεξαμενής φαίνεται να αυξάνεται ελάχιστα η τιμή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, ενώ στην επιφάνεια των δεξαμενών φαίνεται να έχουμε ακόμα πιο υψηλές τιμές. Τέλος κατά τον απόρροους διακρίνουμε ένα τμήμα υψηλής τιμής κοντά στο έδαφος.



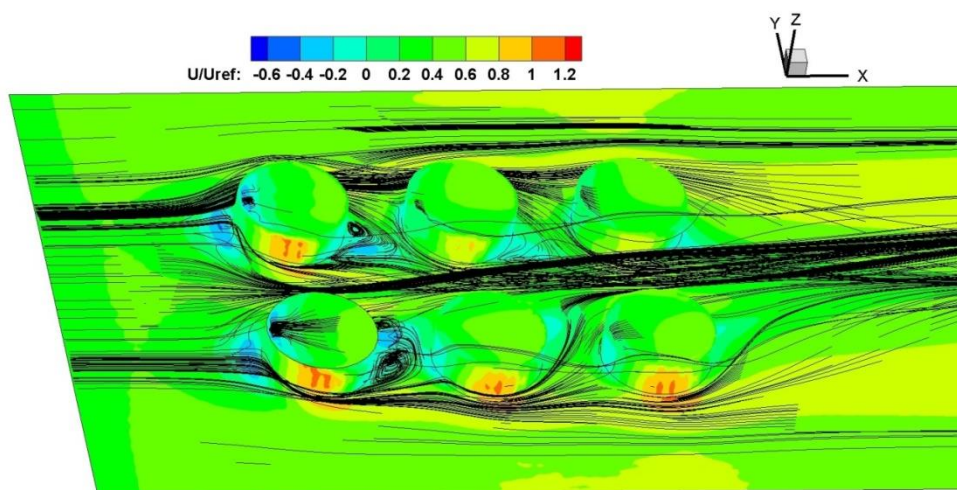
Σχήμα 5-12 Κατακόρυφο ισοϋψής γράφημα της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k για το επίπεδο $Y/H=-2.43$

Στο Σχήμα 5-13 παρατηρούμε το πεδίο του ρυθμού σκέδασης για το επίπεδο $Y/H=-2,43$. Φαίνεται ότι πάνω από το ύψος των δεξαμενών, ενδιάμεσα σε αυτές καθώς και κατά τον απόρρους η τιμή του epsilon λαμβάνει σχετικά μεγάλες τιμές με αποτέλεσμα να αντισταθμίζεται η τυρβώδης κινητική ενέργεια.



Σχήμα 5-13 Κατακόρυφο ισοϋψής γράφημα του ρυθμού σκέδασης $epsilon$ για το επίπεδο $Y/H=-2.43$

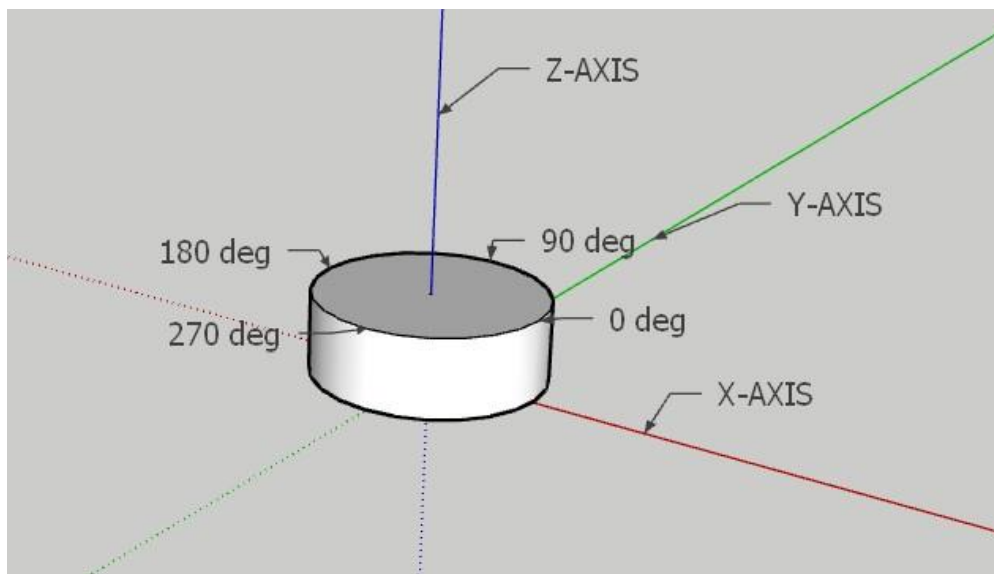
Στο (Σχήμα 5-14) απεικονίζεται ένα τρισδιάστατο και συνάμα αδιάστατο πεδίο ταχύτητας με τη παρουσία ροϊκών γραμμών με κατεύθυνση από αριστερά προς τα δεξιά. Με την είσοδο της ροής στο υπολογιστικό χωρίο η ροή στο ύψος της πρώτης δεξαμενής αποκόλλεται και αμέσως επανακολλάται καθώς ένα τμήμα της ροής διασχίζει τη περιφέρεια της δεξαμενής και κοντά στο έδαφος, έρχεται και τυλίγεται με αποτέλεσμα να δημιουργήσει δύο συμμετρικές ανακυκλοφορίες στο κατάντη μέρος της πρώτης δεξαμενής. Στη συνέχεια φαίνεται ότι η ροή μετά τον διαχωρισμό της και κοντά στον απόρρουσ δημιουργείται η υπέρθεσή της όπως φαίνεται με έντονες ροϊκές γραμμές.



Σχήμα 5-14 Αδιάστατο πεδίο ροής αξονικών ταχυτήτων U_x/U_{ref}

5.3.2 Οριζόντια ισοϋψής γραφήματα

Στη συνέχεια για να μπορέσουμε να παρατηρήσουμε τη ροή γύρω από τις δεξαμενές, δημιουργήθηκε το (Σχήμα 5-16) που απεικονίζει τα ισοϋψής γραφήματα του πεδίου ροής για τα επίπεδα $Z/H=0,25$, $Z/H=0,5$ και $Z/H=0,75$. Αρχικά στα τρία επίπεδα το πεδίο ταχυτήτων εμφανίζει υψηλές τιμές. Όμως και για τις έξι δεξαμενές εξίσου και για τα τρία επίπεδα παρατηρούνται υψηλές ταχύτητες όταν η γωνία θ του κυλίνδρου βρίσκεται περί τις 90 και 270 μοίρες. Επιπροσθέτως η ταχύτητα παραμένει αρκετά χαμηλή όταν η γωνία θ του κυλίνδρου βρίσκεται περί τις 0 και 180 μοίρες όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5-15.



Σχήμα 5-15 Απεικόνιση των συντεταγμένων σε μοίρες πάνω σε μια κυλινδρική δεξαμενή.

Η εμφάνιση υψηλών ταχυτήτων οφείλεται στην μείωση της πίεσης. Ενώ η εμφάνιση χαμηλών ταχυτήτων οφείλεται στην εμφάνιση των κυλινδρικών εμποδίων που ανακόπτουν την ορμή του ρευστού και σε αυτό το σημείο με την αύξηση των επιπέδων διακρίνουμε ένα σημείο ανακοπής κατάντη των πρώτων δεξαμενών, ένα σημείο ανάντη και κατάντη για την δεύτερη πάνω και κάτω δεξαμενή και ένα σημείο ανάντη και κατάντη για τη τρίτη πάνω και κάτω δεξαμενή. Όσο απομακρυνόμαστε καθ' ύψος από τις δεξαμενές τόσο αυξάνεται η ταχύτητα του πεδίου ροής από την άνω και από τη κάτω πλευρά.

Για την καλύτερη απεικόνιση και οπτικοποίηση της ροής γύρω από τις δεξαμενές, χρησιμοποιήσαμε και για τα τρία επίπεδα σε όλο το υπολογιστικό χωρίο ροϊκές γραμμές οι οποίες θα μας υποδηλώσουν τη ροή του αέρα από την αρχή έως το πέρας της συστοιχίας. Όπως γίνεται αντιληπτό από το (Σχήμα 5-17), παρατηρούμε ότι η ροή από την είσοδο του υπολογιστικού πεδίου, ανάντη έως τις δύο πρώτες δεξαμενές την πρόσκρουση του ροϊκού πεδίου και ο διαχωρισμός αυτού σε δύο συμμετρικά μέρη ροής. Σύμφωνα με το (Σχήμα 5-17 α και β) κατάντη της πρώτης και δεύτερης σειράς δεξαμενών δημιουργούνται δύο συμμετρικές ανακυκλοφορίες. Ενώ για το (Σχήμα 5-17γ) παρατηρείται η εμφάνιση ανακυκλοφοριών στη κατάντη πλευρά των πρώτων δεξαμενών καθώς και στη δεύτερη κάτω δεξαμενή, κατάντη και πολύ κοντά στο τοίχωμα της. Η δημιουργία

των ανακυκλοφοριών οφείλεται μεγάλη τιμή του αριθμού Re και στην αποκόλληση του οριακού στρώματος. Οι διαστάσεις των ανακυκλοφοριών για τα τρία επίπεδα, παρουσιάζονται στον (Πίνακας 5-4), Πίνακας 5-3) και (Πίνακας 5-5).

Στο ενδιάμεσο τμήμα των δεξαμενών, η ροή είναι ανομοιόμορφη και η μια δεξαμενή επηρεάζει την άλλη με αποτέλεσμα ενδιάμεσα να έχουμε μικρότερη επιτάχυνση σε σχέση με τις πάνω και κάτω πλευρές των δεξαμενών. Στην άνω και κάτω συστοιχία περιμετρικά από τις δεξαμενές που δεν γειτνιάζουν με δεξαμενές, η επιτάχυνση της ροής είναι μεγαλύτερη. Πιο συγκεκριμένα με την καθ' ύψος απομάκρυνση η επιτάχυνση της ροής είναι μεγαλύτερη. Κατά τον απόρροου της συστοιχίας Σχήμα 5-17α), για τις δύο δεξαμενές συγκεκριμένα κοντά στο τοίχωμα διακρίνουμε δύο ανακυκλοφορίες εξαιτίας της περιοχής επιβράδυνσης της ροής.

Πίνακας 5-3 Ορισμός χαρακτηριστικών μεγεθών ανακυκλοφοριών στο επίπεδο Z/H=0,25

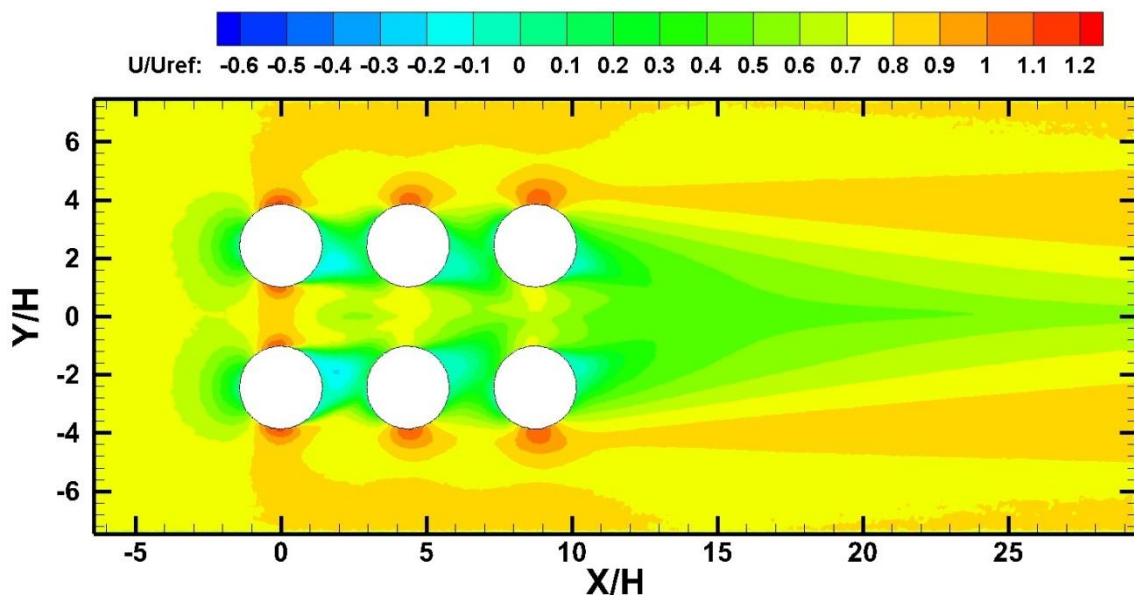
Ανακυκλοφορία	Κατάντη της πρώτης κάτω δεξαμενής		Κατάντη της πρώτης πάνω δεξαμενής		Κατάντη της δεύτερης κάτω δεξαμενής		Κατάντη της δεύτερης πάνω δεξαμενής		Κατάντη της τρίτης κάτω δεξαμενής		Κατάντη της τρίτης πάνω δεξαμενής	
Αδιάστατο Μήκος X/H	2H		2H		6H		6H		10H		10H	
Αδιάστατο Ύψος Y/H	3H	2H	1H	3H	3H	2H	1H	3H	1,5H	2H	1,25H	2H

Πίνακας 5-4 Ορισμός χαρακτηριστικών μεγεθών ανακυκλοφοριών στο επίπεδο Z/H=0,5

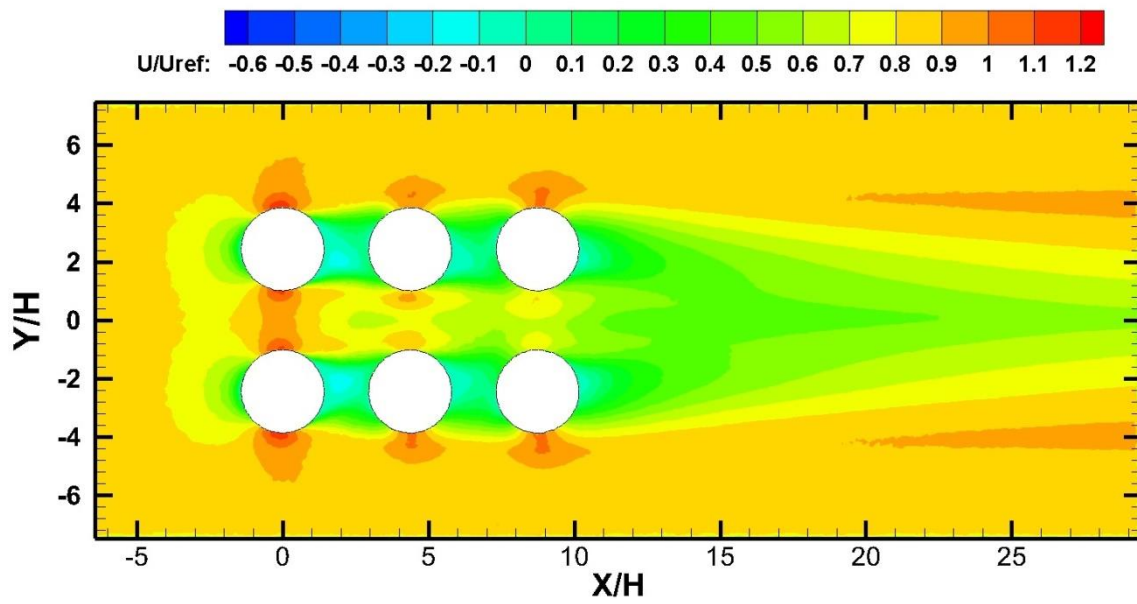
Ανακυκλοφορία	Κατάντη της πρώτης κάτω δεξαμενής		Κατάντη της πρώτης πάνω δεξαμενής		Κατάντη της δεύτερης κάτω δεξαμενής		Κατάντη της δεύτερης πάνω δεξαμενής	
Αδιάστατο Μήκος X/H	2H		2H		6H		6H	
Αδιάστατο Ύψος Y/H	3H	2H	1H	3H	3H	2H	1H	3H

Πίνακας 5-5 Ορισμός χαρακτηριστικών μεγεθών ανακυκλοφοριών στο επίπεδο $Z/H=0,75$

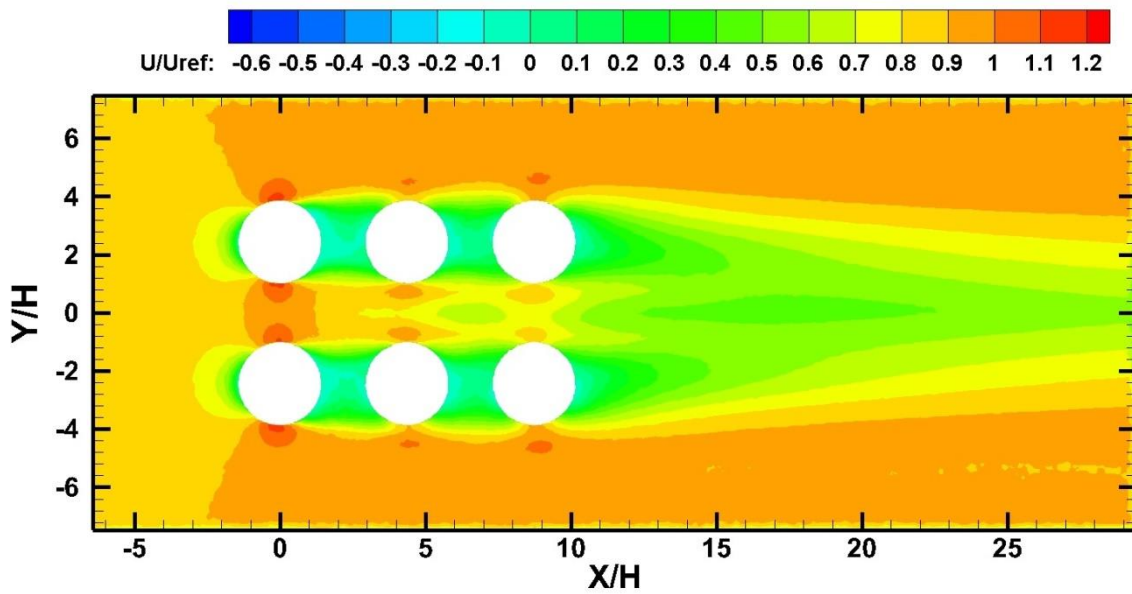
Ανακυκλοφορία	Κατάντη της πρώτης κάτω δεξαμενής		Κατάντη της πρώτης πάνω δεξαμενής		Κατάντη της δεύτερης πάνω δεξαμενής
	1H	3H	1H	3H	
Αδιάστατο Μήκος X/H	1H	3H	1H	3H	5H
Αδιάστατο Ύψος Y/H	-2H	-2,5H	1,5H	2H	2H



α)

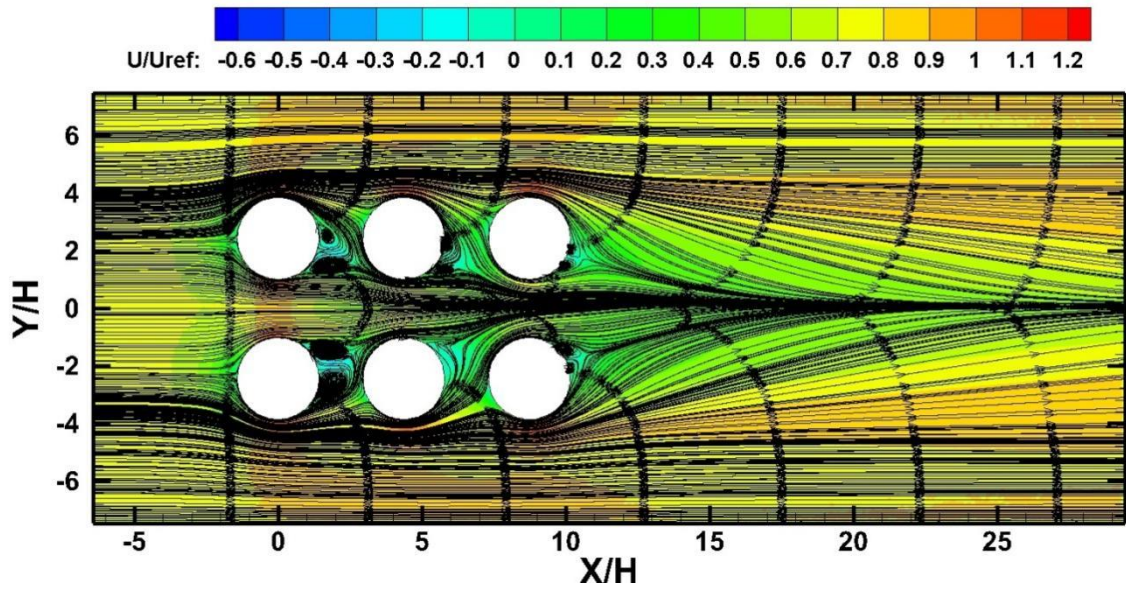


β)

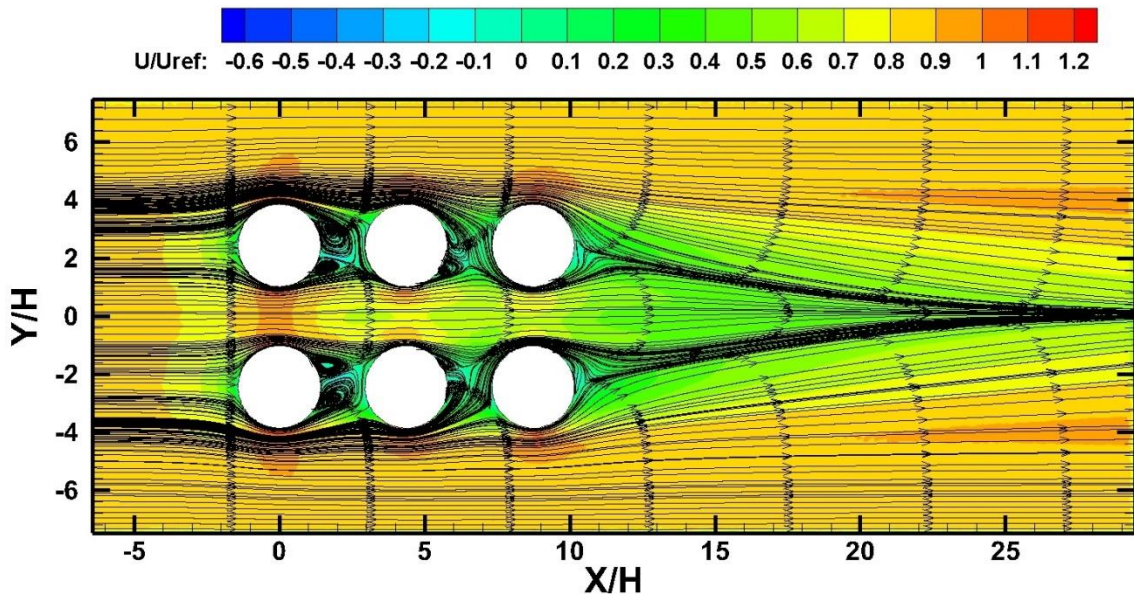


γ)

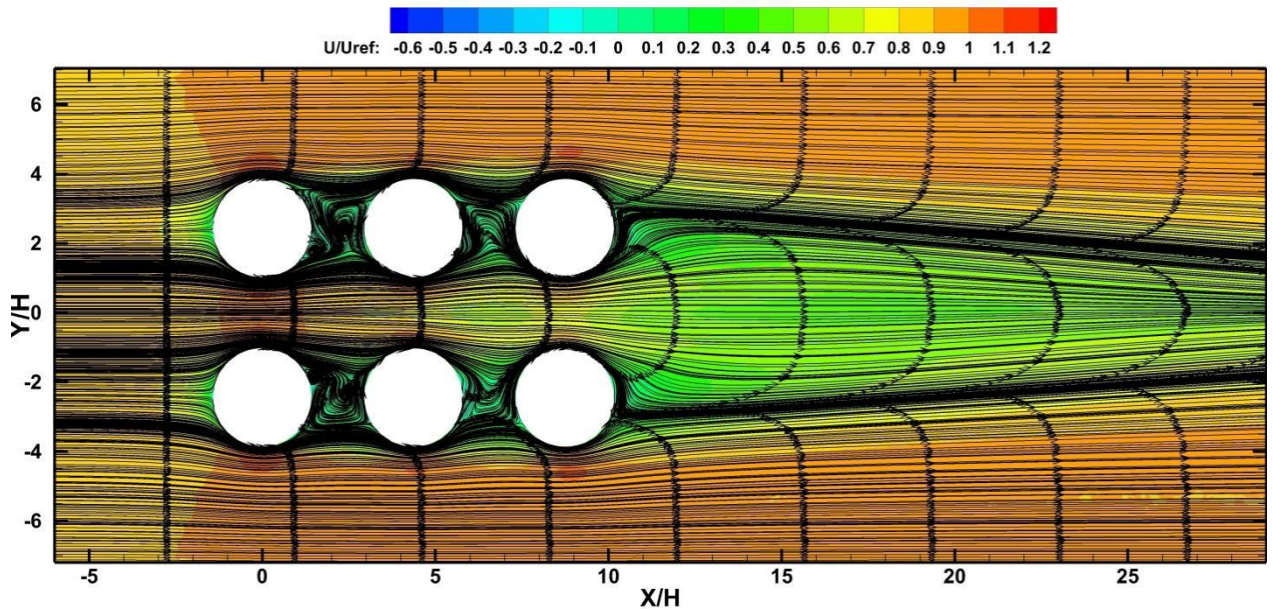
Σχήμα 5-16 Οριζόντια ισοϋψείς γραφήματα του πεδίου ροής για τα επίπεδα α) $Z/H=0,25$, β) $Z/H=0,5$ και γ) $Z/H= 0,75$



α)



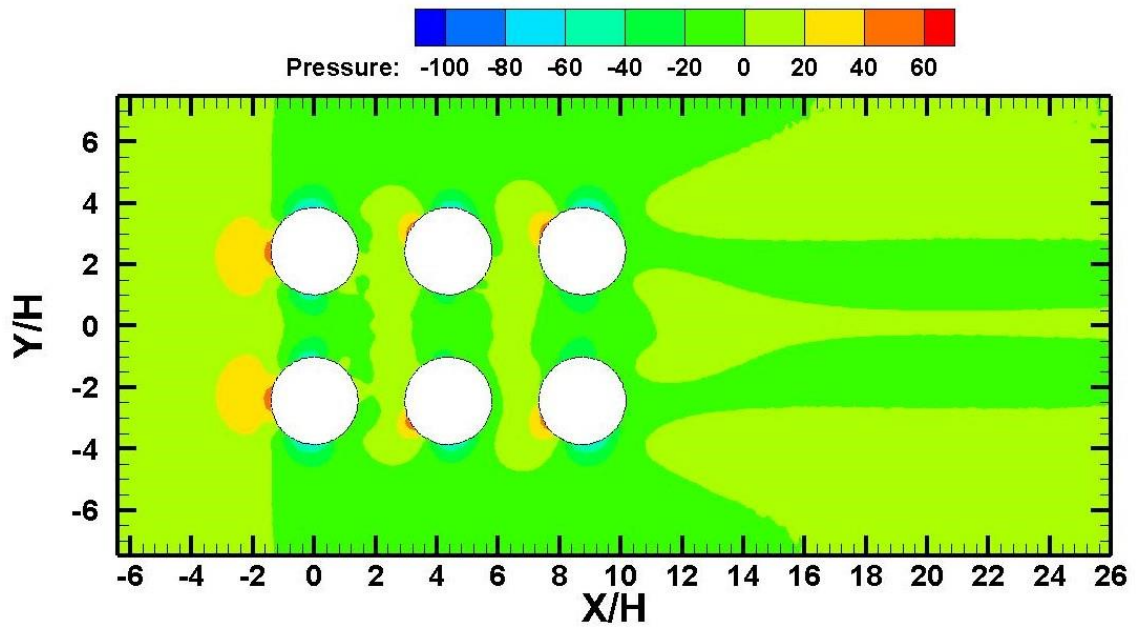
β)



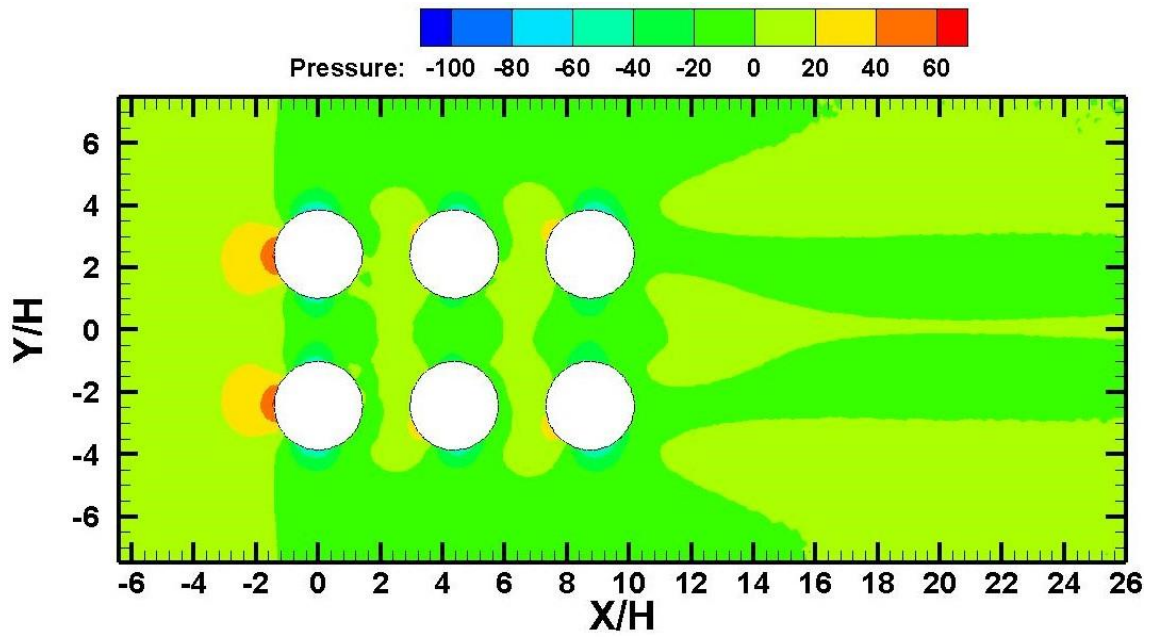
γ)

Σχήμα 5-17 Οριζόντια ισοϋψής γραφήματα ροϊκών γραμμών του πεδίου ροής για τα επίπεδα α) $Z/H=0,25$, β) $Z/H=0,5$ και γ) $Z/H=0,75$

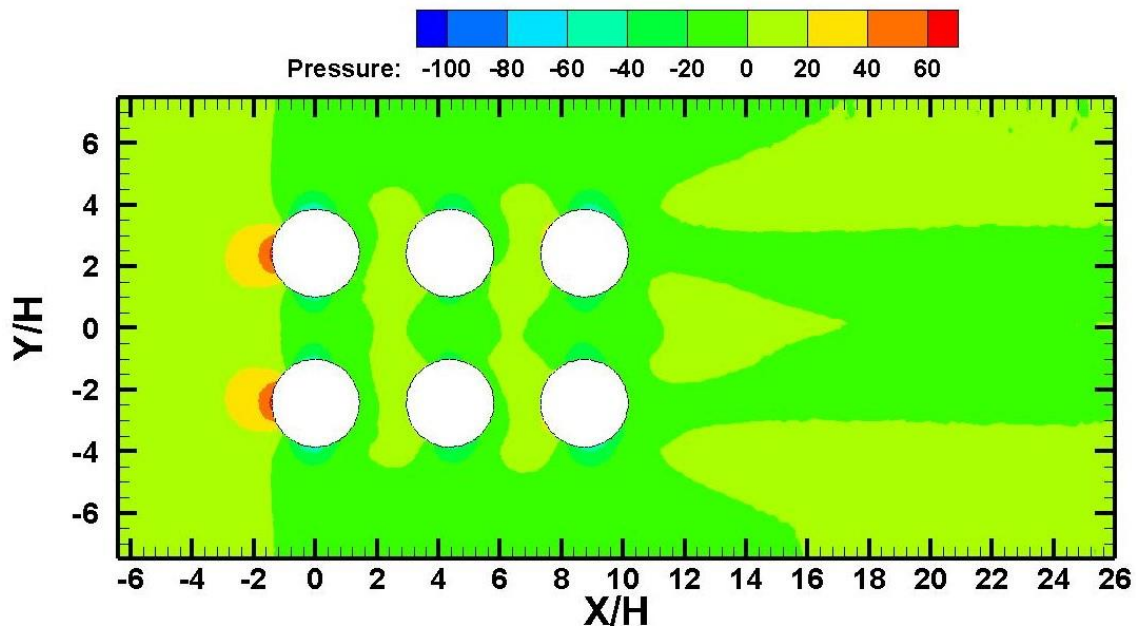
Στο (Σχήμα 5-18) απεικονίζονται τρία οριζόντια ισοϋψείς γραφήματα του πεδίου της πίεσης για τα επίπεδα $Z/H=0,25$, $Z/H=0,5$ και $Z/H=0,75$. Τα τρία επίπεδα στην αρχή του υπολογιστικού χωρίου εμφανίζουν ίδιο πεδίο πίεσης. Στη συνέχεια το επίπεδο $Z/H=0,25$, κατόντη των πρώτων δεξαμενών παρουσιάζει υψηλές τιμές πίεσης, ενώ από τα πλαϊνά εμφανίζει χαμηλότερες τιμές πίεσης. Στη δεύτερη σειρά δεξαμενών στη κατόντη πλευρά φαίνεται οι υψηλές τιμές να αλλάζουν γωνία εμφάνισης καθώς η ροή εμποδίζεται από τις πρώτες δεξαμενές. Ενώ το ίδιο ισχύει και για τη τρίτη σειρά δεξαμενών. Στη συνέχεια για το επίπεδο $Z/H=0,5$ κατόντη των πρώτων δεξαμενών έντονο πεδίο πίεσης κοντά στο τοίχωμα αυτών και τις ίδιες χαμηλές πιέσεις με το επίπεδο $Z/H=0,25$. Στη συνέχεια για τη δεύτερη σειρά των δεξαμενών, η πίεση ανάντη αφενός έχει αλλάξει γωνία εμφάνισης αφετέρου έχει ελαχιστοποιηθεί. Το ίδιο ισχύει και για τη τρίτη σειρά δεξαμενών. Τέλος το επίπεδο $Z/H=0,75$ κατόντη από τη πρώτη σειρά δεξαμενών εμφανίζει ίδιο πεδίο πιέσεων με αυτό των παραπάνω επιπέδων. Όμως για τη δεύτερη και τρίτη σειρά δεξαμενών η πίεση εξασθενεί καθώς απομακρυνόμαστε από τη συστοιχία των δεξαμενών.



a)



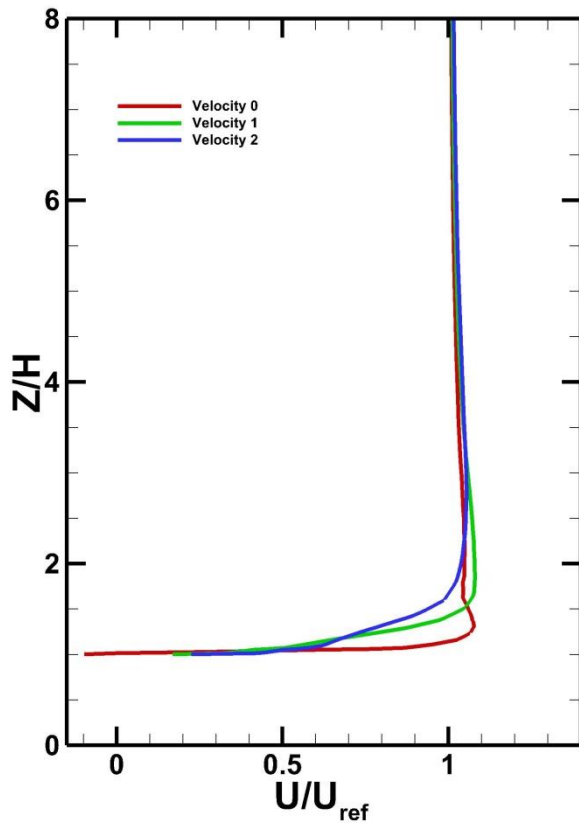
β)



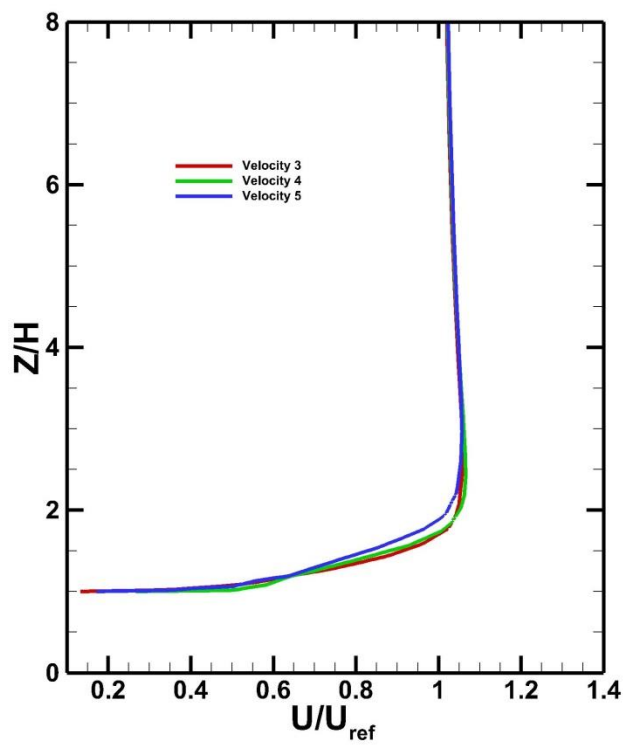
γ)

Σχήμα 5-18 Οριζόντια ισοϋψείς γραφήματα της πίεσης p για τα επίπεδα α) $Z/H=0,25$, β) $Z/H=0,5$ και γ) $Z/H=0,75$

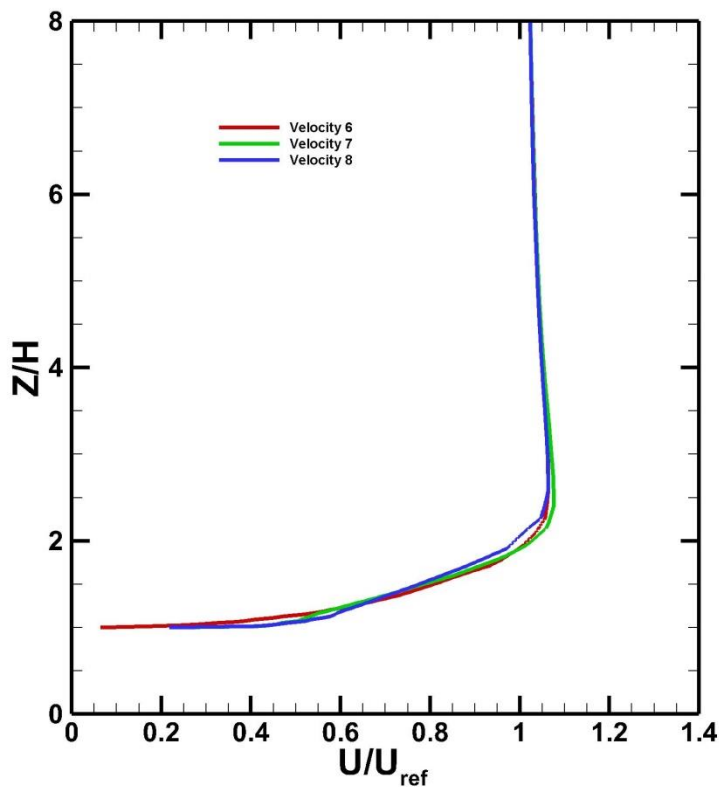
Στο Σχήμα 5-19) παρατηρούμε τη κατανομή των ταχυτήτων πάνω από το ύψος των δεξαμενών λαμβάνοντας για κάθε δεξαμενή από τρία σημεία. Αρχικά στο (Σχήμα 5-19^α) παρατηρούμε τα τρία σημεία με τα προφίλ της ταχύτητας που προέκυψαν για τη πρώτη δεξαμενή. Πιο αναλυτικά το προφίλ "Velocity 0" αναφέρεται στην αρχή της δεξαμενής και παρατηρείται ότι η ταχύτητα στο ύψος της δεξαμενής παραμένει σταθερή και ίση με τη κατεύθυνση της ροής. Όμως κοντά στα $1,5H$ δημιουργείται μια μικρή αναστροφή του προφίλ που υποδηλώνει την αποκόληση του οριακού στρώματος. Στη συνέχεια για το ενδιάμεσο σημείο "Velocity 1" παρατηρείται ότι η ταχύτητα στο ύψος της δεξαμενής εμφανίζει υψηλότερες ταχύτητες πιο νωρίς, ενώ το τελευταίο σημείο "Velocity 2" που αναφέρεται στο ακριανό σημείο της δεξαμενής, εμφανίζει ακόμα πιο γρήγορα υψηλές ταχύτητες. Στη συνέχεια ακολουθούν τα προφίλ ταχύτητας της δεύτερης δεξαμενής όπως φαίνονται στο (Σχήμα 5-19 β). Αρχικά και για τα τρία σημεία παρατηρείται άμεση αύξηση του προφίλ της ταχύτητας. Τέλος στο (Σχήμα 5-19γ) παρατηρούμε τα προφίλ ταχύτητας που έχουν προκύψει για τη τρίτη δεξαμενή. Φαίνεται ότι και τα τρία προφίλ εμφανίζουν υψηλές ταχύτητες σχετικά γρήγορα.



α)



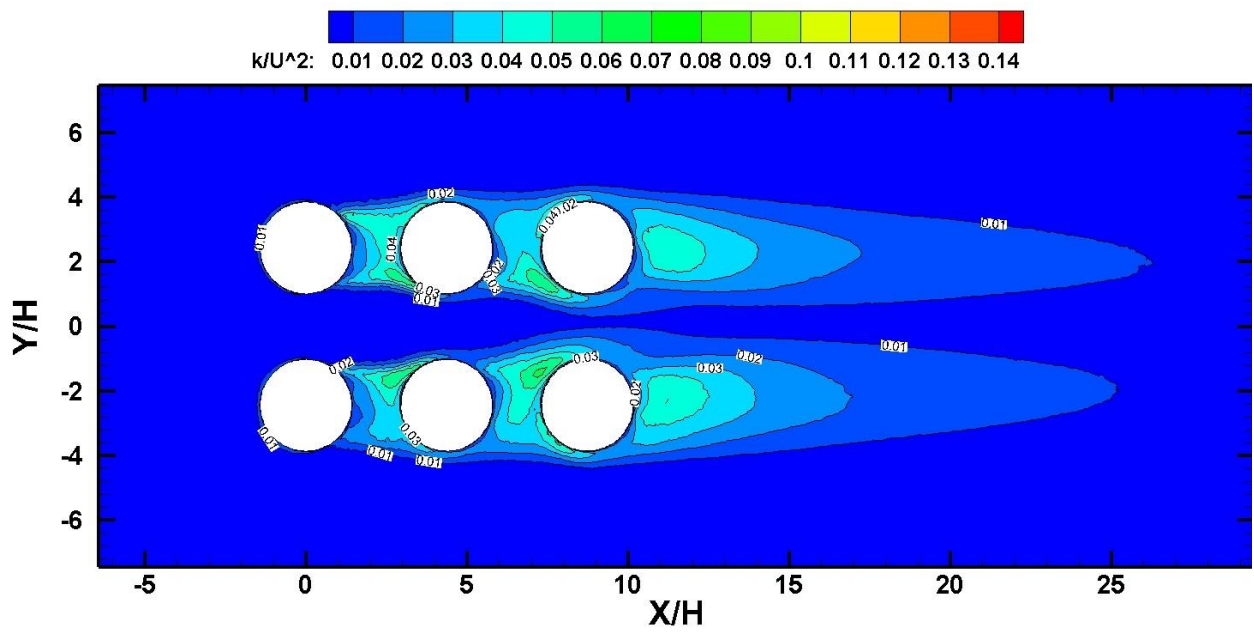
β)



γ)

Σχήμα 5-19 Κατανομή των ταχυτήτων για τις τρεις δεξαμενες για το επίπεδο $Z/H=1$, α) πρώτη δεξαμενή, β) δεύτερη δεξαμενή και γ) τρίτη δεξαμενή

Στη συνέχεια παρατηρούμε (Σχήμα 5-20) για το επίπεδο $Z/H=0,5$ μια δισδιάστατη απεικόνιση της δημιουργίας της τύρβης γύρω από τη συστοιχία των δεξαμενών. Αρχικά παρατηρούμε χαμηλές τιμές τυρβώδους κινητικής ενέργειας σε όλο το πεδίο. Ύστερα αυξημένες τιμές της τυρβώδους κινητικής ενέργειας ανάμεσα στη πρώτη και τη δεύτερη δεξαμενή κοντά στο τοίχωμά της καθώς και ανάμεσα στη δεύτερη και τρίτη δεξαμενή κοντά στο τοίχωμα της. Αυτό συμβαίνει λόγω των υψηλών ταχυτήτων που λαμβάνουν χώρα κοντά στο τοίχωμα όπως παρατηρήσαμε στο (Σχήμα 5-16β).



Σχήμα 5-20 Κατακόρυφο ισοϋψής γράφημα της τυρβώδους κινητικής ενέργειας για το επίπεδο $Z/H=0,5$.

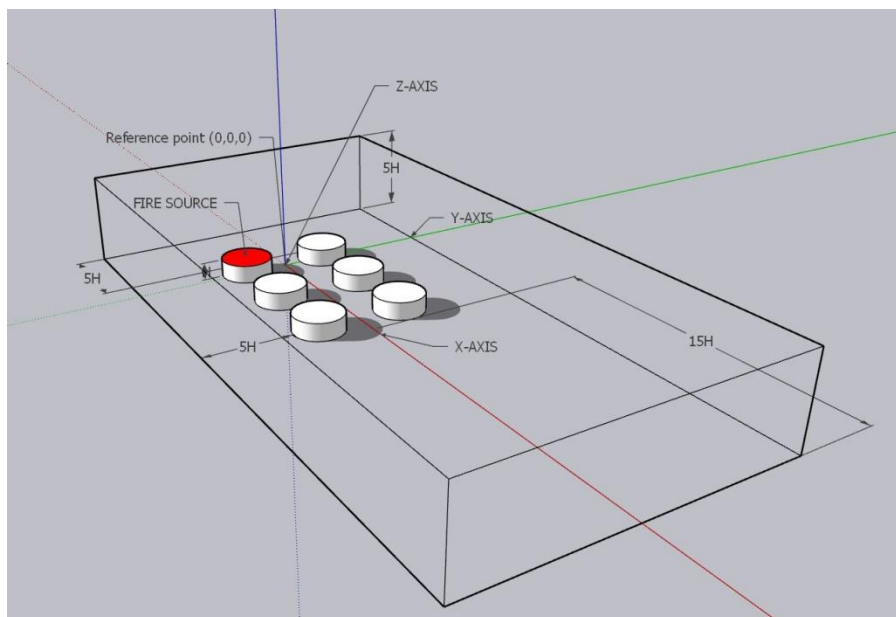
6 Προσομοίωση Ατυχήματος φωτιάς

Στη παρούσα διπλωματική εργασία προσομοιώθηκε ένα ατύχημα λίμνης φωτιάς σε μία συστοιχία έξι δεξαμενών αποθήκευσης αργού πετρελαίου με την εμφάνιση ανέμου όπως παρουσιάζεται και στην έρευνα του (Zhou 2019) .Πιο αναλυτικά η συστοιχία των έξι δεξαμενών λαμβάνεται ως ομοιόμορφη (staggered) ευθυγραμμισμένη καθώς έχει την ίδια χωρητικότητα 10^5 m^3 με κοινή διάμετρο 85 m και κοινό ύψος 29,75 m. Το υπολογιστικό χωρίο κατά τη προσομοίωση λαμβάνει διαστάσεις 876,25m x 492,5m x 148,75m. Στο (Σχήμα 6-1) διακρίνεται το υπολογιστικό χωρίο με τη συστοιχία των δεξαμενών καθώς και μία εξ'αυτών διακρίνεται στην οροφή η πηγή της λίμνης του καυσίμου υπό συνθήκες λεπτού ανέμου (Πίνακας 6-1). Στη συνέχεια οι θερμικές ιδιότητες του αργού πετρελαίου επιλέχθηκαν ως ο μέγιστος ρυθμός καύσης μάζας καυσίμου να είναι $0,059 \text{ kg/m}^2\text{sec}$, με θερμότητα καύσης μάζας καυσίμου ίση με $47,5 \text{ KJ/gr}$, 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 ίση με 890 kg/m^3 . Για τη προσομοίωση του ατυχήματος φωτιάς χρησιμοποιήθηκε ο επιλύτης FireFOAM με τη μέθοδο URANS με τη βοήθεια του μοντέλου $k - \epsilon$. Τέλος ο υπολογισμός του ρυθμού καύσης μάζας \dot{m}'' και ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας \dot{Q}_c (HRR) προκύπτουν από τις παρακάτω σχέσεις: (Babrauskas 1983)

$$\dot{m}'' = \dot{m}_{\infty}'' (1 - e^{-k\beta D}) \quad (6-1)$$

$$\dot{Q}_c = \dot{m}'' \Delta H_{c,eff} A_f \quad (6-2)$$

Όπου \dot{m}_{∞}'' αντιστοιχεί στον ρυθμό απώλειας μάζας φωτιάς άπειρης διαμέτρου, το $\Delta H_{c,eff}$ αντιστοιχεί στη θερμότητα της καύσης, A_f αντιστοιχεί στο εμβαδόν επιφανείας της φωτιάς, β αντιστοιχεί σε ένα διορθωτή μέσου μήκους ακτίνας και το k αντιστοιχεί σε ένα συντελεστή απορρόφησης-εξάλειψης.



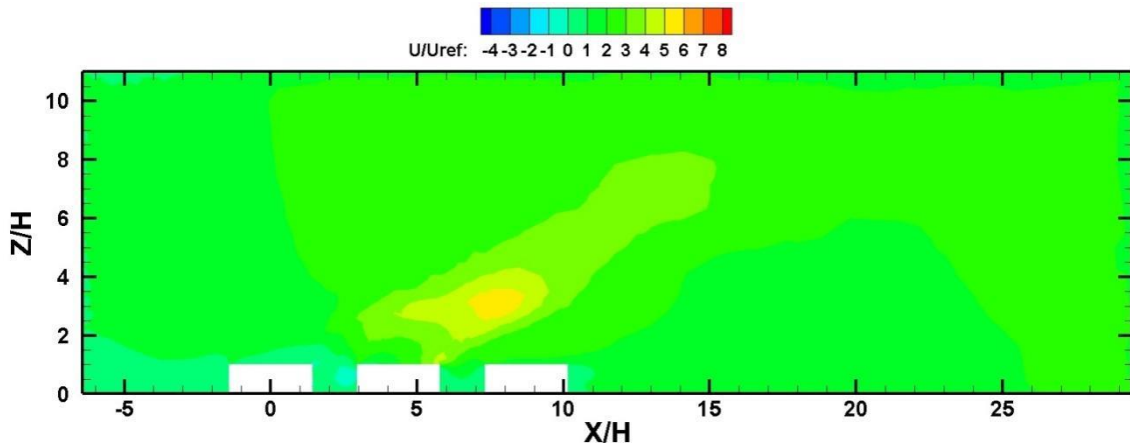
Σχήμα 6-1 Υπολογιστικό χώρο προσομοίωσης ατυχήματος

Πίνακας 6-1 Κλίμακα έντασης ανέμου (Zhou 2019)

Κλίμακα	Ονομασία	Ταχύτητα Ανέμου (m/sec)
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	8-10,7
7	Σφοδρός Άνεμος	13,9-17,1
8	Ορμητικός Άνεμος	17,2-20,7

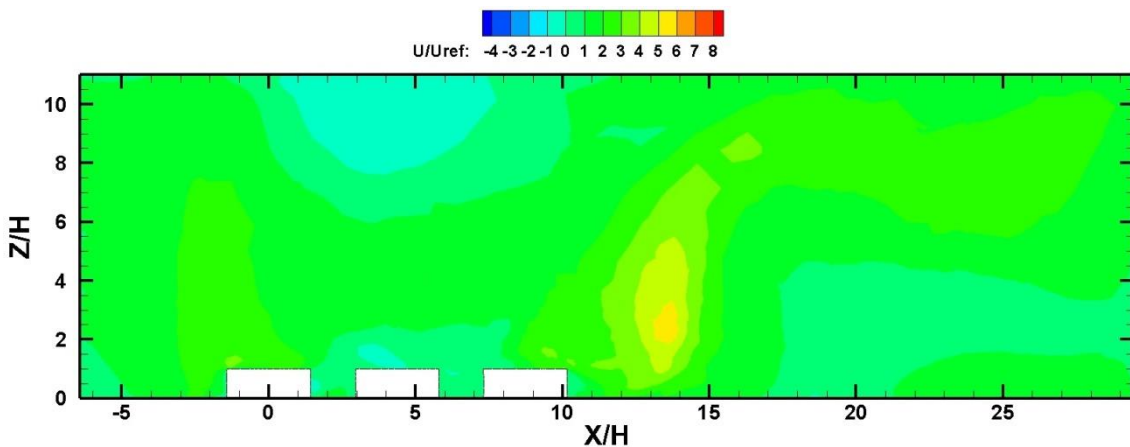
6.1 Κατακόρυφα Ισοϋψείς γραφήματα πεδίου ταχύτητας

Στο κατακόρυφο ισοϋψής γράφημα του (Σχήμα 6-2) παρατηρούμε ότι οι ταχύτητες πάνω από (1H) των δεξαμενών παραμένει αρκετά υψηλή και ακόμα πιο υψηλή πάνω από τη δεύτερη δεξαμενή καθώς σε αυτό το σημείο φαίνεται ότι διαφεύγουν οι αέριοι ρυπαντές με κατεύθυνση αυτή του ανέμου. Επίσης παρατηρούμε ότι κοντά στο ύψος των δεξαμενών καθώς και μεταξύ αυτών η εμφάνιση χαμηλότερων ταχυτήτων.



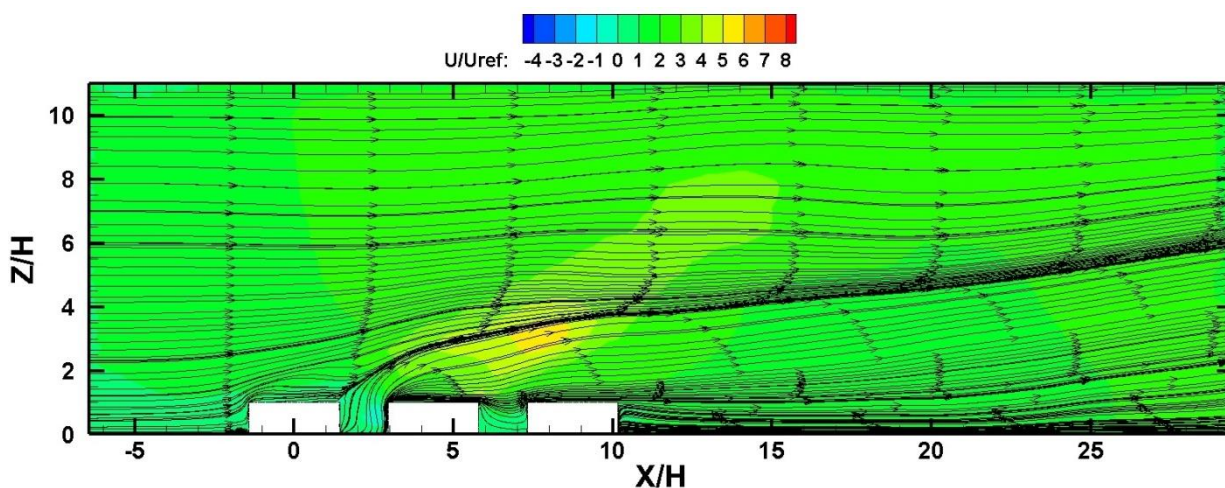
Σχήμα 6-2 Κατακόρυφο ισοϋψής γράφημα πεδίου ταχύτητας για το επίπεδο $Y/H=-2,43$

Στο (Σχήμα 6-3) διακρίνουμε το ισοϋψής γράφημα του πεδίου ταχύτητας για τις δεξαμενές που βρίσκονται απομακρυσμένες από αυτές που έχουν κοντά τους τη καιόμενη δεξαμενή. Αρχικά φαίνεται πλάγια προς τη τρίτη κατά σειρά δεξαμενή η εμφάνιση από το ύψος της δεξαμενής και ύστερα υψηλές ταχύτητες που δείχνουν ότι οι αέριοι ρυπαντές έχουν φτάσει έως εκεί και με το πέρας είναι κατευθυνόμενες προς το έδαφος.



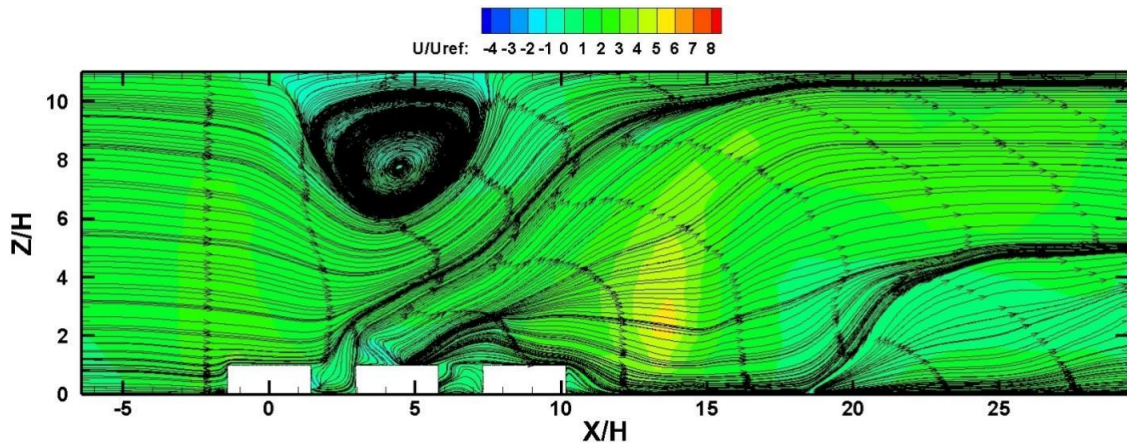
Σχήμα 6-3 Κατακόρυφο ισοϋψής γράφημα πεδίου ταχύτητας για το επίπεδο $Y/H=2,43$

Στο (Σχήμα 6-4) παρατηρούμε το ισοϋψής γράφημα του ροϊκού πεδίου για το επίπεδο $Y/H=-2,43$. Αρχικά ανάντη από τη πρώτη δεξαμενή στο κάτω μέρος υπάρχει μία πεταλοειδή δίνη. Ανάμεσα στη πρώτη και στη δεύτερη δεξαμενή εκβάλλει μία ροή που προέρχεται από το πίσω μέρος της πρώτης δεξαμενής και στη πορεία εισέρχεται στη κύρια ροή όπως θα παρατηρηθεί παρακάτω. Επίσης μεταξύ της δεύτερης και τρίτης δεξαμενής παρατηρείται ότι η ταχύτητα έχει ίδιο μέτρο αλλά αντίθετη με την υπόλοιπη ροή. Τέλος κατάντη της τρίτης δεξαμενής, δημιουργείται από το ύψος μίας δεξαμενής με κατεύθυνση προς το έδαφος μια ροή πηγής.



Σχήμα 6-4 Κατακόρυφο ισοϋψής γράφημα ροϊκών γραμμών στο επίπεδο $Y/H=-2,43$

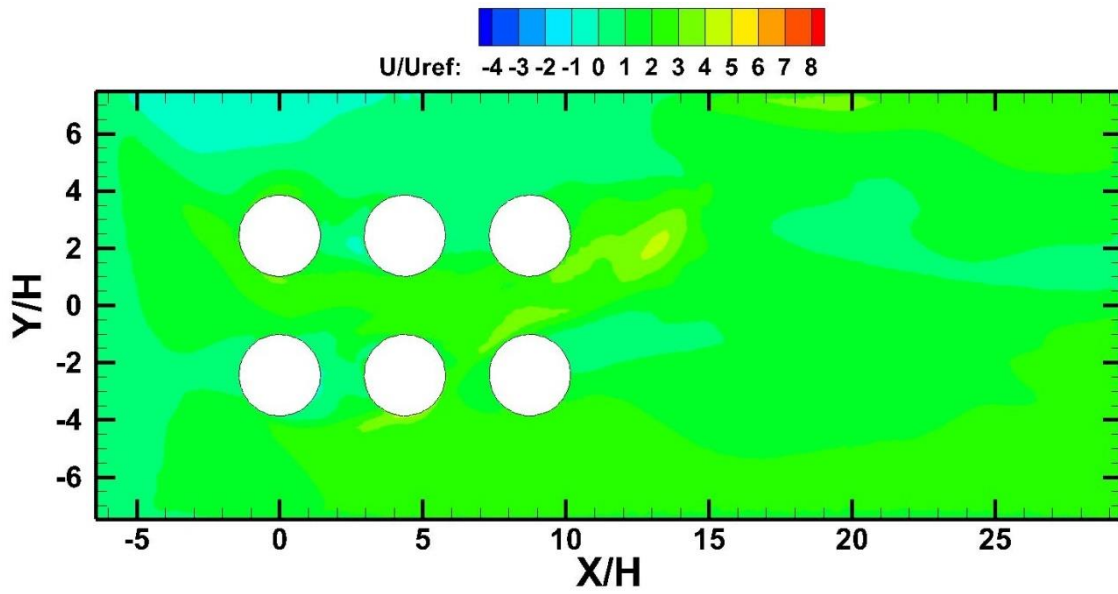
Στο (Σχήμα 6-5) απεικονίζεται το κατακόρυφο ισοϋψής ροϊκό πεδίο του αδιάστατου πεδίου ταχύτητας. Ανάντη από τη πρώτη δεξαμενή και κοντά στο τοίχωμα διακρίνουμε μια πεταλοειδή δίνη. Στη συνέχεια πάνω από τη δεύτερη δεξαμενή έχει σχηματιστεί μία μεγάλη δίνη που συμπιέζει το ροϊκό πεδίο ενώ το οριακό στρώμα οριοθετείται. Επίσης οι ροϊκές γραμμές γίνονται έντονες από το πέρασ της επιφάνειας της πρώτης δεξαμενής ενώ υπεισέρχεται ένα ρεύμα ροϊκών γραμμών που βρίσκεται ενδιάμεσα από τη πρώτη και από τη δεύτερη δεξαμενή και από το ύψος της δεύτερης δεξαμενής.



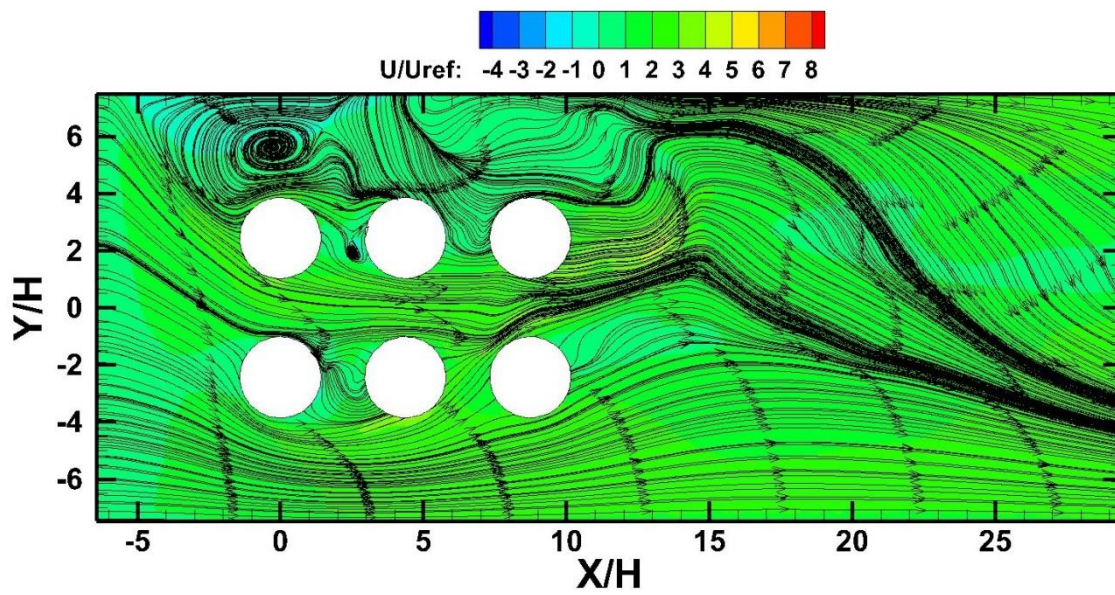
Σχήμα 6-5 Κατακόρυφο ισοϋψής γράφημα ροϊκών γραμμών στο επίπεδο $Y/H=2,43$

6.2 Οριζόντιο ισοϋψής γραφήματα πεδίου ταχύτητας

Στο (Σχήμα 6-6) διακρίνουμε το οριζόντιο ισοϋψής γράφημα που απεικονίζεται το πεδίο ταχύτητας για το επίπεδο $Z/H=1$ δηλαδή στο ύψος των δεξαμενών. Φαίνεται ότι ο ρύπος μπορεί να ακολουθήσει τη πορεία του ανέμου και να μεταφερθούν τα προϊόντα της καύσης καθώς και το πλούμιο προς τη τρίτη άνω δεξαμενή και να παρασυρθεί μέχρι το πέρας του υπολογιστικού χωρίου λαμβάνοντας μικρότερες τιμές. Στη συνέχεια στο (Σχήμα 6-7) παρατηρούμε το ροϊκό πεδίο ενός ισοϋψούς γραφήματος. Κοντά στη πρώτη δεξαμενή δημιουργείται μια μεγάλη ανακυκλοφορία που έχει σαν αποτέλεσμα να περιορίζει την εξάπλωση του ρύπου προς αυτή τη κατεύθυνση. Τέλος πίσω από τις δεξαμενές που βρίσκονται στα $Y/H=4H$ οριοθετούν τον διασκορπισμό των ρυπαντών σε σχέση με αυτή της πορείας από τη πρώτη στη τρίτη δεξαμενή.



Σχήμα 6-6 Οριζόντιο ισοϋψής γράφημα πεδίου ταχύτητας στο επίπεδο $Z/H=1$

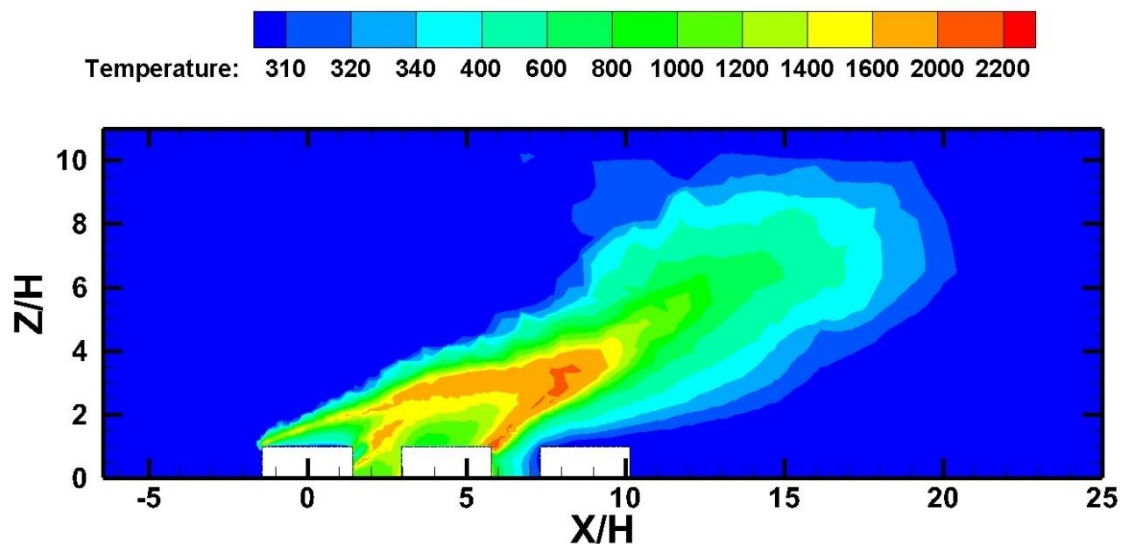


Σχήμα 6-7 Οριζόντιο ισοϋψής γράφημα ροϊκών γραμμών στο επίπεδο $Z/H=1$

6.3 Κατακόρυφο Ισοϋψής Γράφημα Θερμοκρασιακού Πεδίου

Στο (Σχήμα 6-8) παρατηρούμε το κατακόρυφο ισοϋψής γράφημα της κατανομής του θερμοκρασιακού πεδίου του καπνού για το επίπεδο $Y/H=-2,43$ που αναφέρεται στο επίπεδο που εμφανίζεται η λίμνη φωτιάς στην οροφή της δεξαμενής.

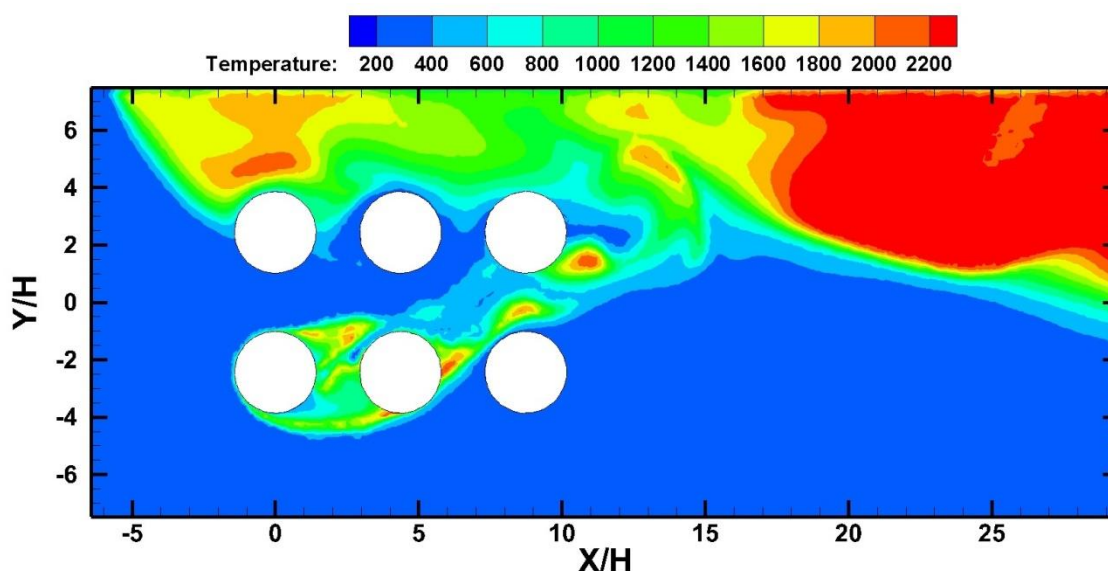
Η θερμοκρασία του καπνού στην επιφάνεια της δεξαμενής έχει τιμές 400 K, ενώ καθώς απομακρυνόμαστε η κατανομή της θερμοκρασίας ακολουθεί την κατεύθυνση του ανέμου. Η θερμοκρασία του καπνού φτάνει τους 225 K° στα $X/H= 20H$ και $Z/H=6H$ μακριά από την δεξαμενή που εμφανίζεται η πυρκαγιά όπως φαίνεται στο επίπεδο $Y/H =-2,43$. Επίσης φαίνεται ότι η πρώτη δεξαμενή εμφανίζει υψηλή θερμοκρασία με αποτέλεσμα να επηρεάζει και τη δεύτερη κατά σειρά δεξαμενή καθώς αυξάνεται το ύψος μέχρι τα 4H δημιουργείται ένα υψηλό θερμοκρασιακό πεδίο. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της εμφάνισης υψηλών ταχυτήτων πάνω από το ύψος των δεξαμενών καθώς και στην ανοδική πορεία του θερμού απορρεύματος. Τέλος εξαιτίας του υψηλού θερμοκρασιακού πεδίου κοντά στη πρώτη και στη δεύτερη δεξαμενή η θερμοκρασία του καπνού είναι εντονότερη.



Σχήμα 6-8 Κατακόρυφο ισοϋψής γράφημα θερμοκρασιακού πεδίου K° για το επίπεδο $Y/H=-2,43$

6.4 Οριζόντια Ισοϋψής Γραφήματα Θερμοκρασιακού Πεδίου

Στο (Σχήμα 6-9) παρατηρούμε ένα οριζόντιο ισοϋψής γράφημα του θερμοκρασιακού πεδίου για το επίπεδο $Z/H=1$ στο ύψος των δεξαμενών. Αρχικά φαίνεται ότι έχουμε υψηλό θερμοκρασιακό πεδίο καπνού γύρω από τη πρώτη και από τη δεύτερη δεξαμενή κατευθυνόμενο πλάγια προς τη τρίτη άνω δεξαμενή. Εξαιτίας της ταχύτητας του ανέμου αυξάνεται η γωνία κλίσης της φλόγας καθώς και η οπισθέλκουσα βάση, ως εκ τούτου να εμφανίζονται υψηλές θερμοκρασίες και στις δεξαμενές που είναι απομακρισμένες από την καιόμενη δεξαμενή.

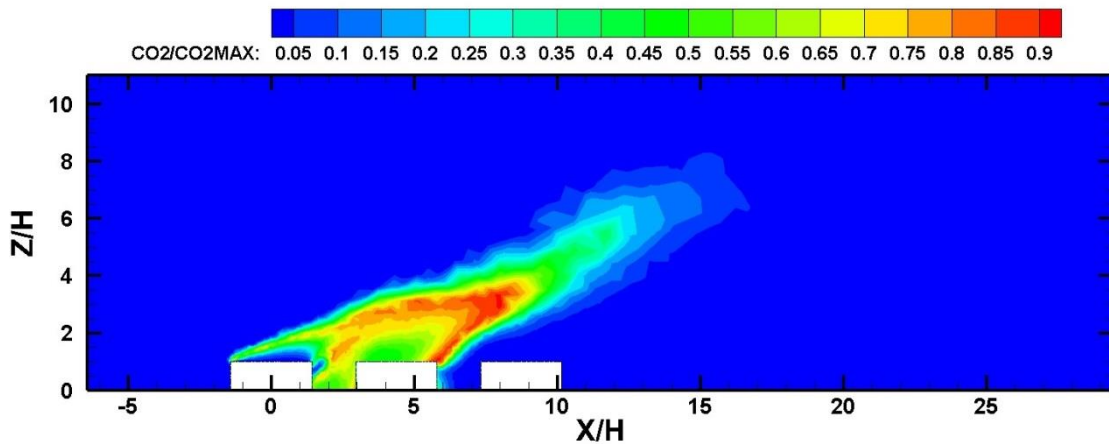


Σχήμα 6-9 Οριζόντιο ισοϋψής γράφημα θερμοκρασιακού πεδίου για το επίπεδο $Z/H=1$

6.5 Κατακόρυφο Ισοϋψής Γραφήμα Τοξικού Ρύπου

Στο (Σχήμα 6-10) παρατηρούμε ένα αδιάστατο ισοϋψής γράφημα της διασποράς του διοξειδίου του άνθρακα για το επίπεδο που εμφανίζεται το βιομηχανικό ατύχημα της φωτιάς λίμνης αργού πετρελαίου δηλαδή στο $Y/H = -2,43$. Αρχικά παρατηρούμε ότι ο ρύπος έχει μια ανοδική και πλάγια πορεία με αποτέλεσμα ένα τμήμα εκείνου να εγκλωβίζεται μεταξύ της πρώτης και της δεύτερης δεξαμενής. Αυτός ο εγκλωβισμός οφείλεται στη παρουσία χαμηλών ταχυτήτων. Επίσης φαίνεται ότι με τον εγκλωβισμό του, αυξάνεται η συγκέντρωσή του και καλύπτει

τη δεύτερη δεξαμενή. Τέλος παρατηρείται ότι η συγκέντρωσή του βρίσκεται στο ίδιο σημείο με αυτή του θερμοκρασιακού πεδίου.



Σχήμα 6-10 Κατακόρυφο ισουψής γράφημα διασποράς διοξειδίου του άνθρακα για το επίπεδο $Y/H=-2,43$

6.6 Ζώνες επικινδυνότητας

Όλο και πιο συχνά λαμβάνουν χώρα βιομηχανικά ατυχήματα φωτιάς σε δεξαμενές που διαφυλάσσουν εύφλεκτες χημικές ουσίες όπως το αργό πετρέλαιο με αποτέλεσμα να εκλύονται τοξικές ουσίες στον περιβάλλοντα χώρο προς πάσα κατεύθυνση καθώς και σε περιοχές που βρίσκονται μακριά από τη πηγή έκλυσης των ρυπογόνων ουσιών. Η έκλυση αυτών των ουσιών είναι επιβλαβής και θανατηφόρα για κάθε ζωντανό οργανισμό. Για τη διασφάλιση της υγείας, έχουν εκτιμηθεί οι επιπτώσεις μετά τη παρουσία τοξικών ρύπων στην ατμόσφαιρα λαμβάνοντας οριακές τιμές συγκέντρωσης του εκτειθέμενου πληθυσμού για 30 λεπτά. Σύμφωνα με τους (Assael 2010, Vasilopoulos, Mentzos et al. 2018) με την παραπάνω εκτίμηση έχουν οριστεί τρία είδη τοξικών ζωνών εκφρασμένα σε $[mg/m^3 \text{ αέρα}]$ όπως φαίνονται παρακάτω ανάλογα με την παρακινδυνευμένη κατάσταση που υφίστανται ο πληθυσμός.

- LC50 (Lethal Concentration 50)

Η συγκέντρωση μιας τοξικής ουσίας στον αέρα που με την εισπνοή αυτής υπάρχει πιθανότητα θνησιμότητας στο 50% του πλυθησμού για χρονική διάρκεια προσβολής ίση με 30 λεπτά.

➤ LC1(Lethal Concetration 1)

Η συγκέντρωση μιας τοξικής ουσίας στον αέρα που με την εισπνοή αυτής υπάρχει πιθανότητα θνησιμότητας στο 1% του πλυθησμού για χρονική διάρκεια προσβολής ίση με 30 λεπτά.

➤ IDLH(Immediately Dangerous to Life and Health)

Η μέγιστη συγκέντρωση μιας τοξικής ουσίας στον αέρα που μετά την εισπνοή αυτής μπορεί να οδηγήσει σε αναστρέψιμους τραυματισμούς σε μη ευπαθείς ομάδες για χρονική διάρκεια προσβολής ίση με 30 λεπτά. Μακριά από τη ζώνη IDLH νοείται ως ασφαλής περιοχή.

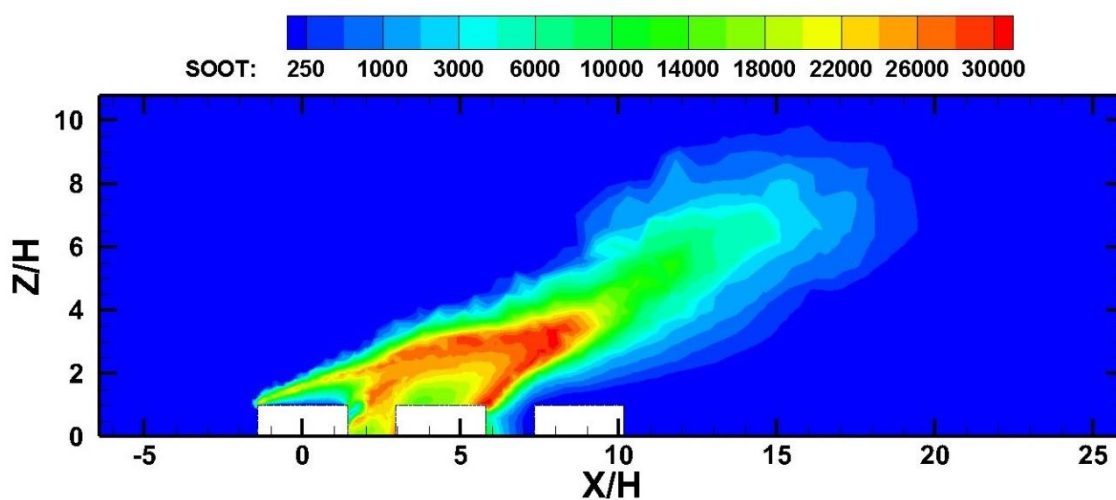
Ο υπολογισμός της προκύπτει από την εφαρμογή της παρακάτω εξίσωσης(6-3)

$$IDLH = 0,10 \cdot LC_{50} \quad (6-3)$$

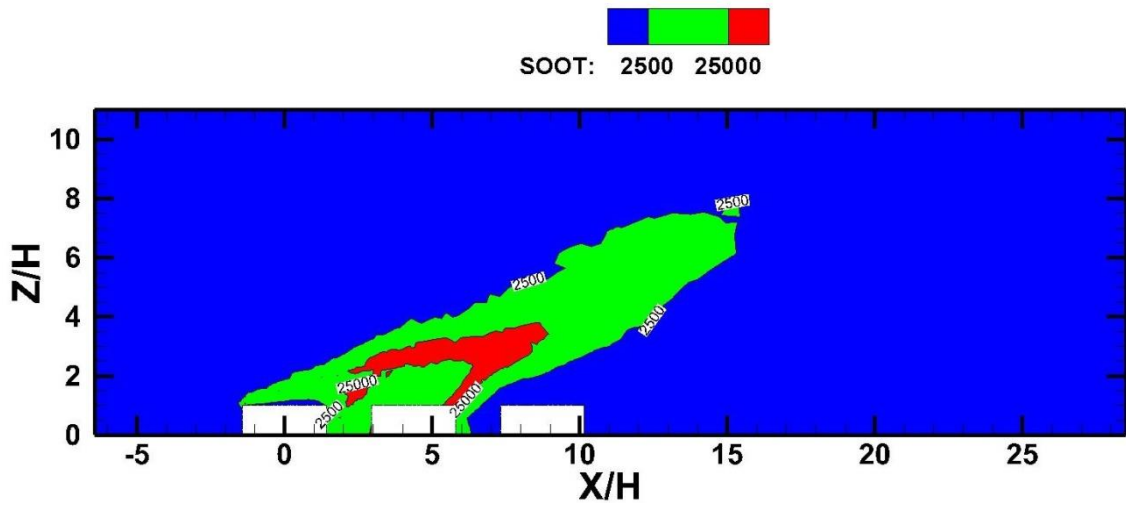
Το NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) έχει ορίσει για τις ζώνες επικινδυνότητας κάποια όρια ασφαλείας για τη περίπτωση ρύπου καπνού. Για τη ζώνη επικινδυνότητας $LC_1 = 25000 [mg/m^3]$ και για τη ζώνη επικινδυνότητας $IDLH = 2500 [mg/m^3]$. Τέλος η παραγωγή καπνού ορίζεται ως η καίόμενη ποσότητα καυσίμου (kg καπνού/kg καυσίμου) και σύμφωνα με τους (Markatos, Christolis et al. 2009) λαμβάνεται κατά μέσο όρο 17,5%.

Στο (Σχήμα 6-11) απεικονίζεται το κατακόρυφο ισοϋψής γράφημα της διασποράς του καπνού για το επίπεδο $Y/H = -2,43$. Αρχικά η πορεία του καπνού είναι ανοδική εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας καθώς και στη μείωση της πυκνότητας παρατηρώντας την εμφάνιση ανωστικών δυνάμεων. Συνακόλουθα παρατηρούμε τον διαχωρισμό σε ζώνες επικινδυνότητας με βάση την συγκέντρωση εμφάνισης καπνού. Η πρώτη ζώνη που εμπίπτει στη σοβαρότητα επιπτώσεων και δίδεται με τον δείκτη LC_1 ($25000 mg/m^3$) εμφανίζεται στο χείλος εκφυγής από την επιφάνεια της πρώτης δεξαμενής, πάνω από τη δεύτερη δεξαμενή και στο $Z/H = 4H$. Η τρίτη ζώνη εμπίπτει στις ήπιες επιπτώσεις και δίδεται με τον δείκτη IDLH ($2500 mg/m^3$). Εμφανίζεται κοντά στη τρίτη δεξαμενή καθώς και με την άνοδο

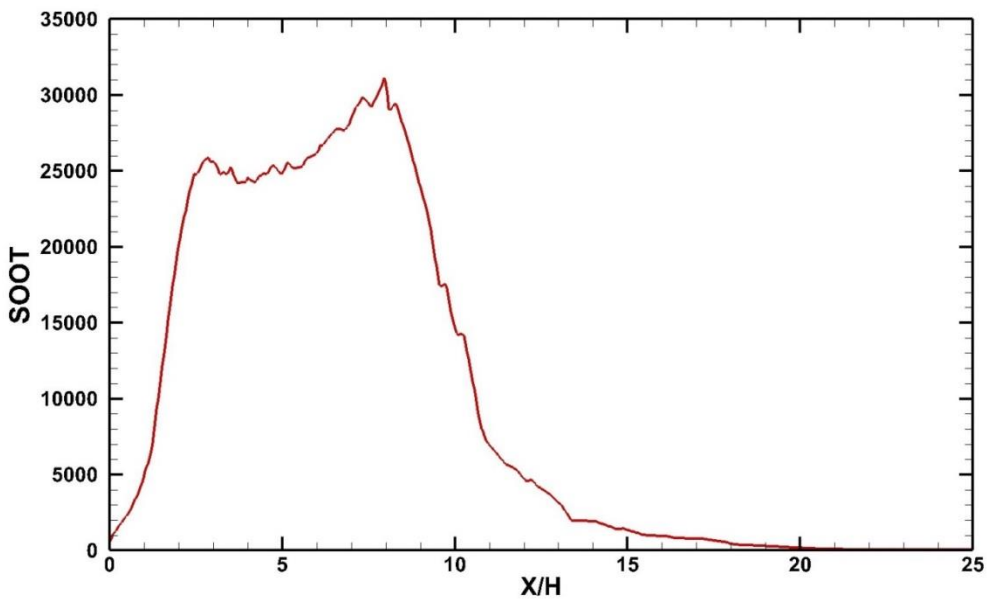
του καπνού να εμφανίζει μικρότερες συγκεντρώσεις. Επίσης στο (Σχήμα 6-12) παρατηρούμε το ισοϋψής γράφημα της εμφάνισης τοξικών ζωνών παρουσία καπνού για το επίπεδο $Y/H=-2,43$. Αρχικά παρατηρούμε κοντά στη πρώτη και τρίτη δεξαμενή υψηλές τιμές. Τέλος στο (Σχήμα 6-13) παρατηρούμε την εξέλιξη της πορείας του καπνού για το επίπεδο $Y/H=-2,43$. Αρχικά εμφανίζει χαμηλές συγκεντρώσεις καπνού. Όμως με το πέρασ του υπολογιστικού χωρίου, οι τιμές συγκεντρώσεων αυξάνονται και φτάνουν μέχρι τη μέγιστη τιμή περί της 30000 mg/m^3 για $X/H=9H$ ξεπερνώντας τον δείκτη LC_1 . Μετά από $X/H=9H$ φαίνεται η πτωτική του πορεία .



Σχήμα 6-11 Κατακόρυφο ισοϋψής γράφημα διασποράς καπνού για το επίπεδο $Y/H=-2,43$



Σχήμα 6-12 Κατακόρυφο ισουψής γράφημα σχηματισμού ζωνών επικινδυνότητας καπνού για το επίπεδο $Y/H=-2,43$



Σχήμα 6-13 Διάγραμμα εξέλιξης της πορείας του καπνού για το επίπεδο $Y/H=-2,43$

7 Συμπεράσματα

Με το πέρας της παρούσας διπλωματικής μελετήθηκε η ροή γύρω από μια συστοιχία, αποτελούμενη από έξι κυλινδρικές δεξαμενές αποθήκευσης υγρών καυσίμων στοιχισμένες ομοιόμορφα (staggered). Στη συνέχεια εκτιμήθηκαν τόσο οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις όσο και η επιρροή που υφίστανται οι γειτονικές κυλινδρικές δεξαμενές, με την εμφάνιση ενός ατυχήματος λίμνης φωτιάς επί της δεξαμενής. Η παρουσία του ατυχήματος λίμνης φωτιάς σε συστοιχία δεξαμενών καθώς και η ροή, προσομοιώθηκε με τη βοήθεια του ελεύθερου λογισμικού ανοικτού κώδικα υπολογιστικής ρευστομηχανικής OpenFOAM.

Στο Κεφάλαιο 5 αναλύθηκαν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης RANS για τη ροή γύρω από τη συστοιχία των κυλινδρικών δεξαμενών καθώς και η δημιουργία ενός αδόμητου υπολογιστικού πλέγματος με τη βοήθεια του ANSYS ICEM CFD. Στη συνέχεια ορίστηκαν οι αρχικές και οριακές συνθήκες της ταχύτητας και της τύρβης στη είσοδο του υπολογιστικού πεδίου. Αφού παρατηρήσαμε ότι η ροή είναι στατιστικά ανεξάρτητη και νοείται η φυσική σημασία της, επεξεργαστήκαμε τα δοθέντα αποτελέσματα. Η αποτίμηση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε με την αδιαστατοποίηση των μεγεθών καθώς και των αξόνων για τη παραγωγή των κατακόρυφων και οριζόντιων ισοϋψή γραφημάτων. Η παρουσίαση των ισοϋψείς γραφημάτων πραγματοποιήθηκε για το αδιάστατο πεδίο ταχύτητας για τα επίπεδα $Y/H=2,43$, $Y/H=0$, $Y/H=-2,43$, $Z/H=0,25$, $Z/H=0,5$ και $Z/H=0,75$ καθώς αναλύθηκαν τυχόν ανακυκλοφορίες που προέκυψαν. Επίσης μελετήθηκαν, τα προφίλ κατανομής των ταχυτήτων στο ύψος κάθε δεξαμενής και τα προφίλ ταχυτήτων σε ενδιάμεσες θέσεις. Τα προφίλ της ταχύτητας διαπιστώθηκε ότι ακολουθούν ένα ατμοσφαιρικό προφίλ καθώς από τα $2H$ και μετά είναι ίδια. Στα κατακόρυφα ισοϋψείς γραφήματα για το πεδίο της ταχύτητας παρατηρήθηκε η εμφάνιση ανάντη της πρώτης δεξαμενής μια δίνη πετάλου αλόγου. Ανάμεσα στη δεύτερη και τρίτη δεξαμενή παρατηρήθηκε η εμφάνιση μίας ανακυκλοφορίας κοντά στο ύψος μίας δεξαμενής. Ύστερα κατά τον απόρροο παρατηρήθηκε η εμφάνιση μίας ροής πηγής. Στο ύψος της πρώτης δεξαμενής ($1H$), διαπιστώθηκε η εμφάνιση μίας ανακυκλοφορίας εξαιτίας της αποκόλλησης που υπέστη το οριακό στρώμα. Μεταξύ της πρώτης και της

δεύτερης δεξαμενής παρατηρήθηκε η εμφάνιση μιας θολωτής δίνης εξαιτίας της ασυμπίεστότητας και του εγκλωβισμού της καθώς και στο τοίχωμα της δεύτερης δεξαμενής η παρουσία δύο συμμετρικών ανακυκλοφοριών. Συνακόλουθα για τα οριζόντια ισοϋψείς γραφήματα παρατηρήθηκε ότι με τη καθ' ύψος μεταβολή των επιπέδων μειώνονται οι ανακυκλοφορίες. Ενώ για τα επίπεδα $Z/H=0,25$ καθώς και $Z/H=0,5$ διαπιστώθηκε η δημιουργία συμμετρικών ανακυκλοφοριών κατάντη των πρώτων και δεύτερων κατά σειρά δεξαμενών. Η μελέτη του πεδίου πιέσεων μελετήθηκε για τα δύο οριζόντια επίπεδα καθώς και για τα τρία κατακόρυφα όπως αυτά του πεδίου της ταχύτητας. Στα οριζόντια ισοϋψείς γραφήματα παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση των επιπέδων οι πιέσεις ανάντη και κατάντη των δεύτερων και τρίτων κατά σειρά δεξαμενών αρχίζουν να εκλείπουν. Όμως και στα τρία επίπεδα ανάντη από τη πρώτη δεξαμενή εμφανίζεται σταθερά υψηλή πίεση. Τέλος για την πληρέστερη απεικόνιση της ροής καθώς και των φαινομένων που εμφανίζονται γύρω από μία συστοιχία δεξαμενών δημιουργήθηκε ένα τρισδιάστατο πεδίο ροής.

Στο Κεφάλαιο 6 προσομοιώθηκε σε πραγματικές διαστάσεις το ατύχημα της λίμνης φωτιάς με τη βοήθεια του ελεύθερου λογισμικού υπολογιστικής ρευστομηχανικής OpenFOAM και συγκεκριμένα με τον επιλύτη fireFOAM χρησιμοποιώντας ένα προσομοιωτή URANS με ένα μοντέλο $k - \epsilon$. Πραγματοποιήθηκε αποτίμηση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων, δημιουργώντας οριζόντια και κατακόρυφα αδιάστατα ισοϋψείς γραφήματα για τα επίπεδα $Y/H=2,43$, $Y/H=-2,43$ και $Z/H=1$ για την απεικόνιση του πεδίου ταχύτητας διασποράς των αέριων ρυπαντών, του θερμοκρασιακού πεδίου του πλουμίου καθώς και τις ζώνες επικινδυνότητας. Στα κατακόρυφα ισοϋψείς γραφήματα το πεδίο ταχύτητας καθώς και το ροϊκό πεδίο παρατηρήθηκε ότι οι ταχύτητες πάνω από (1H) των δεξαμενών παραμένουν αρκετά υψηλές. Διαπιστώθηκε ότι οι ρυπαντές ακολουθούν τη διεύθυνση του ανέμου κατευθυνόμενοι προς το έδαφος. Παρατηρήθηκε ότι μέχρι το ύψος των δεξαμενών επικράτησαν χαμηλότερες ταχύτητες. Στη συνέχεια με την οπτικοποίηση της ροής διαπιστώθηκε η εμφάνιση της πεταλοειδούς δίνης στο ανάντη τμήμα της πρώτης δεξαμενής και συγκεκριμένα στο κάτω μέρος εξίσου όπως παρατηρήθηκε και στη ροή γύρω από τη συστοιχία των δεξαμενών για το ίδιο επίπεδο. Ανάμεσα στη πρώτη και στη

δεύτερη δεξαμενή διαπιστώθηκε ότι εκβάλλει μία ροή που προήλθε από το πίσω μέρος της πρώτης δεξαμενής και στη πορεία εισήλθε στη κύρια ροή. Μεταξύ της δεύτερης και τρίτης δεξαμενής παρατηρήθηκε ότι η ταχύτητα έχει ίδιο μέτρο αλλά ήταν αντίθετη από την υπόλοιπη ροή. Έπειτα κατόπιν της τρίτης δεξαμενής, παρατηρήθηκε η δημιουργία από το ύψος μίας δεξαμενής με κατεύθυνση προς το έδαφος μια ροή πηγής. Το ροϊκό πεδίο που αναπτύχθηκε έδειξε ανάντη από τη πρώτη δεξαμενή και κοντά στο τοίχωμα μια πεταλοειδή δίνη. Στη συνέχεια πάνω από τη δεύτερη δεξαμενή σχηματίστηκε μία μεγάλη δίνη που συμπίεσε το ροϊκό πεδίο, ενώ το οριακό στρώμα οριοθετήθηκε. Το οριζόντιο ισοϋψής γράφημα δημιουργήθηκε για $Z/H=1$ κοντά στο ύψος της δεξαμενής καθώς διαπιστώθηκε ότι ο ρύπος ακολούθησε τη πορεία του ανέμου με αποτέλεσμα να μεταφερθούν τα προϊόντα της καύσης καθώς και το πλούμιο προς τη τρίτη άνω δεξαμενή και παρασύρθηκε μέχρι το πέρας του υπολογιστικού χωρίου λαμβάνοντας μικρότερες τιμές. Παρατηρήθηκε ότι κοντά στη πρώτη δεξαμενή δημιουργήθηκε μια μεγάλη ανακυκλοφορία που έχει σαν αποτέλεσμα να περιορίζει την εξάπλωση του ρύπου προς αυτή τη κατεύθυνση. Πίσω από τις δεξαμενές που βρίσκονταν στα $Y/H=4H$ οριοθέτησαν τον διασκορπισμό των ρυπαντών σε σχέση με αυτή της πορείας από τη πρώτη στη τρίτη δεξαμενή.

Το θερμοκρασιακό πεδίο του καπνού εμφάνισε στην επιφάνεια της δεξαμενής τιμές 400 K, ενώ όσο απομακρυνόμασταν η κατανομή της θερμοκρασίας ακολούθησε την κατεύθυνση του ανέμου. Η εμφάνιση της λίμνης φωτιάς επηρεάζει τις υπόλοιπες δεξαμενές και περισσότερο τη δεύτερη δεξαμενή. Από το ύψος μέχρι τα $4H$ δημιουργήθηκε ένα υψηλό θερμοκρασιακό πεδίο εξαιτίας της εμφάνισης υψηλών ταχυτήτων πάνω από το ύψος των δεξαμενών καθώς και στην ανοδική πορεία του θερμού απορρεύματος. Κατά το οριζόντιο ισοϋψής διαπιστώθηκε υψηλό θερμοκρασιακό πεδίο καπνού γύρω από τη πρώτη και από τη δεύτερη δεξαμενή κατευθυνόμενο πλάγια προς τη τρίτη άνω δεξαμενή. Από τη διεξαγωγή των ορίων επικινδυνότητας διαπιστώθηκαν οι περιοχές παρουσίας καπνού που είναι επιβλαβείς για την ανθρώπινη υγεία.

8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ahmadi, O., Mortazavi, S.B., Pasdarshahri, H. Mohabadi, H, A (2019). "Consequence analysis of large-scale pool fire in oil storage terminal based on computational fluid dynamic (CFD)." Process Safety and Environmental Protection **123**: 379-389.
- 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., & Kakosimos, K.E. (2010). Fires, Explosions, and Toxic Gas Dispersions: Effects Calculation and Risk Analysis USA, CRC.
- Babrauskas, V. (1983). "Estimating large pool fire burning rates." Fire Technology **19**(4): 251-261.
- Baum, H. R., Hamins, A. & McGrattan, K.B. (2000). "Thermal Radiation from Large Pool Fires."
- Cengel, Y. A. and M. A. Boles (2015). Thermodynamics : An Engineering Approach.
- Chang, J. I. a. C.-C. L. (2006). "A study of storage tank accidents." Journal of Loss Prevention in the Process Industries **19**(1): 51-59.
- Ding, L., F. Khan, X. Guo and J. Ji (2021). "A novel approach to reduce fire-induced domino effect risk by leveraging loading/unloading demands in chemical industrial parks." Process Safety and Environmental Protection **146**: 610-619.
- 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.
- Fang, J., W. Huang, F. Huang, L. Fu and G. Zhang (2020). "Investigation of the Superposition Effect of Oil Vapor Leakage and Diffusion from External Floating-Roof Tanks Using CFD Numerical Simulations and Wind-Tunnel Experiments." Processes **8**(3).
- Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H., Carissimo, B (2007). "Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Environment : COST Action 732 Quality Assurance and Improvement of Microscale Meteorological Models."
- Frederich, O., J. Scouten, D. M. Luchtenburg and F. Thiele (2009). "Numerical Simulation and Analysis of the Flow Around a Wall-Mounted Finite Cylinder " Springer.
- Fröhlich, J. and W. Rodi (2004). "LES of the flow around a circular cylinder of finite height." International Journal of Heat and Fluid Flow **25**(3): 537-548.

Ghaderi, M., M. Ghodrati and J. J. Sharples (2020). "LES Simulation of Wind-Driven Wildfire Interaction with Idealized Structures in the Wildland-Urban Interface." Atmosphere **12**(1).

Ghasemi, A. M. and F. Nourai (2017). "A framework for minimizing domino effect through optimum spacing of storage tanks to serve in land use planning risk assessments." Safety Science **97**: 20-26.

Hamins, A., S. J. Fischer, T. Kashiwagi, M. E. Klassen and P. J. Gore (1994). "Heat feedback to the fuel surface in pool fires " Combustion Science and Technology

Hu, L. (2017). "A review of physics and correlations of pool fire behaviour in wind and future challenges." Fire Safety Journal **91**: 41-55.

Hu, L., X. Zhang, X. Zhang and C. Kuang (2016). "Flame base drag of pool fires with different side wall height in cross flows: A laboratory-scale experimental study and a new correlation." Fuel **182**: 857-863.

Jones, S. D. J. and P. R. Pujad (2006). Handbook of Petroleum Processing.

Lauret , P., Heymes , F ., Aprin , L., Johannet , Anne., Slangen , P (2015). "2D Modeling of Turbulent Flow around a Cylindrical Storage Tank by Artificial Neural Networks."

Luketa , A. (2022). "Model Evaluation Protocol for Fire Models Involving Fuels at Liquefied Natural Gas Facilities."

Macdonald, P. A., Kwok, K.C.S. & Holmes, J.D. (1988). "Wind loads on circular storage bins, silos and tanks: Point pressure measurements on isolated structures." Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.

Markatos, N. C., M. Christolis and C. Argyropoulos (2009). "Mathematical modelling of toxic pollutants dispersion from large tank fires and assessment of acute effects for fire fighters." International Journal of Heat and Mass Transfer **52**: 4021-4030.

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.

Nivolianitou, Z., C. Argyropoulos, M. Christolis and N. C. Markatos (2012). "A Methodology for the Hazard Assessment in large Hydrocarbon Fuel Tanks." Chemical Engineering Transactions **vol.26**: 171-176.

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): 239-275.

Rew, P. J., W. G. Hulbert and D. M. Deaves (1997). "Modelling of Thermal Radiation From External Hydrocarbon Pool Fires." Process Safety and Environmental Protection **75**(2): 81-89.

Rodante, T. V. (2005). "Investigation of a naphtha storage tank fire." Process Safety Progress **24**(2): 98-107.

Sadare, O., F. Obazu and M. Daramola (2017). "Biodesulfurization of Petroleum Distillates—Current Status, Opportunities and Future Challenges." Environments **4**(4).

Sarvestani, K., O. Ahmadi, S. B. Mortazavi and H. A. Mahabadi (2021). "Development of a predictive accident model for dynamic risk assessment of propane storage tanks." Process Safety and Environmental Protection **148**: 1217-1232.

Sengupta, A., Gupta, A. K. and Mishra, I. M. (2011). "Engineering layout of fuel tanks in a tank farm." Journal of Loss Prevention in the Process Industries **24**(5): 568-574.

Steinhaus, T., S. Welch, R. Carvel and J. 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.

Sun, X., Li, W., Huang, Q., Zhang, J., Sun, C. (2020). "Large eddy simulations of wind loads on an external floating-roof tank." Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics **14**(1): 422-435.

Tauseef, S. M., T. Abbasi, V. Pompapathi and S. A. Abbasi (2018). "Case studies of 28 major accidents of fires/explosions in storage tank farms in the backdrop of available codes/standards/models for safely configuring such tank farms." Process Safety and Environmental Protection **120**: 331-338.

Vasilopoulos, K., M. Mentzos, I. 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).

Versteeg, H. K. a. W. M. (2007). An Introduction to Computational Fluid Dynamics , The Finite Volume Method Pearson education.

Zhang, M., Z. Dou, L. Liu, J. Jiang, A. Mebarki and L. Ni (2017). "Study of optimal layout based on integrated probabilistic framework (IPF): Case of a crude oil tank farm." Journal of Loss Prevention in the Process Industries **48**: 305-311.

Zheng, B. a. G.-h. C. (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**(1).

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

±

Αργυρόπουλος, Δ. Χ. (2006). ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΤΟΞΙΚΩΝ ΡΥΠΩΝ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΑΠΟ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΣΕ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΟΔΗΓΙΑΣ SEVESO II, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αχίλιας, Σ. Δ., Ελευθεριάδης and Ν. Ι. Νικολαΐδης (2015). Βιομηχανική Οργανική Χημεία.

Γεντεκάκης, Ι. (2010). Ατμοσφαιρική Ρύπανση : επιπτώσεις ,έλεγχος &εναλλακτικές τεχνολογίες.

Γκολέμι, Α. (2022). Εκτίμηση επιπτώσεων στο περιβάλλον από πυρκαγιά υγρών καυσίμων σε δεξαμενή αποθήκευσης, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής.

Μπάρμπας, Φ. (2013). Ανάπτυξη μεθοδολογίας για την αξιολόγηση της δυνατότητας περιορισμού της ατμοσφαιρικής ρύπανσης με χρήση φωτοκαταλυτικών επιστρώσεων, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ντεμίρη, Χ. Σ. (2009). Σχεδιασμός και Ανάπτυξη Συστημάτων Εκτίμησης Βιομηχανικού Κινδύνου σε Εγκαταστάσεις Διυλιστηρίων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Τριανταφύλλου, Α. (2017). Αέρια Ρύπανση. Κοζάνη, Θαλής.