



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΚΑΙ ΛΙΠΑΝΤΙΚΩΝ

ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΣΕ ΜΕΓΑΛΕΣ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΥΓΡΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΦΡΑΓΚΟΥ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Ε. ΛΟΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2017



ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	xv
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	xvii
ABSTRACT.....	xix
1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ-ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΣΤΕΡΕΩΝ, ΥΓΡΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ	1
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ	2
1.2.1 ΦΛΟΓΕΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΑΝΕΜΙΓΜΕΝΕΣ ΦΛΟΓΕΣ	4
1.2.2 ΕΙΔΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ.....	6
1.2.3 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΤΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ.....	7
1.3 ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ.....	8
1.3.1 ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΞΥΛΩΝ	8
1.3.2 ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΥΦΑΣΜΑΤΩΝ	9
1.3.3 ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ	11
1.3.4 ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ	12
1.3.5 ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΣΚΟΝΗΣ	14
1.4 ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΥΓΡΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ	15
1.4.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΥΦΛΕΚΤΩΝ ΥΓΡΩΝ.....	16
1.4.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΝΑΦΛΕΞΙΜΩΝ ΥΓΡΩΝ	17
1.5 ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΑΕΡΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ.....	18
1.5.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΥΦΛΕΚΤΩΝ ΑΕΡΙΩΝ	20
1.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	24
2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ-ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΣΕ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΥΓΡΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ	25
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	25
2.2 ΤΑ ΕΙΔΗ ΤΩΝ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ.....	26
2.3 ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ ΣΕ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ.....	28
2.4 ΣΥΝΗΘΕΣΤΕΡΑ ΠΕΡΙΣΤΑΤΙΚΑ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ ΣΕ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ	33
2.5 ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΚΑΥΣΗΣ	36
2.5.1 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΤΗΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ.....	36
2.5.2 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΠΛΑΓΙΟΥ ΑΝΕΜΟΥ.....	42
2.5.3 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ	44
2.5.4 ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΚΑΥΣΗΣ ΣΕ ΜΙΓΜΑΤΑ ΚΑΥΣΙΜΩΝ.....	47
2.5.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΑΥΣΗΣ.....	49
2.6 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΣΤΙΣ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ.....	50



2.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	51
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	53
3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ-ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΑΠΟ ΦΩΤΙΕΣ.....	56
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	56
3.2 ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΑΠΟ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΥΓΡΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ	58
3.3 ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΑΠΟ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΣΤΕΡΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ	74
3.4 ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΑΠΟ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΑΕΡΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ	80
3.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ	84
3.6 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ	87
3.7 ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ	89
3.8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	96
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	98
4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ-ΤΟ ΜΗΚΟΣ ΚΑΙ ΤΟ ΥΨΟΣ ΤΗΣ ΦΛΟΓΑΣ	102
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	102
4.2 ΤΟ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΦΛΟΓΑΣ	104
4.2.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΠΛΕΥΡΙΚΟΥ ΑΝΕΜΟΥ	104
4.2.2 ΑΠΟΥΣΙΑ ΠΛΕΥΡΙΚΟΥ ΑΝΕΜΟΥ	114
4.3 ΤΟ ΥΨΟΣ ΤΗΣ ΦΛΟΓΑΣ	115
4.3.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΠΛΕΥΡΙΚΟΥ ΑΝΕΜΟΥ	116
4.3.2 ΑΠΟΥΣΙΑ ΠΛΕΥΡΙΚΟΥ ΑΝΕΜΟΥ	120
4.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	122
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	125
5. ΚΕΦΑΛΑΙΟ-Η ΓΩΝΙΑ ΚΛΙΣΗΣ ΤΗΣ ΦΛΟΓΑΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΠΛΕΥΡΙΚΟΥ ΑΝΕΜΟΥ	127
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	127
5.2 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΚΛΙΣΗΣ ΤΗΣ ΦΛΟΓΑΣ	129
5.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΡΙΘΜΩΝ RI ΚΑΙ FR.....	133
5.4 ΕΡΕΥΝΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΓΩΝΙΑ ΚΛΙΣΗΣ ΤΗΣ ΦΛΟΓΑΣ.....	135
5.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	150
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	152
6. ΚΕΦΑΛΑΙΟ-ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΠΝΟΥ ΣΕ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΥΓΡΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ	154
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	154
6.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΠΝΟΥ ΣΕ ΜΕΓΑΛΕΣ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ	155
6.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ ΣΕ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ	157
6.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΙΘΑΛΗΣ	160
6.4.1 ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ / ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΗΣ ΑΙΘΑΛΗΣ	160



6.4.2 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ ΣΕ ΦΛΟΓΕΣ	166
6.5 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΠΝΟΥ ΑΠΟ ΥΓΡΑ ΚΑΥΣΙΜΑ.....	178
6.5.1 Η ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΚΑΠΝΟΥ	179
6.5.2 ΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΤΗΣ ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ ΣΦΑΙΡΑΣ ΤΗΣ ΑΙΘΑΛΗΣ	185
6.5.3 Η ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΑΙΘΑΛΗΣ.....	190
6.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	200
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	202
7. ΚΕΦΑΛΑΙΟ-ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΠΡΟΣΚΕΙΜΕΝΩΝ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ.....	205
7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	205
7.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΨΥΞΗΣ	206
7.2.1 ΤΕΧΝΙΚΗ WATER CURTAIN	209
7.2.2 ΤΕΧΝΙΚΗ WATER FILM	213
7.2.3 ΤΕΧΝΙΚΗ WATER SPRAY	216
7.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ	219
7.4 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΕ ΝΕΡΟ ΨΥΞΗΣ	223
7.5 ΑΝΑΦΕΡΟΜΕΝΑ ΠΡΟΤΥΠΑ	239
7.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	240
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	244
8. ΚΕΦΑΛΑΙΟ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	246
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	249
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	260
ΕΙΚΟΝΕΣ	
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ	
ΠΙΝΑΚΕΣ	





ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1.1 Το τρίγωνο της καύσης [3].	2
Εικόνα 1.2 Φλόγες υδρογόνου και προπανίου στο φως της ημέρας [6].	22
Εικόνα 2.1 Πυρκαγιά σε όλη την επιφάνεια μίας δεξαμενής αποθήκευσης (tank fire) που βρίσκεται σε μία έκταση αποθήκευσης πετρελαίου [10].	25
Εικόνα 3.1 Σχηματική απεικόνιση μίας πυρκαγιάς μεγάλης έκτασης υγρού καυσίμου [26].	57
Εικόνα 3.2 Σχηματική αναπαράσταση των μοντέλων θερμικής ακτινοβολίας [26]. ..	57
Εικόνα 3.3 Φωτογραφία από μία πυρκαγιά σε τετράγωνη δεξαμενή 15 m που περιέχει πετρέλαιο με νερό [26].	63
Εικόνα 3.4 Γεωμετρική διαμόρφωση για τον υπολογισμό των συντελεστών ορατότητας για κατακόρυφες κυκλικές και κεκλιμένες κυλινδρικές πηγές [16].	69
Εικόνα 4.1 Διαφορά του ύψους της φλόγας (flame height) από το μήκος της φλόγας (flame length) [52].	102
Εικόνα 4.2 Μεταβολή του σχήματος της φλόγας παρουσία πλευρικού ανέμου [55].	104
Εικόνα 4.3 Η πειραματική διάταξη των F. Tang, L. Li, Q. Wang και Q. Shi [55].	107
Εικόνα 4.4 Υπολογισμός του μέσου μήκους της φλόγας κατά την πειραματική μελέτη των F. Tang, L. Li, Q. Wang και Q. Shi [55].	109
Εικόνα 4.5 Πειραματική διάταξη για την μελέτη της πυρκαγιάς σύμφωνα με την μελέτη των Ru et al [59].	117
Εικόνα 5.1 Εικόνες από φλόγες που αναπτύσσονται υπό διαφορετικές τιμές της ταχύτητας του πλευρικού ανέμου [22].	127
Εικόνα 5.2 Εικόνες από φλόγες που αναπτύσσονται υπό διαφορετικές τιμές της ταχύτητας του πλευρικού ανέμου (συνέχεια) [22].	128
Εικόνα 5.3 Εικόνες από φλόγες που αναπτύσσονται υπό διαφορετικές τιμές της ταχύτητας του πλευρικού ανέμου (συνέχεια) [22].	128
Εικόνα 5.4 Εικόνες από φλόγες που αναπτύσσονται υπό διαφορετικές τιμές της ταχύτητας του πλευρικού ανέμου (συνέχεια) [22].	128
Εικόνα 5.5 Εικόνες από φλόγες που αναπτύσσονται υπό διαφορετικές τιμές της ταχύτητας του πλευρικού ανέμου (συνέχεια) [22].	129
Εικόνα 5.6 Εικόνες από φλόγες που αναπτύσσονται υπό διαφορετικές τιμές της ταχύτητας του πλευρικού ανέμου (συνέχεια) [22].	129
Εικόνα 5.7 Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης των Ping Jiang και Shou-xiang Lu [22]. Τα (a) και (b) αποτελούν την κάτοψη και το (c) αποτελεί την πλάγια όψη της πειραματικής διάταξης.	137
Εικόνα 5.8 Διαδικασία δυαδοποίησης (binarization process) σε φωτεινές φλόγες [22].	138



Εικόνα 5.9 Η εικόνα του ισοδιαλείποντος περιγράμματος (iso-intermittency contour) της φλόγας και της γωνίας κλίσης της φλόγας παρουσία της αντίστασης του αέρα κατά την πειραματική μελέτη των Ping Jiang και Shou-xiang Lu [22].....	139
Εικόνα 6.1 Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης των R. Dobashi et al [92].	167
Εικόνα 6.2 Μία σειρά εικόνων από το σύνολο των πλουμίων της πυρκαγιάς από την πειραματική μελέτη των των R. Dobashi et al [92]. Χρονικό διάστημα: 32 ms.....	168
Εικόνα 6.3 Μια σειρά των εικόνων που αντιπροσωπεύουν τη συμπεριφορά μίας φλόγας με σχήμα μανιταριού από την πειραματική μελέτη των R. Dobashi et al [92].	170
Εικόνα 6.4 Μία σειρά από εικόνες των ιχνηθετημένων διαδρομών από τα ιχνηθετημένα σωματίδια από την πειραματική μελέτη των R. Dobashi et al [92]. Χρονικό διάστημα: 16.7 ms, Χρόνος έκθεσης: 16.7 ms.	173
Εικόνα 6.5 Σύγκριση ανάμεσα στην ταχύτητα ροής του πλουμίου και στην ταχύτητα θερμοφόρησης σύμφωνα με την πειραματική μελέτη των R. Dobashi et al [92]...	177
Εικόνα 6.6 Σχηματικό διάγραμμα του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε για την δειγματοληψία του καπνού για μία πυρκαγιά σε δεξαμενή αργού πετρελαίου με διάμετρο 1m κατά την πειραματική μελέτη των G. W. Mulholland et al [94].....	179
Εικόνα 6.7 Οι TEM φωτογραφίες για τον καπνό που συλλέχθηκαν από τις πυρκαγιές στην πειραματική λεκάνη διαμέτρου 1 m (αριστερά εικόνα) και στην πειραματική λεκάνη διαστάσεων 2.7x2.7 m (δεξιά) κατά την πειραματική μελέτη των G. W. Mulholland et al [94].....	186
Εικόνα 6.8 Εικόνες από στοιβαγμένα επίπεδα OH που προκαλούνται από φθορισμό λέιζερ (στην εξωτερική άκρη της φλόγας) και από ελαστική σκέδαση αιθάλης (εντός του στρώματος OH) από την φλόγα 1 κατά την πειραματική μελέτη των των C. R. Shaddix et al [105].	192
Εικόνα 6.9 Φωτογραφία της φλόγας 3 από μία πυρκαγιά σε δεξαμενή διαμέτρου 5 m που περιείχε JP-8 από τα Εθνικά Εργαστήρια Sandias' Lurance Canyon Burn Site [106], που εδρεύουν στο Μεξικό. Η φωτογραφία αποτελεί ένα κοντινό πλάνο της δομής της φλόγας στην βάση της πυρκαγιάς της δεξαμενής.	193
Εικόνα 6.10 Η αριστερά εικόνα παρουσιάζει το κυκλικό τμήμα της αιθάλης από την HRTEM. Η δεξιά εικόνα παρουσιάζει τις θέσεις των ατόμων άνθρακα. Οι εικόνες αυτές προέκυψαν από την πειραματική μελέτη των C. R. Shaddix et al [105].	194
Εικόνα 6.11 Εικόνες TEM σε πλέγματα αιθάλης που συλλέχθηκαν στα H=110 nm (αριστερά εικόνα) και στα H=210 nm (δεξιά εικόνα) από την φλόγα 1 κτλα την πειραματική μελέτη των των C. R. Shaddix et al [105]. Η μεγέθυνση είναι 50.000x.	195
Εικόνα 6.12 Σειρές από διαδοχικές εικόνες TEM (από πάνω προς τα κάτω) σε μεγέθυνση 70,000x, που δείχνουν την επίδραση μίας δέσμης ηλεκτρονίων υψηλής ισχύος τόσο στην επιφάνεια της αδρανούς αιθάλης όσο και στα πλέγματα TEM σε	



H=70 mm στην φλόγα 2. Η λήψη των εικόνων έγινε με χρονική διαφορά 30 s κατά την πειραματική μελέτη των C. R. Shaddix et al [105].	196
Εικόνα 6.13 Υψηλής ανάλυσης εικόνες TEM (μεγέθυνση 1,800,000x) από διαφορετικές θέσεις δειγματοληψίας και φλόγες κατά την πειραματική μελέτη των C. R. Shaddix et al [105].(a) φλόγα 1, σε H=50 mm, (b) φλόγα 1, σε H=110 mm, (c) φλόγα 1, σε H=210 mm, (d) φλόγα 2, σε ύψος μετά την φλόγα, (e) και (f) φλόγα 3.	198
Εικόνα 7.1 Γενική μορφή της πειραματικής διάταξης της ομάδας LASTFIRE [108].	207
Εικόνα 7.2 Εφαρμογή της τεχνικής water curtain για την ψύξη μίας δεξαμενής [108].	210
Εικόνα 7.3 Εφαρμογή της τεχνικής water film για την ψύξη μίας δεξαμενής [108].	213
Εικόνα 7.4 Εφαρμογή της τεχνικής water spray για την ψύξη μίας δεξαμενής [108].	216
Εικόνα 7.5 Η διάταξη των δεξαμενών που χρησιμοποιήθηκαν στην μελέτη των A. M. Ghasemi et al [107].	224
Εικόνα 7.6 Οι διαστάσεις της δεξαμενής αποθήκευσης που χρησιμοποιήθηκε στην μελέτη των A. M. Ghasemi et al [107].	224
Εικόνα 7.7 Διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό της ποσότητας του νερού ψύξης που απαιτείται σύμφωνα με την μελέτη των A. M. Ghasemi et al [107].	226
Εικόνα 7.8 Ακτινοβολία που λαμβάνεται από την προσκείμενη δεξαμενή, όπως θεωρήθηκε από την μελέτη των A. M. Ghasemi et al [107].	227

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Διάγραμμα 2.1 Η εξέλιξη της εμφάνισης των πυρκαγιών ανά είδος αναπτυσσόμενης πυρκαγιάς σε πυρκαγιές που αναπτύχθηκαν στις Η.Π.Α. [12]	28
Διάγραμμα 2.2 Ταχύτητες καύσης για πυρκαγιές διαφόρων υδρογονανθράκων [16].	36
Διάγραμμα 2.3 Ταχύτητες καύσης για πυρκαγιές που αναπτύσσονται σε δεξαμενές βενζίνης συναρτήσει της διαμέτρου της δεξαμενής με βάση τα δεδομένα της μελέτης του V. Babrauskas [21].	39
Διάγραμμα 2.4 Ταχύτητες καύσης για πυρκαγιές που αναπτύσσονται σε δεξαμενές LNG συναρτήσει της διαμέτρου της δεξαμενής με βάση τα δεδομένα της μελέτης του V. Babrauskas [21].	40



Διάγραμμα 2.5 Ταχύτητες καύσης για πυρκαγιές που αναπτύσσονται σε δεξαμενές αλκοολών συναρτήσει της διαμέτρου της δεξαμενής με βάση τα δεδομένα της μελέτης του V. Babrauskas [21].	40
Διάγραμμα 2.6 Ταχύτητα καύσης σε συνθήκες απουσίας ανέμου κατά την μελέτη των P. Jiang και S. Lu [22].	43
Διάγραμμα 2.7 Ταχύτητες καύσης υπό την επίδραση διαφορετικών ταχυτήτων πλάγιου ανέμου κατά την μελέτη των P. Jiang και S. Lu [22].	44
Διάγραμμα 2.8 Θεωρητικές επιδράσεις της πίεσης στις ταχύτητες καύσης υπό διαφορετικούς μηχανισμούς ανατροφοδότησης θερμότητας [23].	46
Διάγραμμα 2.9 Συσχέτιση ανάμεσα στην ταχύτητα καύσης της μάζας και στις θερμοχημικές ιδιότητες του καυσίμου για διάφορα καύσιμα σύμφωνα με την μελέτη των Grumer et al [24].	48
Διάγραμμα 3.1 Κλάσμα της ενέργειας που ακτινοβολείται στον περιβάλλοντα χώρο προς τη συνολική ταχύτητα απελευθέρωσης θερμότητας, χ_r , ως συνάρτηση της διαμέτρου της πυρκαγιάς D για το επτάνιο (*), το αργό πετρέλαιο (○) και την κηροζίνη (+). Η συμπαγής γραμμή είναι μία καμπύλη που περιγράφεται από την σχέση $\chi_r=0.35\exp(-\kappa D)$ όπου $\kappa=0.05$ (Εξίσωση (3.5)) [26].	61
Διάγραμμα 3.2 Η εκπεμπόμενη ισχύς ως συνάρτηση της διαμέτρου της πυρκαγιάς για πυρκαγιά σε δεξαμενή βενζίνης σύμφωνα με τα δεδομένα διαφόρων μελετών.	64
Διάγραμμα 3.3 Το ύψος της φλόγας ως συνάρτηση της διαμέτρου της πυρκαγιάς για πυρκαγιά σε δεξαμενή βενζίνης σύμφωνα με τα αποτελέσματα μελετών.	64
Διάγραμμα 3.4 Η ροή ενέργειας ακτινοβολίας, E_f^*H , ως συνάρτηση της διαμέτρου της πυρκαγιάς για πυρκαγιά σε δεξαμενή βενζίνης σύμφωνα με τα αποτελέσματα μελετών.	65
Διάγραμμα 3.5 Το ύψος της φωτεινής ζώνης της φλόγας για πυρκαγιά βενζίνης, όπου $\chi_{rmax}=0.35$, $q''_f=2,400 \text{ kW/m}^2$, $\kappa=0.05 \text{ m}^{-1}$, και $E_f=100 \text{ kW/m}^2$ (Εξίσωση (3.7)) με βάση την μελέτη των K. S. Mudan et al [33]. Η διακεκομμένη γραμμή στο διάγραμμα αντιπροσωπεύει το H_{max} [26].	67
Διάγραμμα 3.6 Οι μέγιστες τιμές του συντελεστή ορατότητας για έναν παρατηρητή που είναι τοποθετημένος στο επίπεδο του εδάφους για διάφορες τιμές του λόγου ύψος φλόγας προς την ακτίνα της φλόγας σύμφωνα με την μελέτη των K. S. Mudan and P. A. Croce [33].	71
Διάγραμμα 3.7 Οι μέγιστες τιμές του συντελεστή ορατότητας για έναν κατακόρυφο κυκλικό κύλινδρο και για ένα πλάγια τοποθετημένο κύλινδρο. Ο λόγος του ύψους της φλόγας προς την διάμετρο είναι τρία. Η γωνία κλίσης του κεκλιμένου κυλίνδρου είναι 45° . Το διάγραμμα αυτό προέκυψε από τα δεδομένα των μελετών των K. S. Mudan and P. A. Croce [33], Rein et al [34] και Raj και Kalelkar [35].	73
Διάγραμμα 3.8 Εκπεμπόμενη ισχύς συναρτήσει της αποτελεσματικής διαμέτρου της φλόγα με βάση τα δεδομένα των Hagglund and Persson [37].	76



Διάγραμμα 3.9 Η συσχέτιση της σχέσης υπολογισμού της εκπεμπόμενης ισχύος με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα από τα οποία προέκυψε.....	79
Διάγραμμα 3.10 Χρόνος που απαιτείται για την εμφάνιση πόνου που οφείλεται στην έκθεση στη θερμική ακτινοβολία. Πηγές δεδομένων: Buettner [44], Hardy et al [45], Stoll and Greene [46], Bigelow et al [47].....	93
Διάγραμμα 3.11 Χρόνος που απαιτείται για την εμφάνιση εγκαυμάτων από την θερμική ακτινοβολία. Πηγές δεδομένων: Stoll και Greene: οριακή εμφάνιση φυσαλίδων [46], Stoll και Greene: πλήρης εμφάνιση φυσαλίδων [46], Mehta et al: εγκαύματα δευτέρου βαθμού [48], Mixer: εκτεταμένα εγκαύματα δευτέρου βαθμού [49].	93
Διάγραμμα 3.12 Επίπεδα θνησιμότητας από την θερμική ακτινοβολία [16].....	95
Διάγραμμα 4.1 Η μεταβολή του μέσου μήκους της φλόγας συναρτήσει της ροής του πλαγίου ανέμου σύμφωνα με την πειραματική μελέτη των F. Tang, L. Li, Q. Wang και Q. Shi [55].....	111
Διάγραμμα 4.2 Το αδιάστατο μήκος της φλόγας (dimensionless length) ($L/D-L_{0.5}/D$) συναρτήσει του αριθμού Froude (u/gD) υπό την επίδραση διαφορετικών τιμών της ταχύτητας του ανέμου στο εύρος των 0.5-1.2 m/s, σύμφωνα με την πειραματική μελέτη των F. Tang, L. Li, Q. Wang και Q. Shi [55].....	113
Διάγραμμα 4.3 Η μεταβολή του αδιάστατου ύψους (dimensionless height) της φλόγας που αναπτύσσεται κοντά στο τοιχίο και της ελεύθερης φλόγας απουσία ανέμου σύμφωνα με την πειραματική μελέτη των F. Tang, L. Li, Q. Wang και Q. Shi [55].	115
Διάγραμμα 4.4 Δεδομένα για τον λόγο H_D/H_0 συναρτήσει της διαμέτρου της πειραματικής λεκάνης στην οποία ήταν τοποθετημένο το καύσιμο. Τα δεδομένα για την δημιουργία του παραπάνω διαγράμματος περιλαμβάνουν τα πειραματικά δεδομένα του πειράματος των L. H. Hu et al [60], R. Tu et al [61, 59] και τα αποτελέσματα της Εξίσωσης (4.15)	119
Διάγραμμα 4.5 Τα κλάσματα του ύψους της φλόγας (flame length) προς της διάμετρο της φλόγας συναρτήσει της αδιάσταστης ταχύτητας καύσης. Πυρκαγιές σε δεξαμενές (pool fires) LNG σε νερό [64]. Πυρκαγιές σε δεξαμενές (pool fires) LNG στο έδαφος [65]. Πυρκαγιές σε δεξαμενές (pool fires) LNG στο έδαφος [40]. Πυρκαγιές βενζίνης στο έδαφος [66]. Πυρκαγιές κηροζίνης στο έδαφος [67]. Πυρκαγιές βενζίνης, κηροζίνης και πετρελαίου [14]. Πυρκαγιές LNG, LPG και κηροζίνης στο έδαφος [68]. Πυρκαγιές ακετόνης [69]. Επιπλέον, στο διάγραμμα αυτό απεικονίζονται οι συσχετίσεις από τις εξισώσεις των Stewart (4.17) [63], Thomas (4.11) [58] και Moorhouse (4.12) [40].	121
Διάγραμμα 5.1 Πειραματικά αποτελέσματα της μελέτης των Ping Jiang και Shou-xiang Lu [22] για τις γωνίες της φλόγας συναρτήσει των διαφορετικών ταχυτήτων του πλαγίου ανέμου.....	141



Διάγραμμα 5.2 Πειραματικά αποτελέσματα της μελέτης των Ping Jiang και Shou-xiang Lu [22] για τις γωνίες της φλόγας συναρτήσει του αριθμού Fr.....	141
Διάγραμμα 5.3 Πειραματικά αποτελέσματα της μελέτης των Ping Jiang και Shou-xiang Lu [22] για τις γωνίες της φλόγας συναρτήσει του Ri^{-1}	142
Διάγραμμα 5.4 Διάγραμμα του λόγου $\tan\theta/\cos\theta$, του αριθμού Re και του αριθμού Fr που προέκυψαν από την μελέτη των Ping Jiang και Shou-xiang Lu [22].	144
Διάγραμμα 5.5 Γραφική παράσταση του λόγου $\tan\theta/\cos\theta$ συναρτήσει του $1/Ri$ [22].	146
Διάγραμμα 5.6 Γραφική παράσταση του λόγου $\tan\theta/\cos\theta$ συναρτήσει του αριθμού Fr [22].	146
Διάγραμμα 5.7 Γραφική παράσταση του $\sin\theta$ συναρτήσει του $1/Ri$ [22].	147
Διάγραμμα 5.8 Γραφική παράσταση του $\sin\theta$ συναρτήσει του αριθμού Fr [22]. ..	148
Διάγραμμα 5.9 Γραφική παράσταση του $\cos\theta$ συναρτήσει του u^* [22].	149
Διάγραμμα 6.1 Περιοδικά ίχνη των περιγραμμάτων της φλόγας και του καπνού από την πειραματική μελέτη των R. Dobashi et al [92].	171
Διάγραμμα 6.2 Διάγραμμα θέσης-χρόνου της φλόγας και του καπνού από την πειραματική μελέτη των R. Dobashi et al [92].	171
Διάγραμμα 6.3 Η επίδραση της διαμέτρου της πειραματικής λεκάνης στις αποδόσεις του καπνού κατά την καύση αργού πετρελαίου. Η μελέτη των G. W. Mulholland et al [94]. Η μελέτη των W. Walton et al [96].	183
Διάγραμμα 6.4 Η κανονικοποιημένη κατανομή όγκου του καπνού από πυρκαγιές αργού πετρελαίου για πειραματική λεκάνη διαμέτρου 1 m, πειραματική λεκάνη διαστάσεων 2.7x2.7 m και πειραματική λεκάνη διαμέτρου 12 m σύμφωνα με την μελέτη των G. W. Mulholland et al [94].	188
Διάγραμμα 6.5 Η θερμοκρασία και ο χρόνος παραμονής κατά μήκος της κεντρικής γραμμής την φλόγας 1. Οι διακεκομμένες κάθετες γραμμές υποδεικνύουν τα ύψη στα οποία συλλέχθηκαν τα πλέγματα TEM κατά την πειραματική μελέτη των C. R. Shaddix et al [105].	197
Διάγραμμα 7.1 Σύγκριση ανάμεσα στην θερμοκρασία του τοιχίου μία άδειας δεξαμενής και στην θερμοκρασία του τοιχίου μίας δεξαμενής που είναι γεμάτη με νερό κατά την πειραματική μελέτη της ομάδας LASTFIRE [108].	208
Διάγραμμα 7.2 Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας της προσκείμενης δεξαμενής που προστατεύεται με την τεχνική water curtain και βρίσκεται σε απόσταση 0.5D από την δεξαμενή που φλέγεται σύμφωνα με την πειραματική μελέτη της ομάδας LASTFIRE [108]. Δεξιά δίνονται τα θερμοστοιχεία της δεξαμενής που έχουν σημειωθεί με διαφορετικά χρώματα.	211
Διάγραμμα 7.3 Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας της προσκείμενης δεξαμενής που προστατεύεται με την τεχνική water curtain και βρίσκεται σε απόσταση 1D από την δεξαμενή που φλέγεται σύμφωνα με την πειραματική μελέτη της ομάδας LASTFIRE[



108]. Δεξιά δίνονται και τα θερμοστοιχεία της δεξαμενής που έχουν σημανθεί με διαφορετικά χρώματα.....	212
Διάγραμμα 7.4 Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας της προσκείμενης δεξαμενής που προστατεύεται με την τεχνική water curtain και βρίσκεται σε απόσταση 1.5D από την δεξαμενή που φλέγεται σύμφωνα με την πειραματική μελέτη της ομάδας LASTFIRE [108]. Δεξιά δίνονται και τα θερμοστοιχεία της δεξαμενής που έχουν σημανθεί με διαφορετικά χρώματα.....	212
Διάγραμμα 7.5 Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας της προσκείμενης δεξαμενής που προστατεύεται με την τεχνική water film και βρίσκεται σε απόσταση 0.5D από την δεξαμενή που φλέγεται σύμφωνα με την πειραματική μελέτη της ομάδας LASTFIRE[108]. Δεξιά δίνονται και τα θερμοστοιχεία της δεξαμενής που έχουν σημανθεί με διαφορετικά χρώματα.....	214
Διάγραμμα 7.6 Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας της προσκείμενης δεξαμενής που προστατεύεται με την τεχνική water film και βρίσκεται σε απόσταση 1D από την δεξαμενή που φλέγεται σύμφωνα με την πειραματική μελέτη της ομάδας LASTFIRE[108]. Δεξιά δίνονται και τα θερμοστοιχεία της δεξαμενής που έχουν σημανθεί με διαφορετικά χρώματα.....	215
Διάγραμμα 7.7 Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας της προσκείμενης δεξαμενής που προστατεύεται με την τεχνική water film και βρίσκεται σε απόσταση 1.5D από την δεξαμενή που φλέγεται σύμφωνα με την πειραματική μελέτη της ομάδας LASTFIRE[108]. Δεξιά δίνονται και τα θερμοστοιχεία της δεξαμενής που έχουν σημανθεί με διαφορετικά χρώματα.....	215
Διάγραμμα 7.8 Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας της προσκείμενης δεξαμενής που προστατεύεται με την τεχνική water spray και βρίσκεται σε απόσταση 0.5D από την δεξαμενή που φλέγεται σύμφωνα με την πειραματική μελέτη της ομάδας LASTFIRE [108]. Δεξιά δίνονται και τα θερμοστοιχεία της δεξαμενής που έχουν σημανθεί με διαφορετικά χρώματα.....	217
Διάγραμμα 7.9 Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας της προσκείμενης δεξαμενής που προστατεύεται με την τεχνική water spray και βρίσκεται σε απόσταση 1D από την δεξαμενή που φλέγεται σύμφωνα με την πειραματική μελέτη της ομάδας LASTFIRE [108]. Δεξιά δίνονται και τα θερμοστοιχεία της δεξαμενής που έχουν σημανθεί με διαφορετικά χρώματα.....	218
Διάγραμμα 7.10 Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας της προσκείμενης δεξαμενής που προστατεύεται με την τεχνική water spray και βρίσκεται σε απόσταση 1.5D από την δεξαμενή που φλέγεται σύμφωνα με την πειραματική μελέτη της ομάδας LASTFIRE [108]. Δεξιά δίνονται και τα θερμοστοιχεία της δεξαμενής που έχουν σημανθεί με διαφορετικά χρώματα.....	218
Διάγραμμα 7.11 Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας σε κατακόρυφη διεύθυνση για μία προσκείμενη δεξαμενή που προστατεύεται με την τεχνική water curtain σύμφωνα με την πειραματική μελέτη της ομάδας LASTFIRE[108].	220



Διάγραμμα 7.12 Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας σε κατακόρυφη διεύθυνση για μία προσκείμενη δεξαμενή που προστατεύεται με την τεχνική water film σύμφωνα με την πειραματική μελέτη της ομάδας LASTFIRE [108].	220
Διάγραμμα 7.13 Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας σε κατακόρυφη διεύθυνση για μία προσκείμενη δεξαμενή που προστατεύεται με την τεχνική water spray σύμφωνα με την πειραματική μελέτη της ομάδας LASTFIRE [108].....	221
Διάγραμμα 7.14 Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας σε κατακόρυφη διεύθυνση για μία άδεια προσκείμενη δεξαμενή που δεν διέθετε σύστημα ψύξης σύμφωνα με την πειραματική μελέτη της ομάδας LASTFIRE [108].	221
Διάγραμμα 7.15 Τιμές της σταθεράς απορρόφησης α_l συναρτήσει του μήκους κύματος λ . Το διάγραμμα αυτό χρησιμοποιήθηκε από την μελέτη των A. M. Ghasemi et al [107].	231
Διάγραμμα 7.16 Οι απαιτήσεις σε νερό ψύξης για την προσκείμενη δεξαμενή συναρτήσει του μεγέθους της φλεγόμενης δεξαμενής για προσκείμενες δεξαμενές διαφορετικών μεγεθών σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης των N. Jain et al [110].	238

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1.1 Τα ανώτερα και τα κατώτερα όρια ανάφλεξης στον αέρα [4].	5
Πίνακας 2.1 Δεδομένα για την λειτουργία της καύσης με βάση την ανάλυση του Hottel [17] και των Blinov και Khudiakov [18].	37
Πίνακας 3.1 Πειραματικά αποτελέσματα των Butler et al [38].	77
Πίνακας 3.2 Πειραματικά αποτελέσματα των Butler et al [38].	78
Πίνακας 3.3 Ταχύτητες καύσης για εύφλεκτα αέρια [41, 42].	83
Πίνακας 3.4 Οι συγκεντρώσεις των αερίων της ατμόσφαιρας [16].	89
Πίνακας 4.1 Πειραματικές συνθήκες του πειράματος των F. Tang, L. Li, Q. Wang και Q. Shi [55].	108
Πίνακας 4.2 Το σύνολο των πειραματικών αποτελεσμάτων των F. Tang, L. Li, Q. Wang και Q. Shi [55] κατά την μελέτη του μήκους της φλόγας με αύξηση της ταχύτητας του πλαγίου ανέμου.	110
Πίνακας 4.3 Σύγκριση πειραματικών δεδομένων του μήκους της φλόγας παρουσία ανέμου.	124
Πίνακας 5.1 Αποτελέσματα της μελέτης των Ping Jiang και Shou-xiang Lu [22] για την γωνία κλίσης της φλόγας υπό διάφορες τιμές της ταχύτητας του ανέμου και της διαμέτρου της πειραματικής λεκάνης όπου ήταν τοποθετημένο το καύσιμο.	140



Πίνακας 5.2 Αποτελέσματα της πειραματική μελέτης των Ping Jiang και Shou-xiang Lu [22] για τη γωνία κλίσης της φλόγας υπό διάφορες τιμές ταχυτήτων του πλευρικού ανέμου.	143
Πίνακας 5.3 Παράμετροι για την Εξίσωση (5.24) που προέκυψαν από διάφορες πειραματικές μελέτες [22].	145
Πίνακας 5.4 Παράμετροι για την Εξίσωση (5.28) που προέκυψαν από διάφορες πειραματικές μελέτες [22].	149
Πίνακας 5.5 Σύγκριση των εξισώσεων της βιβλιογραφίας.	150
Πίνακας 5.6 Σύγκριση πειραματικών μελετών.	151
Πίνακας 6.1 Μετρούμενες και εκτιμώμενες ταχύτητες θερμοφόρησης σύμφωνα με την πειραματική μελέτη των R. Dobashi et al [92].	177
Πίνακας 6.2 Αποτελέσματα για τις αποδόσεις του καπνού από πειραματικές μελέτες που εμφανίζονται και στο Διάγραμμα 6.3.	182
Πίνακας 6.3 Αποτελέσματα για το μέγεθος της πρωτογενούς σφαίρας της αιθάλης.	189
Πίνακας 6.4 Λήψη δειγμάτων με πλέγματα TEM από διάφορα σημεία σε φλόγες κατά την πειραματική μελέτη των C. R. Shaddix et al [105].	191
Πίνακας 6.5 Πλεγματική απόσταση των γραφιτικών στρωμάτων στην συλλεγόμενη αιθάλη από τα πειράματα των των C. R. Shaddix et al [105].	199
Πίνακας 7.1 Οι διαστάσεις των δεξαμενών που χρησιμοποιήθηκαν στην μελέτη των A. M. Ghasemi et al [107].	225
Πίνακας 7.2 Καιρικές συνθήκες που επικρατούσαν κατά την μελέτη των A. M. Ghasemi et al [107].	228
Πίνακας 7.3 Διαμορφώσεις των δεξαμενών για τον προσδιορισμό των απαιτήσεων σε νερό ψύξης κατά την μελέτη των A. M. Ghasemi et al [107].	229
Πίνακας 7.4 Η προσπίπτουσα ακτινοβολία στην δεξαμενή που βρίσκονταν υπό εξέταση (kW/m^2) κατά την μελέτη των A. M. Ghasemi et al [107].	233
Πίνακας 7.5 Ισοδύναμη θερμοκρασία του μέλανος σώματος (K) κατά την διαμόρφωση των δεξαμενών και τις καιρικές συνθήκες όπου η ακτινοβολία προς την προσκείμενη δεξαμενή ήταν μεγαλύτερη από την εκτιμώμενη σύμφωνα με την μελέτη των A. M. Ghasemi et al [107].	234
Πίνακας 7.6 Προσπίπτουσα ακτινοβολία, επιτρεπόμενη ακτινοβολία και ακτινοβολία που απορροφήθηκε από το νερό κατά την μελέτη των A. M. Ghasemi et al [107].	235
Πίνακας 7.7 Τελικές τιμές της γραμμικής πυκνότητας του νερού ψύξης για την απομάκρυνση της περίσσειας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας A. M. Ghasemi et al [107].	235
Πίνακας 7.8 Τελικές τιμές της γραμμικής πυκνότητας του νερού ψύξης για την απομάκρυνση της συνολικής ποσότητας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας A. M. Ghasemi et al [107].	235





ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε από τον Νοέμβριο του 2016 μέχρι τον Σεπτέμβριο του 2017 στην Σχολή Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Στόχος της μελέτης ήταν να διεξαχθεί μία εκτενής έρευνα για τις πυρκαγιές σε δεξαμενές υγρών καυσίμων και των συστημάτων πυρασφάλειας που εφαρμόζονται σε αυτές τις περιπτώσεις. Η έρευνα διεξήχθη κλιμακωτά ξεκινώντας από τα αρχικά στοιχεία που διέπουν την διεργασία της καύσης, εμβαθύνοντας στους παράγοντες που επιδρούν στην καύση σε μεγάλες πυρκαγιές υγρών καυσίμων και καταλήγοντας στις σύγχρονες μεθόδους πυρασφάλειας των δεξαμενών.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Ε. Λόη για την ανάθεση της εργασίας, την προθυμία του να με βοηθήσει και να μου διδάξει τα βασικά στοιχεία που διέπουν τις διεργασίες καύσης, όντας ο πλέον ειδικός στον τομέα αυτό. Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω ευχαριστίες στην Υποψήφια Διδάκτορα Μ. Ατζέμη και στον συμφοιτητή μου Ν. Μονέο για την βοήθειά τους κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Στην συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Β. Τάση, απόφοιτο της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για τις συμβουλές του τόσο κατά την διάρκεια των σπουδών μου όσο και για τα μελλοντικά μου βήματα. Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον πατέρα μου Παναγιώτη, την μητέρα μου Όλγα, τον αδερφό μου Γιώργο, την ξαδέρφη μου Χριστίνα και τους φίλους μου για την συνεισφορά, την υποστήριξη και την συμπαράστασή τους κατά την διάρκεια της φοίτησής μου.





ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η καύση είναι ένα πολύπλοκο και μαθηματικοποιημένο αντικείμενο που έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές κατά την πάροδο των χρόνων. Ωστόσο, παρότι οι διάφορες μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί σε διαφορετικές χρονικές περιόδους έχουν καταλήξει σε συμπεράσματα και σχέσεις που συμφωνούν ικανοποιητικά μεταξύ τους. Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η έρευνα των μελετών που έχουν διεξαχθεί για τις πυρκαγιές σε δεξαμενές υγρών καυσίμων προκειμένου να προκύψουν ολοκληρωμένα αποτελέσματα που διέπουν αυτόν τον τομέα.

Η έρευνα που διεξήχθη χωρίστηκε σε τρία τμήματα, τα οποία αναλύθηκαν σε επτά κεφάλαια. Το πρώτο τμήμα αφορούσε την μελέτη των βασικών στοιχείων που διέπουν τις διεργασίες καύσης σε πυρκαγιές στερεών, υγρών ή αερίων καυσίμων. Μελετήθηκαν οι μηχανισμοί που διέπουν την ανάπτυξη μίας φλόγας, τα στάδια ανάπτυξης και εξάπλωσης μίας πυρκαγιάς και τα ειδικά φαινόμενα όπως το κύλισμα της πυρκαγιάς (rollover), η καθολική ανάφλεξη της πυρκαγιάς (flashover) και η εμφάνιση του οπίσθιου ρεύματος (backdraft) που μπορούν να λάβουν χώρα κατά την ανάπτυξη μίας πυρκαγιάς. Τόσο οι πυρκαγιές όσο και τα καύσιμα είναι δυνατόν να χωριστούν σε κατηγορίες ανάλογα με τις ιδιότητες του καυσίμου που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση.

Το δεύτερο τμήμα της μελέτης εστίασε στις πυρκαγιές σε δεξαμενές υγρών καυσίμων ξεκινώντας από την διαχρονική μελέτη των πυρκαγιών και τους παράγοντες που επηρεάζουν τις ταχύτητες καύσης του καυσίμου. Η ταχύτητα καύσης επηρεάζεται από το μέγεθος της δεξαμενής, την ταχύτητα και την πίεση του ανέμου, ως αποτέλεσμα της λειτουργίας καύσης (αγωγή, συναγωγή, ακτινοβολία) που είναι διαφορετική για κάθε δεξαμενή. Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από αυτές τις πυρκαγιές είναι μία εξαιρετικά σημαντική παράμετρος. Για την μελέτη της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας εξετάστηκε στο μαθηματικό μοντέλο της φλόγας στερεού καυσίμου, που χρησιμοποιείται για τις εκτιμήσεις της ακτινοβολίας σε



μεγάλες αποστάσεις για πυρκαγιές υγρών καυσίμων, και στο σημειακό μαθηματικό μοντέλο, που χρησιμοποιείται για τις εκτιμήσεις της ακτινοβολίας σε μικρές αποστάσεις για πυρκαγιές υγρών και αερίων καυσίμων. Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία είναι ανεξάρτητη από τον τύπο του καυσίμου. Ωστόσο, προκειμένου να προκύψουν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα λήφθηκε υπόψιν πως η ακτινοβολία που εκπέμπεται από μία πυρκαγιά είναι δυνατόν να εξασθενίσει από την ατμοσφαιρική απορρόφηση.

Στην συνέχεια της μελέτης μας εξετάστηκε το ύψος, το μήκος και η γωνία κλίσης της φλόγας που αποτελούν αλληλένδετες έννοιες. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στις παραμέτρους που επηρεάζουν τις έννοιες αυτές όπως είναι η ταχύτητα του ανέμου και η παρουσία του πλευρικού τοιχίου. Οι έννοιες αυτές δεν επηρεάζονται σημαντικά από το μέγεθος της δεξαμενής, ενώ είναι ανεξάρτητες από τον τύπο του καυσίμου. Επιπλέον, σε αυτό το τμήμα της μελέτης αναλύθηκε εκτενώς η παραγωγή καπνού από τις πυρκαγιές σε δεξαμενές υγρών καυσίμων. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν τα τέσσερα στάδια σχηματισμού αιθάλης, δηλ. το στάδιο δημιουργίας πυρήνων, η αντίδραση σχηματισμού αιθάλης, το στάδιο οξειδωσης της αιθάλης και η συσσωμάτωση των σωματιδίων της αιθάλης. Το φαινόμενο της ασταθούς φλόγας και η δύναμη θερμοφόρησης εμφανίζουν σημαντική επίδραση στην παραγωγή καπνού. Τα ειδικά χαρακτηριστικά της αιθάλης και του καπνού, όπως είναι η απόδοση του καπνού επηρεάζονται από παραμέτρους όπως είναι το μέγεθος της δεξαμενής, το ύψος κατά μήκος της κεντρικής γραμμής του καπνού και η θερμική καταπόνηση.

Τέλος, στο τελευταίο τμήμα της έρευνας μελετήθηκε η προστασία των προσκείμενων δεξαμενών με την χρήση υδάτινου φιλμ, εκνεφώματος νερού ή κουρτίνας νερού. Συγκεκριμένα, έγινε σύγκριση των συστημάτων ψύξης, ενώ αναλύθηκαν οι μέθοδοι προσδιορισμού του απαιτούμενου νερού ψύξης. Ο προσδιορισμός της ταχύτητας ροής του νερού με βάση την προσπίπτουσα ακτινοβολία στην προσκείμενη δεξαμενή εμφανίζει μεγαλύτερη ακρίβεια.

Λέξεις κλειδιά: καύση, δεξαμενές, ταχύτητα καύσης, ακτινοβολία, ατμοσφαιρική απορρόφηση, μήκος φλόγας, ύψος φλόγας, γωνία φλόγας, παραγωγή καπνού, αστάθεια φλόγας, εκνέφωμα νερού, υδάτινο φιλμ, κουρτίνα νερού



ABSTRACT

Combustion is a complex and mathematical object that has occupied many researchers over the years. Although the different studies have been carried out at different times, they have come to conclusion and relationships that agree well with each other. This thesis aimed to study the researches carried out on tank fires in order to produce completed results in this field.

The research was divided into three sections which were analyzed in seven chapters. The first section concerned the study of the basic elements governing combustion processes in fires of solid, liquid or gaseous fuels. In particular, the basic components that are necessary for the development of a fire, the stages of the development, the spread of a fire and the specific phenomena, such as rollover, flashover and backdraft, that can take place during the development of a fire have been studied in this research. Fires and fuels can be divided into categories depending on the properties of the fuel used in each case.

In the second section of the study, we focused on tank fires starting from a intertemporal study of fires and the factors that affect the burning rate. The burning rate is influenced by tank size, wind speed and pressure as a result of the combustion process (conduction, convection, radiation) that is different for each tank. The radiation emitted by these fires is an extremely important parameter. Moreover, the solid flame model has been studied, which is used for fires of liquid fuels at long distances has been studied, and also the point source model, which is used for fires of liquid and gaseous fuels at short distances. The emitted radiation is independent of the type of fuel. However, in order to obtain more reliable results, it was taken into account that the radiation emitted by a fire may be impaired by atmospheric absorption.

Subsequently, the flame height, the flame length and flame tilt angle of tilt of the flame have been studied. These parameters are affected by the speed of the wind



speed and the presence of the side wall. However, they are not significantly affected by the size of the tank, and are independent of the type of fuel. In addition, this section of the study has extensively analyzed the smoke production from these fires. In particular, it has been studied the four soot formation steps, i.e. the nucleation step, the soot formation reaction, the soot oxidation step and the aggregation of the soot particles. The phenomenon of flickering flames and the thermophoretic force have a significant effect on smoke production. The specific characteristics of smoke are affected by parameters such as tank size, height along the smoke centerline and thermal stress.

Finally, in the last part of the study it was investigated the protection of the adjacent tanks by using water film, water spray or water curtain techniques. In particular, we compared the cooling systems and analyzed the methods for determining the required cooling water. The estimation of the required water flow based on the incident radiation is more accurate.

Key words: combustion, pools, tanks, burning rate, radiation, atmospheric absorption, flame length, flame height, flame tilt angle, smoke production, flickering flame, water spray, water film, water curtain



1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ-ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΣΤΕΡΕΩΝ, ΥΓΡΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι αρχαίοι Έλληνες πίστευαν ότι η φωτιά ήταν ένα από τα τέσσερα βασικά στοιχεία που συνθέτουν το σύμπαν. Στη μυθολογία σχεδόν κάθε κουλτούρας, η φωτιά είναι μια ιερή ουσία που δίνει ζωή ή δύναμη. Η πυρκαγιά δεν έχει ορισμένη υπόσταση. Όταν κάποιος κοιτάζει τις φλόγες μιας φωτιάς, παρατηρεί όχι ένα αντικείμενο, αλλά μια διαδικασία που αποτελεί μια χημική αντίδραση.

Η χημική αντίδραση που λαμβάνει χώρα κατά την ανάπτυξη της πυρκαγιάς είναι η οξειδωση, δηλαδή η αντίδραση του οξυγόνου με μια άλλη ουσία. Η φωτιά είναι μια διαδικασία οξειδωσης που συμβαίνει πολύ γρήγορα, με αποτέλεσμα να προκύπτει η απελευθέρωση του φωτός, της θερμότητας και του ήχου, συχνά με αρκετά μεγάλη ένταση. Η απότομη απελευθέρωση της ενέργειας προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας, μερικές φορές κατά χιλιάδες βαθμούς. Επιπλέον, είναι δυνατό να εμφανιστεί καπνός ως τοξικό απόβλητο των υπολειμμάτων της πυρκαγιάς [1].

Τα συμβατικά (ή ορυκτά) καύσιμα (fossil fuels) κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκονται.

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

Τα υγρά καύσιμα αποτελούν την κατηγορία των καυσίμων με την μεγαλύτερη κατανάλωση σε όλον τον κόσμο. Επίσης, λόγω των ιδιοτήτων τους χρησιμοποιούνται τόσο για καύσιμα σε κινητήρες εσωτερικής καύσης για κίνηση οχημάτων, όσο και για καύσιμα σε θερμικές εγκαταστάσεις για την παραγωγή ατμού και ηλεκτρικής ενέργειας. Η κατανομή της ζήτησης σε προϊόντα πετρελαίου παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις από περιοχή σε περιοχή. Στις Η.Π.Α για παράδειγμα όπου χρησιμοποιούνται σε μεγάλο ποσοστό βενζινοκίνητα οχήματα, η ζήτηση της βενζίνης καλύπτει σημαντικότερο ποσοστό απ' ότι στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης και της Ιαπωνίας όπου χρησιμοποιούνται περισσότερο κινητήρες ντίζελ στις οδικές μεταφορές εμπορευμάτων [2].

1.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ

Το τρίγωνο της καύσης προσδιορίζει τρία απαραίτητα συστατικά για την εμφάνιση της φωτιάς. Τα συστατικά αυτά είναι:

- ❖ **Το καύσιμο**, δηλαδή η ουσία που πρόκειται να καεί.
- ❖ **Η θερμότητα**, η οποία πρέπει να είναι αρκετή για να προκληθεί η καύση του καυσίμου.
- ❖ **Ο αέρας**, ο οποίος περιέχει το οξυγόνο.



Εικόνα 1.1 Το τρίγωνο της καύσης [3].



Τα στάδια της ανάπτυξης της πυρκαγιάς είναι τα εξής:

- ❖ **Ανάφλεξη:** Το καύσιμο, το οξυγόνο και η θερμότητα ενώνονται προκειμένου να προκύψει μία παρατεταμένη χημική αντίδραση. Σε αυτό το στάδιο ο έλεγχος της φωτιάς μπορεί να γίνει με έναν πυροσβεστήρα.
- ❖ **Ανάπτυξη:** Η αρχική φλόγα που δημιουργείται κατά την ανάφλεξη αποτελεί πηγή θερμότητας και το πρόσθετο καύσιμο αρχίζει να αναφλέγεται. Το μέγεθος της φωτιάς αυξάνεται και το πλουμίο¹ (plume) φτάνει στο ανώτατο όριο. Τα καυτά καυσαέρια συλλέγουν θερμότητα, επιτρέποντας σε όλα τα καύσιμα που βρίσκονται στον χώρο καύσης να φτάσουν στην θερμοκρασία ανάφλεξής τους.
- ❖ **Πλήρως ανεπτυγμένη φλόγα:** Η πυρκαγιά έχει εξαπλωθεί σχεδόν σε όλα τα καύσιμα. Οι θερμοκρασίες φτάνουν στην μέγιστη τιμή τους με αποτέλεσμα να προκαλούνται βλάβες λόγω της θερμότητας. Το οξυγόνο καταναλώνεται γρήγορα.
- ❖ **Εξάντληση:** Η φωτιά καταναλώνει διαθέσιμο καύσιμο, η θερμοκρασία μειώνεται και η φωτιά γίνεται λιγότερο έντονη.

Επιπλέον, η εξάπλωση της φωτιάς γίνεται με τους εξής τρόπους:

- ❖ **Αγωγή:** Η διέλευση της θερμικής ενέργειας μέσα από ένα υλικό λόγω της άμεσης επαφής.
- ❖ **Συναγωγή:** Η ροή του υγρού ή του αερίου από τις θερμότερες στις ψυχρότερες περιοχές. Ο θερμαινόμενος αέρας είναι λιγότερο πυκνός και ανεβαίνει προς τα πάνω, ενώ ο δροσερός αέρας κατεβαίνει προς τα κάτω.
- ❖ **Ακτινοβολία:** Η θερμότητα ταξιδεύει μέσω των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, δηλαδή χωρίς αντικείμενα ή αέρα που να την μεταφέρουν. Η ακτινοβολούμενη θερμότητα εκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις μέχρι να έρθει σε επαφή με ένα αντικείμενο.

¹ Πλουμίο καλείται το ρυπασμένο αέριο ρεύμα που εξέρχεται από μία διεργασία καύσης [114].



Τέλος, οι τέσσερις τρόποι για την κατάσβεση μίας πυρκαγιάς περιλαμβάνουν την ψύξη του καυσίμου, τον αποκλεισμό του οξυγόνου, την απομάκρυνση του καυσίμου και την διακοπή της χημικής αντίδρασης [1].

1.2.1 ΦΛΟΓΕΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΑΝΕΜΙΓΜΕΝΕΣ ΦΛΟΓΕΣ

Ένα εύφλεκτο αέριο (π.χ. προπάνιο, C_3H_8) μπορεί να καεί με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος προκύπτει όταν το αέριο καίγεται είτε ως ένα ρεύμα είτε ως ένας πίδακας αερίου από έναν σωλήνα (όπως συμβαίνει στην περίπτωση του απλού καυστήρα Bunsen με είσοδο αέρα). Στην περίπτωση αυτή προκύπτει η φλόγα διάχυσης, κατά την οποία η καύση συμβαίνει στις περιοχές όπου το αέριο καύσιμο και ο αέρας αναμειγνύονται με διεργασίες διάχυσης. Μια τέτοια φλόγα έχει χαρακτηριστικό κίτρινο χρώμα, υποδεικνύοντας την παρουσία λεπτών σωματιδίων αιθάλης που σχηματίζονται ως αποτέλεσμα της ατελούς καύσης. Μερικά από αυτά τα σωματίδια θα καούν στη φλόγα, ενώ άλλα θα βγουν από την άκρη της φλόγας και θα σχηματίσουν καπνό.

Ο δεύτερος τρόπος καύσης ενός αερίου καυσίμου αφορά την περίπτωση όπου ο αέρας και το αέριο έχουν αναμειχθεί καλά πριν από την ανάφλεξη. Κατά την καύση αυτή θα πραγματοποιηθεί μία προκαταρκτική καύση, υπό την προϋπόθεση ότι το μείγμα του αερίου/αέρα βρίσκεται εντός μιας περιοχής συγκεντρώσεων που οριοθετείται από τα κατώτερα και ανώτερα όρια ευφλεκτότητας. Τα όρια αυτά δίνονται στον Πίνακα 1.1. Εκτός αυτών των ορίων, το μείγμα δεν είναι εύφλεκτο. Εάν ένα μείγμα είναι εύφλεκτο, τότε μπορεί να αναφλεγεί από μια μικρή πηγή ανάφλεξης, όπως ένας ηλεκτρικός σπινθήρας. Ένα στοιχειομετρικό μείγμα είναι πιο εύφλεκτο, κατά το μείγμα αυτό η ποσότητα του υπάρχοντος οξυγόνου βρίσκεται στη σωστή αναλογία με το καύσιμο προκειμένου να γίνει πλήρης καύση του καυσίμου προς διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Αυτός ο τρόπος καύσης βασίζεται στην δημιουργία προανεμιγμένων φλογών, οι οποίες είναι σχετικά καθαρές φλόγες με εντονότερη καύση σε υψηλότερες θερμοκρασίες [4].



Πίνακας 1.1 Τα ανώτερα και τα κατώτερα όρια ανάφλεξης² στον αέρα [4].

	Κατώτερο όριο αναφλεξιμότητας (% ανά όγκο)	Ανώτερο όριο αναφλεξιμότητας(% ανά όγκο)
Μονοξείδιο του άνθρακα	12.5	74
Μεθάνιο	5.0	15
Προπάνιο	2.1	9.5
n-εξάνιο	1.2	7.4
n-δεκάνιο	0.75	5.6
Μεθανόλη	6.7	36
Αιθανόλη	3.3	19
Ακετόνη	2.6	13
Βενζόλιο	1.3	7.9

Οι φλόγες διάχυσης σχετίζονται με την ροή του αερίου καυσίμου και αποτελούν έναν χαρακτηριστικό τρόπο καύσης που παρατηρείται όταν ένα υγρό ή στερεό καύσιμο υφίσταται καύση. Στην περίπτωση αυτή, η φλόγα τροφοδοτείται από ατμούς καυσίμου που παράγονται στην επιφάνεια της συμπυκνωμένης φάσης. Η ταχύτητα παροχής αυτών των ατμών σχετίζεται με την ταχύτητα καύσης στη φλόγα διάχυσης. Η ενέργεια μεταφέρεται από τη φλόγα στην επιφάνεια, παρέχοντας έτσι την ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή των ατμών. Η διαδικασία αυτή στα υγρά καύσιμα αποτελεί μία απλή διαδικασία εξαέρωσης, ωστόσο στα στερεά καύσιμα πρέπει να γίνει η παροχή αρκετής ενέργειας προκειμένου να γίνει η χημική αποσύνθεση του καυσίμου, σπάζοντας τα μεγάλα μόρια σε μικρότερα θραύσματα τα οποία μπορούν να εξατμιστούν και να διαφύγουν από την επιφάνεια του στερεού. Αυτή η θερμική ανατροφοδότηση είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της ροής των ατμών και ως εκ τούτου της φλόγας διάχυσης [4].

²Ανω όριο ανάφλεξης: η μέγιστη συγκέντρωση του καυσίμου στον αέρα κατά την οποία μπορεί να προκληθεί καύση.

Κάτω όριο ανάφλεξης: η ελάχιστη συγκέντρωση του καυσίμου στον αέρα κατά την οποία μπορεί να προκληθεί καύση [113].



1.2.2 ΕΙΔΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ

Κατά την ανάπτυξη μίας πυρκαγιάς είναι πιθανόν να συμβούν ορισμένα ειδικά φαινόμενα όπως είναι:

- ❖ **Το κύλισμα της πυρκαγιάς (rollover)** που λαμβάνει χώρα όταν τα καυσαέρια της ατελούς ή της τέλει καύσης φτάνουν στο μέγιστο ύψος και απλώνονται οριζόντια. Στη συνέχεια, ο καπνός ξεκινά την καύση. Στην περίπτωση αυτή εάν δεν αεριοστεί το δωμάτιο προκειμένου να προκύψει η ψύξη του αέρα, είναι πιθανόν να δημιουργηθεί αναβρασμός.
- ❖ **Η καθολική ανάφλεξη της πυρκαγιάς (flashover)** που λαμβάνει χώρα ξαφνικά με ταυτόχρονη ανάφλεξη σε όλο το χώρο. Κατά την διαδικασία αυτή, τα καυσαέρια που έχουν υψηλή θερμοκρασία φτάνουν στο μέγιστο ύψος και απλώνονται στα τοιχώματα. Επιπλέον, η θερμότητα ακτινοβολείται προς τα κάτω και εντείνεται μέχρι όλα τα εύφλεκτα υλικά να φτάσουν στην θερμοκρασία ανάφλεξής τους και να αναπτυχθούν οι φλόγες. Οι θερμοκρασίες που μπορούν να αναπτυχθούν φτάνουν σε πολύ υψηλές τιμές μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα. Ακόμα και ένας πυροσβέστης με ένα πολύ ενισχυμένο εξοπλισμό είναι δύσκολο να επιβιώσει κατά την διάρκεια της καθολικής ανάφλεξης της πυρκαγιάς (flashover).
- ❖ **Η εμφάνιση του οπίσθιου ρεύματος (backdraft)** που αφορά την έκρηξη που λαμβάνει χώρα όταν εισάγεται οξυγόνο μέσα σε ένα χώρο γεμάτο από αέρια σε υψηλές θερμοκρασίες. Όταν μία φωτιά λαμβάνει χώρα σε έναν περιορισμένο χώρο καταναλώνει όλη την ποσότητα του οξυγόνου. Στην συνέχεια οι ορατές φλόγες εξαφανίζονται και τα θερμά καυσαέρια καταλαμβάνουν όλο τον χώρο. Τέλος, η θερμοκρασία αυξάνεται, τα αέρια διογκώνονται και η πίεση αυξάνεται. Στην περίπτωση που υπάρξει ένα άνοιγμα στο χώρο και εισέλθει οξυγόνο τότε το εξατμιζόμενο καύσιμο εκρήγνυται σε φλόγες και τα συμπιεσμένα καυσαέρια εκτονώνονται μέσω του ανοίγματος με την μορφή μιας περιστρεφόμενης διάπυρης σφαίρας [1].



1.2.3 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΤΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ

Οι πυρκαγιές κατατάσσονται με βάση τον τύπο του καυσίμου στις παρακάτω κατηγορίες:

- ❖ **Κατηγορία A:** Περιλαμβάνει φωτιές που αναπτύσσονται από τα συνήθη καύσιμα όπως ξύλο, ύφασμα, χαρτί, καουτσούκ και άλλα πλαστικά. Τα καύσιμα αυτά καίγονται αφήνοντας στάχτη. Η κατάσβεση της φωτιάς γίνεται με ψύξη του καυσίμου σε θερμοκρασία κάτω από την θερμοκρασία ανάφλεξης του. Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν εξίσου αποτελεσματικά το νερό και άλλα μέσα πυρόσβεσης.
- ❖ **Κατηγορία B:** Περιλαμβάνει φωτιές από εύφλεκτα (flammable) και αναφλέξιμα (combustible) υγρά, δηλαδή υγρά καύσιμα που φλέγονται σε θερμοκρασία δωματίου και υγρά καύσιμα που απαιτούν την παροχή θερμότητας για να καούν αντίστοιχα. Τα υγρά καύσιμα αυτά περιλαμβάνουν λάδια πετρελαίου, πίσσες, βαφές με βάση το πετρέλαιο, διαλύτες, αλκοόλες και εύφλεκτα αέρια. Ο υψηλός κίνδυνος αυτών των πυρκαγιών αφορά το γεγονός ότι το νερό είναι πιθανόν να μην τις σβήσει. Η κατάσβεση μία τέτοιας πυρκαγιάς μπορεί να γίνει με την δημιουργία ενός φράγματος μεταξύ του καυσίμου και του οξυγόνου, όπως ένα στρώμα αφρού.
- ❖ **Κατηγορία C:** Περιλαμβάνει φωτιές από τα καύσιμα που είναι δυνατόν να ανήκουν στην κατηγορία A ή B και ταυτόχρονα εμπλέκεται μία ηλεκτρολογική συσκευή. Για την κατάσβεση αυτών των πυρκαγιών απαιτούνται ειδικές τεχνικές και υλικά, όπως είναι το διοξείδιο του άνθρακα. Η χρήση του νερού σε αυτήν την περίπτωση είναι πολύ επικίνδυνη επειδή υπάρχει ηλεκτρική ενέργεια.
- ❖ **Κατηγορία D:** Περιλαμβάνει φωτιές από εύφλεκτα μέταλλα, όπως μαγνήσιο, τιτάνιο, νάτριο, λίθιο και κάλιο. Οι φωτιές αυτές αναπτύσσονται κυρίως σε αυτοκίνητα που περιέχουν πολλά τέτοια μέταλλα. Το νερό μπορεί να διασπαστεί σε υδρογόνο και οξυγόνο, λόγω των εξαιρετικά υψηλών θερμοκρασιών στις οποίες μπορεί να φτάσει αυτή η φλόγα. Άμεση συνέπεια αυτής της διάσπασης είναι η ενίσχυση της καύσης ή η εμφάνιση μίας έκρηξης. Οι φωτιές αυτές



σβήνονται με ειδικές σκόνες που έχουν ως βάση το χλωριούχο νάτριο ή άλλα άλατα, ακόμα είναι δυνατόν να σβήσουν με την χρήση καθαρής, ξηρής άμμου.

- ❖ **Κατηγορία Κ:** Περιλαμβάνει φωτιές που αναπτύσσονται σε μαγειρικές συσκευές με καύσιμα μέσα μαγειρέματος όπως είναι τα φυτικά ή ζωικά έλαια και λίπη [1].

1.3 ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Οι πυρκαγιές στερεών καυσίμων περιλαμβάνουν ένα μεγάλο φάσμα πυρκαγιών στις οποίες το καύσιμο μπορεί να είναι οποιοδήποτε στερεό. Μερικά από τα συνηθή στερεά που χρησιμοποιούνται στην καθημερινή ζωή και μπορούν να θεωρηθούν ως υπεύθυνα για την ανάπτυξη πυρκαγιών είναι το ξύλο, τα προϊόντα του ξύλου, διάφορα υφάσματα, τα πλαστικά, το καουτσούκ και οι σκόνες.

1.3.1 ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΞΥΛΩΝ

Το ξύλο είναι ένα από τα πιο κοινά στερεά που χρησιμοποιείται στην καθημερινή ζωή με ποικίλες εφαρμογές. Το ξύλο και τα προϊόντα του είναι καύσιμα όταν έρχονται σε επαφή με επιφάνειες υψηλής θερμοκρασίας και εκτίθενται σε θερμότητα, ανοιχτές φλόγες ή οποιαδήποτε άλλη πηγή ανάφλεξης. Για την διεύρυνση του πεδίου εφαρμογής τους απαιτείται η βελτίωση των ιδιοτήτων καύσης τους. Προκειμένου οι δομικές μονάδες που παράγονται από ξύλο να είναι λιγότερο εύφλεκτες υφίστανται επεξεργασία με επιβραδυντικά πυρκαγιάς. Το βασικό χαρακτηριστικό που καθορίζει την ευφλεκτότητα των προϊόντων του ξύλου είναι η θερμοκρασία ανάφλεξης. Η τιμή της θερμοκρασίας ανάφλεξης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από ορισμένες ιδιότητες του ξύλου και από τις συνθήκες της καύσης, δηλαδή την πυκνότητα, την υγρασία, το μέγεθος και το σχήμα του ξύλου, καθώς και την πηγή ανάφλεξης, τον χρόνο έκθεσης, την ένταση της έκθεσης και τις συνθήκες της ατμόσφαιρας.

Η θερμοκρασία ανάφλεξης είναι διαφορετική ανάλογα με την μέθοδο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό της. Ωστόσο, έχει παρατηρηθεί πως η



μεταβολή στην θερμοκρασία ανάφλεξης είναι εξαιρετικά χαμηλή με την κάθε μέθοδο. Η υψηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία αυξάνει τη θερμοκρασία ανάφλεξης και μειώνει την ταχύτητα καύσης του ξύλου. Επιπλέον, η θερμική αποσύνθεση του ξύλου είναι μια πολύπλοκη διαδικασία, αλλά οι φάσεις της μπορούν σαφώς να διαχωρισθούν ως εξής:

- ❖ Η θερμική αποσύνθεση και η απώλεια μάζας ξεκινά στους 120-200° C. Σε αυτό το θερμοκρασιακό εύρος εμφανίζονται στο χώρο καύσης εκλύσεις υγρασίας και μη εύφλεκτες αποικοδομήσεις.
- ❖ Στους 200-280° C εμφανίζονται κυρίως ενδόθερμες αντιδράσεις, ενώ απορροφάται θερμική ενέργεια από την πηγή ανάφλεξης.
- ❖ Στους 280-500° C επιταχύνονται οι εξώθερμες αντιδράσεις των προϊόντων αποσύνθεσης, ενώ μπορούν να παρατηρηθούν φαινόμενα καρκινοποίησης. Σε αυτό το θερμοκρασιακό εύρος μπορεί να διατηρηθεί η καύση. Μετά την ανάφλεξη, η καύση δεν γίνεται εγκαίρως σταθερή λόγω της καλής θερμομονωτικής ικανότητας των ανθρακούχων στρωμάτων της. Κατά συνέπεια, η προθέρμανση των βαθύτερων στρωμάτων είναι περιορισμένη και χρονοβόρα.
- ❖ Σε θερμοκρασίες που υπερβαίνουν τους 500° C, το ξύλινο υλικό σχηματίζει υπολείμματα. Σε αυτό το στάδιο σχηματίζεται τέφρα που περιέχει τα παραγόμενα στερεά και ανόργανα υλικά. Στην συνέχεια η διαδικασία της καύσης λαμβάνει τέλος [4].

1.3.2 ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΥΦΑΣΜΑΤΩΝ

Τα υφάσματα χρησιμοποιούνται ευρέως στην καθημερινή και εμφανίζουν ποικίλες χρήσεις. Η πλειονότητα των υφασμάτων που παράγονται από ινώδη υλικά είναι καύσιμα. Ο κίνδυνος που παρουσιάζουν οι ίνες και τα υφάσματα υφίσταται κατά την παραγωγή, την επεξεργασία, την αποθήκευση αλλά και κατά τη διάρκεια της χρήσης τους. Συγκεκριμένα, τα πιο κρίσιμα χαρακτηριστικά της εμφάνισης πυρκαγιάς στα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα είναι οι ιδιότητες που συνδέονται με την ανάφλεξη, τη διάδοση της φλόγας, την παραγωγή θερμότητας και τα τοξικά



προϊόντα της καύσης. Για τον λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι για τον προσδιορισμό αυτών των ιδιοτήτων.

Τα βασικά υλικά των κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων είναι τόσο φυσικά όσο και τεχνητά. Οι συνθετικές ίνες χρησιμοποιούνται είτε μόνες τους είτε σε ανάμιξη με φυσικές ίνες. Οι φυσικές ίνες φυτικής προέλευσης (βαμβάκι, κάνναβη, λινάρι) αποτελούνται από κυτταρίνη, η οποία είναι καύσιμη. Επιπλέον, οι ίνες αυτές έχουν σχετικά υψηλή θερμοκρασία ανάφλεξης (περίπου 400° C) με αποτέλεσμα να ανθρακώνονται και να μην τήκονται όταν βρίσκονται σε υψηλή θερμοκρασία. Αυτό το πλεονέκτημα καθιστά τις ίνες ιδιαίτερα επωφελείς για ιατρικές θεραπευτικές αγωγές σε ατυχήματα.

Οι φυσικές ίνες που έχουν ως βάση πρωτεΐνες ζωικής προέλευσης (μαλλί, μετάξι, τρίχες) είναι πιο ευνοϊκές στην καύση σε σύγκριση με τις ίνες της φυτικής προέλευσης. Οι ιδιότητες καύσης για τις ίνες ζωικής προέλευσης είναι πιο ευνοϊκές από εκείνες των ινών φυτικής προέλευσης, επειδή απαιτείται υψηλότερη θερμοκρασία για την ανάφλεξή τους (500-600° C) υπό τις ίδιες συνθήκες, με αποτέλεσμα η καύση τους να είναι λιγότερο εντατική.

Οι φυσικές ίνες εμφανίζουν σημαντική εφαρμογή και στην παραγωγή συνθετικών υλικών με βελτιωμένες ιδιότητες όταν συνδυαστούν με τα πολυμερή υλικά. Τα πολυμερή υλικά έχουν εξαιρετικά καλές μηχανικές ιδιότητες, ωστόσο μεταξύ των ιδιοτήτων τους αυτές που σχετίζονται με την καύση είναι οι λιγότερο επωφελείς. Τα περισσότερα πολυμερή υλικά, παρά την υψηλή θερμοκρασία ανάφλεξής τους (περίπου 400-600° C), τήκονται όταν εκτίθενται στην θερμότητα, αναφλέγονται εύκολα, καίγονται έντονα, ενώ κατά την καύση τους απελευθερώνουν σημαντικά υψηλές ποσότητες καπνού και τοξικών αερίων. Αυτές οι ιδιότητες καύσης μπορούν να βελτιωθούν με την προσθήκη φυσικών ινών και την παραγωγή των συνθετικών υλικών με μικτές ίνες. Περαιτέρω επεξεργασία είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με επιβραδυντικά φλόγας. Για την παρασκευή κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων για βιομηχανικούς σκοπούς αλλά και ενδυμάτων θερμικής προστασίας, χρησιμοποιούνται ανόργανα και μη εύφλεκτα προϊόντα από



ίνες σε μεγάλες ποσότητες (συμπεριλαμβανομένων των υάλινων και μεταλλικών ινών) [4].

1.3.3 ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Σχεδόν όλα τα μέταλλα, υπό ορισμένες συνθήκες, είναι ικανά να καούν στον ατμοσφαιρικό αέρα. Ο χάλυβας και το αλουμίνιο με μεγάλο δομικό πάχος, με βάση τη συμπεριφορά τους στη φωτιά, θεωρούνται πως είναι μη καύσιμα. Ωστόσο, οι σκόνες αλουμινίου, ο σίδηρος σε λεπτή κατανομή και τα μεταλλικά πλέγματα από λεπτές μεταλλικές ίνες μπορούν εύκολα να αναφλεγούν και να καούν εντατικά. Τα αλκαλικά μέταλλα (λίθιο, νάτριο, κάλιο), τα μέταλλα των αλκαλικών γαιών (ασβέστιο, μαγνήσιο, ψευδάργυρος), το ζirkόνιο, το τιτάνιο κ.λπ. αναφλέγονται εξαιρετικά εύκολα με τη μορφή σκόνης, ρινισμάτων ή λεπτών ταινιών. Επιπλέον, ορισμένα μέταλλα έχουν τόσο μεγάλη ευαισθησία και πρέπει να αποθηκεύονται σε σημεία όπου δεν υπάρχει επαφή με τον αέρα, σε ατμόσφαιρα αδρανούς αερίου ή σε ένα υγρό που να μην αντιδρά με τα μέταλλα.

Τα εύφλεκτα μέταλλα είναι εκείνα που μπορούν να καούν με εξαιρετικά βίαιες αντιδράσεις καύσης. Οι αντιδράσεις αυτές είναι διεργασίες οξειδωσης υψηλής ταχύτητας που απελευθερώνουν σημαντικά υψηλότερες ποσότητες θερμότητας από τις αντίστοιχες ποσότητες που παράγονται από την καύση εύφλεκτων υγρών. Η καύση της μεταλλικής σκόνης, μετά την προκαταρκτική φάση της ανάφλεξης, μπορεί να εξελιχθεί σε γρήγορη καύση. Η εμφάνιση σκόνης μπορεί να επιφέρει σοβαρές εκρήξεις. Η ενεργότητα της καύσης και η συγγένεια ορισμένων μετάλλων (όπως το μαγνήσιο) με το οξυγόνο είναι τόσο υψηλή που μετά την ανάφλεξή τους συνεχίζουν να καίγονται, ενώ βρίσκονται σε ορισμένα μέσα (π.χ. άζωτο, διοξείδιο του άνθρακα, ατμό ατμού) που χρησιμοποιούνται για την κατάσβεση των πυρκαγιών.

Οι πυρκαγιές των μετάλλων μπορούν να ελεγχθούν με την έγκαιρη ανίχνευση, την ταχεία και κατάλληλη δράση των πυροσβεστών με την εφαρμογή της πιο αποτελεσματικής μεθόδου και την αφαίρεση των μετάλλων και άλλων καυσίμων υλικών από τη ζώνη καύσης ή τουλάχιστον την μείωση των ποσοτήτων τους. Για



παράδειγμα, τα αλκαλικά μέταλλα λόγω της ικανότητάς τους να αντιδρούν βίαια με το νερό, μπορούν να σβήνουν μόνο με σκόνες ξηρής πυρόσβεσης. Η καύση του μαγνησίου δεν μπορεί να σβήσει με νερό, διοξείδιο του άνθρακα, αλογόνα ή άζωτο. Αντιθέτως, εάν κάποια από αυτές τις ενώσεις χρησιμοποιηθούν για την πυρόσβεση, η κατάσταση μπορεί να γίνει ακόμα πιο επικίνδυνη. Τα ευγενή αέρια ή σε ορισμένες περιπτώσεις το τριφθοριούχο βόριο μπορούν να δράσουν επιτυχώς στην κατάσβεση αυτών των πυρκαγιών.

Τέλος, κατά την καύση ραδιενεργών μετάλλων (πλουτώνιο, ουράνιο) πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην προστασία από την ακτινοβολία. Επιπλέον, πρέπει να ληφθούν προληπτικά μέτρα για να αποφευχθεί η διείσδυση τοξικών προϊόντων αποσύνθεσης σε ζώντες οργανισμούς [4].

1.3.4 ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ

Τα πλαστικά είναι μακρομοριακές οργανικές ενώσεις που παράγονται συνθετικά ή με τροποποίηση φυσικών υλικών. Η δομή και το σχήμα αυτών των μακρομοριακών υλικών, που παράγονται με πολυμεριστικές, πολυπροσθετικές ή πολυσυμπυκνωτικές αντιδράσεις, θα επηρεάσουν έντονα τις ιδιότητές τους. Τα μόρια της αλυσίδας των θερμοπλαστικών (πολυαμίδια, πολυανθρακικά, πολυεστέρες, πολυστυρένιο, πολυβινυλοχλωρίδιο κ.λπ.) είναι γραμμικά ή διακλαδισμένα, τα ελαστομερή (νεοπρένιο, πολυσουλφίδια, ισοπρένιο κλπ.) είναι ελαφρά διασταυρωμένα, ενώ θερμοσκληρυνόμενα πλαστικά (πολυακκύλια, εποξειδικές ρητίνες, πολυουρεθάνες κλπ.) είναι πυκνά διασυνδεδεμένα.

Το φυσικό καουτσούκ χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη από τη βιομηχανία ελαστικών και αφού βουλκανισθεί παράγεται καουτσούκ. Τα τεχνητά καουτσούκ, η δομή των οποίων είναι παρόμοια με εκείνη του φυσικού καουτσούκ, είναι πολυμερή και συμπολυμερή βουταδιενίου.

Τα προϊόντα από πλαστικό και καουτσούκ χρησιμοποιούνται σε όλους σχεδόν τους τομείς της καθημερινής ζωής. Η χρήση της μεγάλης ποικιλίας και των



εξαιρετικών τεχνικών ιδιοτήτων αυτών των υλικών έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή αντικειμένων όπως διάφορες δομικές κατασκευές, έπιπλα, ρούχα, εμπορεύματα, εξαρτήματα για οχήματα και μηχανήματα.

Συνήθως, τα πλαστικά και το καουτσούκ, όπως και όλα τα οργανικά υλικά, θεωρούνται καύσιμα. Για την περιγραφή της συμπεριφοράς τους στη φωτιά, χρησιμοποιούνται ορισμένες παράμετροι που μπορούν να προσδιοριστούν με ειδικές μεθόδους. Με γνώση αυτών των παραμέτρων, μπορούν να καθοριστούν και οι διατάξεις πυρασφάλειας. Αυτές οι παράμετροι είναι η ευφλεκτότητα, η ανάφλεξη, η ικανότητα ανάπτυξης καπνού, η ταχύτητα παραγωγής τοξικών αερίων και η καύση των σταγονιδίων.

Σε πολλές περιπτώσεις η θερμοκρασία ανάφλεξης των πλαστικών είναι υψηλότερη από εκείνη του ξύλου ή άλλων υλικών, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις αναφλέγονται πιο εύκολα και η καύση τους γίνεται πιο γρήγορα και με μεγαλύτερη ένταση. Οι πυρκαγιές των πλαστικών συχνά συνοδεύονται από τα δυσάρεστα φαινόμενα απελευθέρωσης μεγάλων ποσοτήτων πυκνού καπνού που μπορούν να περιορίσουν σημαντικά την ορατότητα και να αναπτύξουν διάφορα τοξικά αέρια. Τα θερμοπλαστικά υλικά λιώνουν κατά τη διάρκεια της καύσης, στη συνέχεια ρέουν και ανάλογα με τη θέση τους (εάν είναι τοποθετημένα μέσα ή πάνω στην οροφή) παράγουν σταγόνες που παραμένουν στην περιοχή καύσης και ενδέχεται να αναφλέξουν τα καύσιμα υλικά που βρίσκονται από κάτω τους.

Η βελτίωση των ιδιοτήτων καύσης αποτελεί ένα πολύπλοκο πρόβλημα της πλαστικής χημείας. Τα επιβραδυντικά της φλόγας αναστέλλουν την ευφλεκτότητα, η ανάφλεξη γίνεται πιο αργή, η ταχύτητα καύσης μειώνεται και η διάδοση της φλόγας επιβραδύνεται. Ταυτόχρονα, η ποσότητα και η οπτική πυκνότητα του καπνού είναι υψηλότερη και το παραγόμενο αέριο μίγμα είναι πιο τοξικό. Για την βελτίωση των ιδιοτήτων καύσης των πλαστικών χρησιμοποιούνται διάφορες ίνες με στόχο την παραγωγή σύνθετων, ενισχυμένων υλικών [4].



1.3.5 ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΣΚΟΝΗΣ

Οι σκόνες είναι στερεά υλικά, με διαφορετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες από αυτές των συμπαγών υλικών, που μπορούν να προκαλέσουν διάφορα βιομηχανικά ατυχήματα και καταστροφές από την έκρηξή τους. Τα υλικά που δεν είναι εύφλεκτα στη συνήθη μορφή τους, όπως τα μέταλλα, μπορούν να προκαλέσουν έκρηξη υπό μορφή σκόνης αναμειγμένης με αέρα όταν επηρεάζονται από οποιαδήποτε πηγή ανάφλεξης, ακόμη και χαμηλής ενέργειας. Ο κίνδυνος έκρηξης υπάρχει επίσης στην σκόνη που δημιουργείται από εύφλεκτα υλικά.

Η σκόνη αποτελεί έναν κίνδυνο έκρηξης όχι μόνο όταν επιπλέει στον αέρα, αλλά και όταν βρίσκεται σε στρώματα. Κατά την δημιουργία των στρωμάτων σκόνης είναι δυνατόν να γίνει η συσσώρευση θερμότητας και να λάβει χώρα αργή καύση στο εσωτερικό των στρωμάτων ως αποτέλεσμα της αυξημένης ικανότητας των σωματιδίων να αντιδράσουν και της χαμηλότερης θερμικής αγωγιμότητάς τους. Επιπλέον, η σκόνη μπορεί να αναταράσσεται από αναλαμπές με αποτέλεσμα την αύξηση της πιθανότητας έκρηξής της.

Τα σωματίδια σκόνης που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα με λεπτή κατανομή αποτελούν έναν σοβαρό κίνδυνο. Οι κατώτερες οριακές τιμές της συγκέντρωσης της σκόνης κατά τις οποίες μπορεί να εμφανιστεί η έκρηξη εξαρτώνται από το μέγεθος και την κατανομή των σωματιδίων. Ωστόσο, αξίζει να αναφερθεί πως οι σκόνες δεν εμφανίζουν άνω όρια ανάφλεξης λόγω της ιδιότητάς τους να καθιζάνουν εάν η συγκέντρωσή τους στον αέρα αυξηθεί. Εάν η συγκέντρωση της σκόνης υπερβεί την υψηλότερη συγκέντρωση που οδηγεί σε έκρηξη, ένα μέρος της σκόνης δεν καταστρέφεται από τη φωτιά, αλλά απορροφά θερμότητα και ως εκ τούτου η πίεση της έκρηξης που αναπτύσσεται παραμένει κάτω από την μέγιστη τιμή. Η περιεκτικότητα σε υγρασία του αέρα επηρεάζει επίσης την εμφάνιση μιας έκρηξης. Σε υψηλότερη υγρασία, η θερμοκρασία ανάφλεξης του νέφους σκόνης αυξάνεται ανάλογα με την ποσότητα της θερμότητας που απαιτείται για την εξάτμιση της υγρασίας. Εάν μια αδρανής ξένη σκόνη αναμειχθεί με ένα νέφος της σκόνης, η εκρηκτικότητα του μίγματος σκόνης-αέρα θα μειωθεί. Το αποτέλεσμα θα είναι το ίδιο



αν αναμειχθούν αδρανή σωματίδια στο μείγμα αέρα και σκόνης, επειδή η συγκέντρωση οξυγόνου που είναι απαραίτητη για την καύση θα είναι χαμηλότερη.

Όλες οι πηγές ανάφλεξης, ακόμη και με ελάχιστη ενέργεια ανάφλεξης, μπορούν να αναφλέξουν σύννεφα σκόνης. Η ποσότητα της ενέργειας που απαιτείται για ανάφλεξη των νεφών σκόνης είναι 20 έως 40 φορές υψηλότερη από αντίστοιχη που απαιτείται στην περίπτωση μιγμάτων καυσίμων ατμών και αέρα.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τον κίνδυνο έκρηξης για τις σκόνες που έχουν καθίζουν είναι οι φυσικές και θερμικές ιδιότητες της στρώσης της σκόνης, η θερμοκρασία ανάφλεξης της σκόνης και οι ιδιότητες ανάφλεξης των προϊόντων αποσύνθεσης που εκλύονται από το στρώμα της σκόνης [4].

1.4 ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΥΓΡΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Σε περίπτωση αναφλέξιμων (combustible) και εύφλεκτων (flammable) υγρών δημιουργούνται πιθανές πηγές κινδύνου. Αρχικά, ο κλειστός ή ανοικτός χώρος των ατμών που εμφανίζεται πάνω από τα υγρά αποτελεί σημαντικό κίνδυνο για την εμφάνιση πυρκαγιάς και έκρηξης. Η καύση και η πιθανή έκρηξη μπορεί να εκδηλωθεί εάν στο υλικό υπάρχει το μίγμα αναφλέξιμων και αέρα σε κατάλληλη συγκέντρωση. Επομένως, η καύση και η έκρηξη μπορούν να αποτραπούν εάν:

- ❖ αποκλειστούν οι πηγές ανάφλεξης, ο αέρας και το οξυγόνο, ή
- ❖ αντί του οξυγόνου στο περιβάλλον υπάρχει αδρανές αέριο, ή
- ❖ το υγρό αποθηκευτεί σε κλειστό δοχείο ή σύστημα, ή
- ❖ περιοριστεί η ανάπτυξη της επικίνδυνης συγκέντρωσης των ατμών, με τον κατάλληλο αερισμό.

Τα αναφλέξιμα (combustible) και τα εύφλεκτα (flammable) υγρά θεωρείται πως περιλαμβάνουν ένα μεγάλο αριθμό. Το σημείο ζέσεως, η θερμοκρασία ανάφλεξης, η ταχύτητα εξάτμισης, το ανώτερο και το κατώτερο σημείο ανάφλεξης, η σχετική πυκνότητα των ατμών σε σχέση με τον αέρα και η ενέργεια που απαιτείται



για την ανάφλεξη των ατμών είναι οι βασικοί παράγοντες που μπορούν να παρέχουν πλήρεις πληροφορίες σχετικά με την ευαισθησία στην ανάφλεξη διαφόρων υγρών.

Σχεδόν σε όλο τον κόσμο, το σημείο ανάφλεξης είναι μια παράμετρος που προσδιορίζεται από μία τυπική δοκιμή υπό ατμοσφαιρικές συνθήκες και χρησιμοποιείται ως βάση για την ομαδοποίηση των υγρών σε κατηγορίες κινδύνου. Οι απαιτήσεις της ασφάλειας για την αποθήκευση υγρών, τον χειρισμό τους, τις τεχνολογικές διαδικασίες και τον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό που θα εγκατασταθεί στη ζώνη τους θα πρέπει να λάβει υπόψιν την κατηγορία ευφλεκτότητας και το καύσιμο. Επιπλέον, είναι αναγκαίο να προσδιορίζονται διάφορες ζώνες κινδύνου γύρω από τον τεχνολογικό εξοπλισμό για καθεμία από αυτές τις κατηγορίες [4].

1.4.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΥΦΛΕΚΤΩΝ ΥΓΡΩΝ

Τα εύφλεκτα υγρά (flammable liquids) είναι τα υγρά που έχουν σημείο ανάφλεξης μικρότερο από 100° F, δηλαδή 37.78° C, με βάση το Εθνικό Σύστημα Προστασίας των Πυρκαγιών (NFIRS). Τα εύφλεκτα χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- ❖ **Εύφλεκτα υγρά της κατηγορίας IA:** Τα υγρά αυτής της κατηγορίας έχουν σημείο ανάφλεξης μικρότερο από 73° F (22.78° C) και σημείο βρασμού μικρότερο από 100° F (37.78° C). Στην κατηγορία αυτή συμπεριλαμβάνονται ο αιθυλαιθέρας και το πεντάνιο.
- ❖ **Εύφλεκτα υγρά της κατηγορίας IB:** Τα υγρά αυτής της κατηγορίας έχουν σημείο ανάφλεξης μικρότερο από 73° F (22.78° C) και σημείο βρασμού ίσο ή μεγαλύτερο από 100 °F (37.78° C). Στην κατηγορία αυτή συμπεριλαμβάνονται η αιθυλική αλκοόλη και η μεθυλ-αιθυλικής κετόνης.
- ❖ **Εύφλεκτα υγρά της κατηγορίας IC:** Τα υγρά αυτής της κατηγορίας έχουν σημείο ανάφλεξης ίσο ή μεγαλύτερο από 73° F (22.78° C) και κάτω από 100° F (37.78° C). Στην κατηγορία αυτή συμπεριλαμβάνονται η βουτυλική αλκοόλη, η προπυλική αλκοόλη και η τερεβινθίνη.
- ❖ **Βενζίνη**



Πολλοί βιομηχανικοί διαλύτες είναι εύφλεκτα υγρά της κατηγορίας IB ή κατηγορίας IC, ενώ η βενζίνη αποτελεί μία ξεχωριστή υποκατηγορία των εύφλεκτων υγρών [5].

1.4.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΝΑΦΛΕΞΙΜΩΝ ΥΓΡΩΝ

Τα αναφλέξιμα υγρά (combustible liquids) έχουν σημείο ανάφλεξης ίσο ή μεγαλύτερο των 100 ° F (37.78° C) και χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- ❖ **Αναφλέξιμα υγρά της κατηγορίας II:** Τα αναφλέξιμα υγρά αυτής της κατηγορίας έχουν σημείο ανάφλεξης ίσο ή μεγαλύτερο από 100° F (37.78° C), αλλά μικρότερο από 140° F (60° C). Στην κατηγορία αυτή συμπεριλαμβάνονται η κηροζίνη, το καύσιμο ντίζελ, κάποια διαλυτικά χρωμάτων και κάποιοι βασικοί τύποι πετρελαίου οικιακής θέρμανσης.
- ❖ **Αναφλέξιμα υγρά της κατηγορίας IIIA:** Τα αναφλέξιμα υγρά αυτής της κατηγορίας έχουν σημείο ανάφλεξης ίσο ή μεγαλύτερο από 140° F (60° C), αλλά μικρότερο από 200° F (93.33° C). Στην κατηγορία αυτή συμπεριλαμβάνονται οι κύριοι τύποι του εμπορικού και του βιομηχανικού πετρελαίου θέρμανσης, το έλαιο βαμβακόσπορου και το έλαιο κρεοζώτου.
- ❖ **Αναφλέξιμα υγρά της κατηγορίας IIIB:** Τα αναφλέξιμα υγρά αυτής της κατηγορίας έχουν σημείο ανάφλεξης ίσο ή μεγαλύτερο από 200° F (93.33° C). Στην κατηγορία αυτή συμπεριλαμβάνονται τα έλαια μαγειρέματος, το λάδι του μετασχηματιστή και το λιπαντικό λάδι.

Ανάλογα με τη θέση (περιοχή) και την εποχή του έτους, τα διάφορα καύσιμα είναι δυνατόν να καταταχθούν σε οποιαδήποτε από τις παραπάνω κατηγορίες αναφλέξιμων υγρών.

Τέλος, υπάρχουν και υγρά που δεν ανήκουν ούτε στην κατηγορία των αναφλέξιμων ούτε στην κατηγορία των εύφλεκτων υγρών. Τα υγρά αυτά ενδεχομένως να αποτελούν μία ξεχωριστή κατηγορία ή να αποτελούν έναν άγνωστο τύπο των παραπάνω αναφλέξιμων ή εύφλεκτων υγρών.



Το αναφλέξιμα υγρά της κατηγορίας IIIB είναι υπεύθυνα για τις περισσότερες πυρκαγιές που προκαλούνται είτε από αναφλέξιμα είτε από εύφλεκτα υγρά. Επιπλέον, μεγάλη επικινδυνότητα παρουσιάζουν τα αναφλέξιμα υγρά της κατηγορίας II, τα υγρά που αναφέρθηκαν παραπάνω και δεν έχει προσδιοριστεί πλήρως η κατηγορία στην οποία ανήκουν και η βενζίνη. Τα αναφλέξιμα υγρά της κατηγορίας II θεωρούνται πως είναι κυρίως υπεύθυνα για πυρκαγιές που αναπτύσσονται σε σπίτια. Η εκτίμηση αυτή γίνεται διότι τα καύσιμα της οικιακής χρήσης ανήκουν κυρίως στην κατηγορία II των αναφλέξιμων υγρών, ενώ τα αναφλέξιμα υγρά της κατηγορίας IIIA είναι πιο πιθανόν να μην έχουν οικιακή χρήση. Η βενζίνη καταλαμβάνει την πρώτη θέση για την ανάπτυξη όλων των πυρκαγιών, κυρίως λόγω της ευρείας χρήσης της ιδιαίτερα στον τομέα των οχημάτων [5].

1.5 ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΑΕΡΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Αν και όλα τα υλικά υπό μία συγκεκριμένη θερμοκρασία και πίεση μπορούν να γίνουν αέρια, τα υλικά που θεωρούνται ως αέρια είναι αυτά που βρίσκονται σε κατάσταση αερίου σε ατμοσφαιρική πίεση και σε κανονική θερμοκρασία.

Όσον αφορά τους κινδύνους της πυρκαγιάς και της έκρηξης, τα αέρια μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες: εύφλεκτα και τα μη εύφλεκτα αέρια. Σύμφωνα με τον αποδεκτό ορισμό, τα εύφλεκτα αέρια είναι εκείνα που καίγονται στον αέρα με κανονική συγκέντρωση οξυγόνου, υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχουν οι απαραίτητες συνθήκες για την καύση. Η ανάφλεξη πραγματοποιείται μόνο πάνω από μια ορισμένη θερμοκρασία και μέσα σε ένα δεδομένο εύρος συγκέντρωσης.

Τα μη εύφλεκτα αέρια είναι αυτά που δεν καίγονται ούτε σε οξυγόνο ούτε στον αέρα σε οποιαδήποτε συγκέντρωση. Κάποια από αυτά τα αέρια είναι δυνατόν να βοηθήσουν την καύση (π.χ. οξυγόνο), ενώ κάποια άλλα είναι δυνατόν να αναστείλλουν την καύση. Τα μη εύφλεκτα αέρια που αναστέλλουν την καύση ονομάζονται αδρανή αέρια (άζωτο, ευγενή αέρια, διοξείδιο του άνθρακα κλπ.).



Προκειμένου να επιτευχθεί η οικονομική απόδοση, τα αέρια που αποθηκεύονται και μεταφέρονται σε δοχεία ή δοχεία μεταφοράς είναι συνήθως σε συμπιεσμένη, υγροποιημένη ή ψυχρή συμπυκνωμένη (κρυογονική) κατάσταση. Υπάρχουν δύο επικίνδυνες καταστάσεις σε σχέση με τα αέρια: όταν βρίσκονται στα δοχεία και όταν απελευθερώνονται από τα δοχεία τους.

Συγκεκριμένα, για τα συμπιεσμένα αέρια που βρίσκονται σε δοχεία αποθήκευσης, η εξωτερική θερμότητα μπορεί να αυξήσει σημαντικά την πίεση μέσα στο δοχείο και η υπερβολική υπερπίεση μπορεί να οδηγήσει σε έκρηξη. Τα δοχεία αποθήκευσης αερίων περιλαμβάνουν την φάση ατμού και την υγρή φάση. Λόγω των μεταβολών της πίεσης και της θερμοκρασίας, η επέκταση της υγρής φάσης προκαλεί την περαιτέρω συμπίεση του χώρου του ατμού, ενώ η τάση ατμών του υγρού αυξάνεται αναλογικά με την αύξηση της θερμοκρασίας. Ως αποτέλεσμα αυτών των διαδικασιών, μπορεί να παραχθεί η κρίσιμη επικίνδυνη πίεση. Στα δοχεία αποθήκευσης αερίων απαιτείται η εφαρμογή διατάξεων εκτόνωσης πίεσης. Αυτές οι διατάξεις είναι ικανές να μετριάσουν μια επικίνδυνη κατάσταση που μπορεί να προκληθεί λόγω υψηλότερων θερμοκρασιών.

Αν τα δοχεία αποθήκευσης δεν είναι επαρκώς σφραγισμένα ή έχουν υποστεί ζημιά, το αέριο θα απελευθερωθεί στο περιβάλλον, θα αναμειχθεί με τον αέρα και ανάλογα με την ποσότητα και τον τρόπο ροής του, μπορεί να προκαλέσει το σχηματισμό ενός μεγάλου εκρηκτικού χώρου. Ο αέρας γύρω από ένα διαρρέον δοχείο αποθήκευσης είναι ακατάλληλος για εισπνοή και μπορεί να είναι επικίνδυνος για τους γύρω ανθρώπους, τόσο λόγω της τοξικής επίδρασης ορισμένων αερίων όσο και λόγω της αραιωμένης συγκέντρωσης του οξυγόνου.

Λαμβάνοντας υπόψιν την εμφάνιση του ενδεχομένου της πυρκαγιάς που μπορεί να οφείλεται στα αέρια και την ανάγκη για ασφαλή λειτουργία, πρέπει να γνωρίζουμε λεπτομερώς κάποια βασικά χαρακτηριστικά των αερίων. Συγκεκριμένα, πρέπει να ληφθούν υπόψιν οι χημικές και φυσικές ιδιότητες των αερίων, η θερμοκρασία ανάφλεξης, τα κατώτερα και ανώτερα όρια αναφλεξιμότητας, οι επικίνδυνες παράμετροι του αερίου στο δοχείο, οι παράγοντες κινδύνου μίας



επικίνδυνης κατάστασης που μπορεί να προκληθεί από τα αέρια που εκλύονται στον ανοικτό αέρα, η έκταση των αναγκαίων ζωνών ασφαλείας και τα ειδικά μέτρα που πρέπει να λαμβάνονται σε μία περίπτωση έκτακτης ανάγκης που συνδέεται με πυρόσβεση [4].

1.5.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΥΦΛΕΚΤΩΝ ΑΕΡΙΩΝ

Τα κύρια εύφλεκτα αέρια που έχουν προσδιοριστεί από το Εθνικό Σύστημα Προστασίας των Πυρκαγιών (NFIRS) είναι:

- ❖ το φυσικό αέριο και
- ❖ το LP-αέριο, το οποίο περιλαμβάνει βουτάνιο και προπάνιο.

Το φυσικό αέριο είναι ελαφρύτερο από τον αέρα, ενώ το αέριο LP είναι βαρύτερο από τον αέρα.

Οι πυρκαγιές του φυσικού αερίου αποτελούν τις περισσότερες πυρκαγιές που έχουν διαπιστωθεί από οποιοδήποτε άλλο εύφλεκτο αέριο. Οι πυρκαγιές του αερίου LP είναι λιγότερες, αλλά έχουν προκαλέσει περισσότερους θανάτους. Τέλος, τα άλλα αέρια όπως το ακετυλένιο και το υδρογόνο έχουν εμφανίσει μικρότερες πυρκαγιές.

Στο αέριο LP οφείλονται διάφορες οικιακές πυρκαγιές που προκαλούνται σε εξωτερικούς χώρους, λόγω της χρήσης του. Οι οικίες που χρησιμοποιούν LP αέριο για τις ανάγκες τους είναι σημαντικά περισσότερες από αυτές που χρησιμοποιούν φυσικό αέριο. Οι πυρκαγιές από την χρήση του αερίου LP είναι περισσότερες από τις πυρκαγιές που έχουν αναφερθεί από την χρήση φυσικού αερίου. Επομένως, ο κίνδυνος από την χρήση του αερίου LP κρίνεται σημαντικά μεγαλύτερος. Βέβαια, αξίζει να αναφερθεί ότι οι χρήσεις των δύο αερίων είναι σημαντικά διαφορετικές και αυτό μπορεί να αντανακλά σε διαφορές του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού.

Άλλα αέρια που έχουν διαπιστωθεί σε άλλες κατηγορίες από το Εθνικό Σύστημα Προστασίας των Πυρκαγιών (NFIRS) είναι:

- ❖ το αέριο ακετυλένιο και



❖ το υδρογόνο [5].

Το υδρογόνο είναι εύφλεκτο σε συγκεντρώσεις μεταξύ 4% και 75% στον αέρα. Το εύρος αυτό είναι αρκετά μεγάλο σε σύγκριση με άλλα κοινά καύσιμα. Η συγκέντρωση του υδρογόνου είναι δυνατόν να φθάσει εύκολα στο κατώτερο όριο ανάφλεξης (4%) εάν εμφανιστεί μία διαρροή υδρογόνου σε έναν περιορισμένο χώρο χωρίς αερισμό. Η εμφάνιση μίας εξωτερικής διαρροής υδρογόνου είναι πιθανόν να προκαλέσει την διάχυσή του.

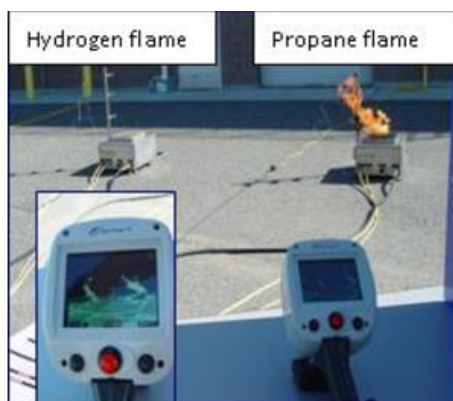
Το υδρογόνο καίγεται με μια απαλή μπλε φλόγα που είναι σχεδόν αόρατη κατά τη διάρκεια της ημέρας, επομένως οι πυρκαγιές του υδρογόνου είναι σχεδόν αδύνατο να παρατηρηθούν με γυμνό μάτι. Επιπλέον, οι πυρκαγιές του υδρογόνου έχουν χαμηλή ακτινοβολούμενη θερμότητα και δεν παράγουν καπνό, έτσι δεν μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτή η παρουσία της φλόγας εκτός και εάν η απόσταση από αυτήν είναι αρκετά μικρή. Η φλόγα του υδρογόνου είναι δυνατόν να πάρει ένα κίτρινο χρώμα σε περίπτωση που εμφανιστούν ακαθαρσίες στον αέρα όπως σκόνη ή νάτριο. Για την εμφάνιση της καύσης του υδρογόνου απαιτείται οξυγόνο (αέρας) και πηγή ανάφλεξης, άρα η καύση δεν είναι δυνατόν να συμβεί σε μία δεξαμενή που περιέχει μόνο υδρογόνο.

Λόγω των ιδιοτήτων των φλογών υδρογόνου που αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ένα φορητός ανιχνευτής φλόγας, όπως μία θερμική κάμερα απεικόνισης για την ανίχνευση της φλόγας υδρογόνου. Στην περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμος ένας εξοπλισμός ανίχνευσης της φλόγας υδρογόνου μπορεί να γίνει ανίχνευση της διαρροής του υδρογόνου ή των θερμικών κυμάτων που μπορούν να προκύψουν.

Οι ανιχνευτές της διαρροής του υδρογόνου χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις αποθήκευσης όπου η ανάφλεξη του αερίου είναι συχνή. Επιπλέον, οι ανιχνευτές της φλόγας του υδρογόνου χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις αποθήκευσης και σε σταθμούς ανεφοδιασμού εκπέμποντας ηχητικούς και οπτικούς συναγερμούς.

Οι πιθανές πηγές ανάφλεξης μίας πυρκαγιάς υδρογόνου μπορεί να είναι:

- ❖ **Ηλεκτρικές**, οι πηγές αυτές μπορεί να είναι είτε πηγές στατικού ηλεκτρισμού είτε προέρχονται από την λειτουργία ενός εξοπλισμού.
- ❖ **Μηχανικές**, οι πηγές αυτές προκύπτουν από κρούσεις, από εμφάνιση τριβής μεταξύ επιφανειών και από διάφορες θραύσεις που είναι πιθανόν να προκύψουν σε μέταλλα.
- ❖ **Θερμικές**, οι πηγές αυτές μπορεί να είναι μία ανοικτή φλόγα, ένα θερμαινόμενο αέριο υψηλής ταχύτητας, θερμές επιφάνειες και η εξάτμιση ενός οχήματος.
- ❖ **Χημικές**, οι πηγές αυτές μπορεί να είναι είτε καταλύτες είτε διάφορα αντιδραστήρια [6].



Εικόνα 1.2 Φλόγες υδρογόνου και προπανίου στο φως της ημέρας [6].

Το ακετυλένιο (ή αιθίνιο) είναι ένα εξαιρετικά εύφλεκτο αέριο και διαφέρει από τα άλλα αέρια καύσιμα λόγω της πολύ ασταθούς φύσης του. Το ακετυλένιο είναι επίσης ένας πολύ σοβαρός ατμοσφαιρικός ρύπος. Το ακετυλένιο αποθηκεύεται συνήθως σε κυλίνδρους. Οι κύλινδροι του ακετυλενίου πρέπει να χρησιμοποιούνται με μεγάλη προσοχή. Όλοι οι κύλινδροι των αερίων είναι δυνητικά επικίνδυνοι όταν εκτίθενται σε φωτιά και μπορούν να εκραγούν. Οι κύλινδροι του ακετυλενίου αντιδρούν διαφορετικά από άλλους κυλίνδρους αερίων μετά την έκθεσή τους σε πυρκαγιά λόγω της χημικής αντίδρασης της αποσύνθεσης που λαμβάνει χώρα. Αυτή η αντίδραση εκλύει μεγάλη θερμότητα η οποία, εάν δεν είναι ελεγχόμενη, μπορεί να



προκαλέσει την επιτάχυνση της αντίδρασης με αποτέλεσμα την ρήξη του κυλίνδρου, ακόμη και μετά την εξώθηση της φωτιάς.

Η οξυ-ακετυλениκή συγκόλληση είναι μια διαδικασία που βασίζεται στην καύση του οξυγόνου και του ακετυλενίου. Το ακετυλένιο έχει χρησιμοποιηθεί στη συγκόλληση χάλυβα και σε άλλες διαδικασίες θερμικής επεξεργασίας για πολλά χρόνια. Το μίγμα οξυγόνου και ακετυλενίου χρησιμοποιείται επειδή είναι ο μοναδικός συνδυασμός αερίων με αρκετή θερμότητα για την συγκόλληση χάλυβα. Ωστόσο, στις περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές η οξυακετυλениκή συγκόλληση έδωσε θέση σε άλλες μεθόδους [7].

Ένας κύλινδρος ακετυλενίου έχει διαφορετικό σχεδιασμό από τους κύλινδρους άλλων αερίων. Ο κύλινδρος ακετυλενίου αποτελείται από ένα χαλύβδινο κέλυφος που περιέχει πορώδη μάζα. Το αέριο του ακετυλενίου μέσα στον κύλινδρο αποσυντίθεται σε ακετόνη. Η αποσύνθεση του ακετυλενίου ενεργοποιείται από την παροχή θερμότητας. Η πορώδης μάζα του κυλίνδρου επιβραδύνει την αποσύνθεση του αερίου, με αποτέλεσμα αυτή να διαρκεί αρκετές ώρες. Αυτό το πλεονέκτημα δίνει χρόνο για την δράση των συνθηκών έκτακτης ανάγκης. Η αποσύνθεση του αερίου μπορεί να δράσει ταχύτερα εάν:

- ❖ Η πορώδης μάζα έχει καταστραφεί από επαναλαμβανόμενες επιστροφές της φλόγας (flashbacks).
- ❖ Ο κύλινδρος έχει υποστεί κάποιες βλάβες ή έχει πέσει.
- ❖ Η βαλβίδα του κυλίνδρου έχει διαρροή.
- ❖ Το ακετυλένιο μέσα στο σωλήνα βρίσκεται πάνω από την πίεση που συνιστά ο κατασκευαστής.

Το φαινόμενο της επιστροφής φλόγας (flashback) είναι δυνατόν να λάβει χώρα όταν ένα εύφλεκτο μίγμα αερίου καυσίμου και οξυγόνου βρίσκεται μέσα στον σωλήνα του κυλίνδρου που περιέχει το ακετυλένιο. Αυτό μπορεί να αναφλέξει το μίγμα και να το οδηγήσει πίσω στον κύλινδρο. Η επιστροφή της φλόγας (flashback) μπορεί να προκαλέσει την αποσύνθεση του ακετυλενίου [8].



Τέλος, υπάρχει η κατηγορία με <<άλλα> εύφλεκτα αέρια, η οποία θα μπορούσε να περιλαμβάνει οποιαδήποτε από τα αέρια είναι εύφλεκτα και δεν αναφέρονται παραπάνω.

1.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- ❖ Η καύση είναι η χημική αντίδραση του οξυγόνου με ένα καύσιμο κατά την οποία απαιτείται η παροχή θερμότητας μέσω κάποιας πηγής για την έναρξή της. Τα καύσιμα είναι δυνατόν να είναι στερεά, υγρά ή αέρια. Τα στάδια ανάπτυξης μίας πυρκαγιάς είναι η ανάφλεξη, η ανάπτυξη, η πλήρως ανεπτυγμένη φλόγα και η εξάντληση. Επιπλέον, η εξάπλωση μίας πυρκαγιάς γίνεται μέσω αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η κατάσβεση μίας πυρκαγιάς χρησιμοποιούνται διάφοροι τρόποι όπως είναι η ψύξη του καυσίμου, ο αποκλεισμός του οξυγόνου, η απομάκρυνση του καυσίμου και η διακοπή της χημικής αντίδρασης. Ωστόσο, κατά την ανάπτυξη της πυρκαγιάς είναι πιθανόν να συμβούν και ορισμένα ανεπιθύμητα φαινόμενα όπως το κύλισμα της πυρκαγιάς (rollover), η καθολική ανάφλεξη της πυρκαγιάς (flashover) και η εμφάνιση του οπίσθιου ρεύματος (backdraft).
- ❖ Η καύση είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί είτε με φλόγες διάχυσης είτε με προανεμιγμένες φλόγες. Οι φλόγες διάχυσης δημιουργούνται στις περιοχές όπου το αέριο καύσιμο και ο αέρας αναμειγνύονται με διεργασίες διάχυσης. Αντίθετα, οι προανεμιγμένες φλόγες δημιουργούνται όταν το αέριο καύσιμο και ο αέρας έχουν αναμειχθεί καλά πριν την καύση και πραγματοποιείται μία προκαταρκτική καύση. Τέλος, οι πυρκαγιές είναι πιθανόν να καταταχθούν σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με το καύσιμο που χρησιμοποιείται.
- ❖ Τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται στις πυρκαγιές είναι στερεά, υγρά ή αέρια. Αυτές οι κατηγορίες καυσίμων περιλαμβάνουν διάφορες υποκατηγορίες οι οποίες σχετίζονται είτε με το σημείο ανάφλεξης των καυσίμων είτε με την συχνότητα εμφάνισης πυρκαγιών των καυσίμων. Τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται σε μεγαλύτερο ποσοστό είναι τα υγρά καύσιμα.

2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ-ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΣΕ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΥΓΡΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι πυρκαγιές σε περιορισμένες λεκάνες υγρού καυσίμου (pool fires) αλλά και σε μεγάλες δεξαμενές υγρού καυσίμου (tank fires) μπορούν να προκαλέσουν πολλές καταστάσεις. Η γνώση αυτών των καταστάσεων μπορεί να καθορίσει το μέγεθος της βλάβης που μπορεί να προκληθεί και την ταχύτητα με την οποία πρέπει να γίνει η εφαρμογή των μέτρων πυροπροστασίας. Οι πυρκαγιές σε περιορισμένες λεκάνες υγρού καυσίμου (pool fires) έχουν καθορισμένες διαστάσεις και μπορούν να προκύψουν από την απώλεια κάποιας ποσότητας του περιεχομένου της δεξαμενής κατά την μεταφορά. Οι διαστάσεις των πυρκαγιών αυτών μπορούν να καλύψουν ένα μεγάλο εύρος, του οποίου το ανώτατο όριο μπορεί να προβλεφθεί. Από την άλλη πλευρά, οι πυρκαγιές σε μεγάλες δεξαμενές (tank fires) συμβαίνουν υπό χειρότερες συνθήκες και οι διαστάσεις τους είναι ορισμένες. Η ανάγκη για να εκτιμηθεί ο κίνδυνος της θερμικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από αυτές τις πυρκαγιές είναι πολύ σημαντικός στα πλαίσια του ορισμού της κατάστασης έκτακτης ανάγκης και του προσδιορισμού των επιπτώσεων των πυρκαγιών αυτών στο περιβάλλον [9].



Εικόνα 2.1 Πυρκαγιά σε όλη την επιφάνεια μίας δεξαμενής αποθήκευσης (tank fire) που βρίσκεται σε μία έκταση αποθήκευσης πετρελαίου [10].



2.2 ΤΑ ΕΙΔΗ ΤΩΝ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ

Οι δεξαμενές μπορούν να περιγραφούν από τον τύπο της οροφής τους: σταθερής οροφής, εσωτερικής (καλυμμένης) πλωτής οροφής, εξωτερικής (ανοικτής) πλωτής οροφής και εξωτερικής θολωτής οροφής. Ο τύπος της δεξαμενής αποθήκευσης που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση των εύφλεκτων (flammable) και των αναφλέξιμων (combustible) υγρών εξαρτάται από τα φυσικά χαρακτηριστικά του αποθηκευμένου προϊόντος και την τοποθεσία της δεξαμενής. Τα αναφλέξιμα (combustible) υγρά τυπικά αποθηκεύονται σε μεγάλες δεξαμενές με κωνική οροφή, σε μικρότερες δεξαμενές κάθετες ή οριζόντιες χαμηλής πίεσης, ή σε υπόγειες δεξαμενές. Τα εύφλεκτα (flammable) υγρά συνήθως αποθηκεύονται σε μεγάλες ποσότητες σε δεξαμενές ανοικτής ή εσωτερικής πλωτής οροφής, σε μικρές κάθετες ή οριζόντιες δεξαμενές χαμηλής πίεσης, ή σε υπόγειες δεξαμενές.

❖ Δεξαμενές σταθερής οροφής

Οι δεξαμενές σταθερής οροφής είναι κάθετοι, χαλύβδινοι κύλινδροι με μονίμως στεγασμένη οροφή. Στις πετροχημικές βιομηχανίες και στις βιομηχανίες πετρελαίου οι οροφές είναι επίπεδες ή ελαφρώς θολωτές για να αποτραπεί η συσσώρευση νερού. Στην περίπτωση εμφάνισης ενός ατυχήματος από την υπερπίεση που μπορεί να προκληθεί στο εσωτερικό μίας δεξαμενής λόγω της εμφάνισης μίας εξωτερικής έκρηξης ή μιας παρόμοιας κατάστασης, είναι πιθανό να προκληθεί ο διαχωρισμός της οροφής της δεξαμενής αυτής από το κατακόρυφο κέλυφός της προκειμένου να αποτραπεί η βλάβη στον πυθμένα της δεξαμενής και η πιθανή εκτόξευση της δεξαμενής προς τα πάνω.

Αυτές οι δεξαμενές μπορούν να είναι μονωμένες και να χρησιμοποιούνται για να αποθηκεύονται διάφορα υγρά όπως είναι η άσφαλτος, καύσιμα κίνησης και άλλα βαρέα και ιξώδη υγρά. Οι δεξαμενές σταθερής κωνικής οροφής περιλαμβάνουν την δυνατότητα εξαερισμού κατά την φόρτωση, την εκφόρτωση και κατά την διάρκεια των ακραίων μεταβολών της θερμοκρασίας. Ο εξαερισμός γίνεται μέσα από τις οπές εξαερισμού. Ανάλογα με τη θέση των δεξαμενών μέσα σε μία κοινότητα, τα ανοίγματα των οπών μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για περιβαλλοντικούς



ελέγχους όσο και για την εκτροπή των φλογών κατά την διάρκεια ανεξέλεγκτων εκπομπών.

❖ Δεξαμενές εσωτερικής (καλυμμένης) πλωτής οροφής

Οι δεξαμενές εσωτερικής (καλυμμένης) πλωτής οροφής έχουν μία μόνιμη σταθερή οροφή η οποία περιέχει μία πλωτή οροφή στο εσωτερικό της. Οι δεξαμενές εσωτερικής (καλυμμένης) πλωτής οροφής συνήθως έχουν κατακόρυφα στηρίγματα μέσα στην δεξαμενή προκειμένου να παρέχουν στήριξη στην σταθερή οροφή ή έχουν σταθερές οροφές που στηρίζονται αυτόνομα.

Η σταθερή οροφή έχει σχεδιαστεί με ανοιγμάτα προκειμένου να επιτρέπει τον εξαερισμό του τμήματος που βρίσκεται πάνω από την εσωτερική πλωτή οροφή με αποτέλεσμα η συγκέντρωση των ατμών του καυσίμου να διατηρείται κάτω από τα όρια αναφλεξιμότητας. Η περιοχή ανάμεσα στο κέλυφος της δεξαμενής και στην εσωτερική πλωτή οροφή έχει έκταση από ένα μέχρι και τέσσερα πόδια και ενδεχομένως να είναι η αιτία για την εμφάνιση ορισμένων πυρκαγιών. Αυτές οι δεξαμενές χρησιμοποιούνται τυπικά για την αποθήκευση εξαιρετικά εύφλεκτων υλικών όπως η βενζίνη.

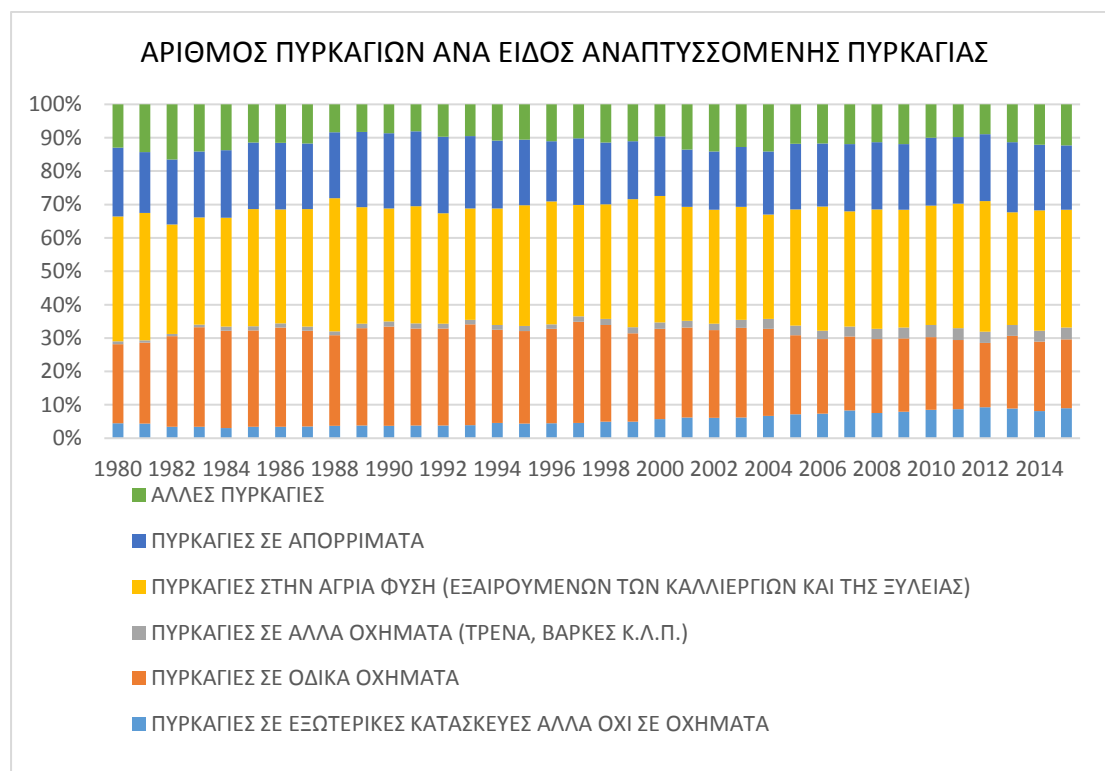
❖ Δεξαμενές εξωτερικής (ανοικτής) πλωτής οροφής

Οι δεξαμενές εξωτερικής (ανοικτής) πλωτής οροφής είναι ατσάλινοι, κατακόρυφοι κύλινδροι με μία οροφή που πλέει πάνω στην επιφάνεια του υγρού της δεξαμενής και είναι ανοικτή στην ατμόσφαιρα, δηλαδή δεν περιλαμβάνει μία σταθερή οροφή από πάνω της. Η μόνη βασική διαφορά ανάμεσα στις δεξαμενές εσωτερικής (καλυμμένης) πλωτής οροφής και στις δεξαμενές εξωτερικής (ανοικτής) πλωτής οροφής είναι η παρουσία της σταθερής οροφής για την προστασία τους από την ατμόσφαιρα. Όπως και οι δεξαμενές εσωτερικής (καλυμμένης) πλωτής οροφής, έτσι και οι δεξαμενές εξωτερικής (ανοικτής) πλωτής οροφής, είναι δεξαμενές που έχουν επίπεδα τα οποία πλέουν πάνω στην επιφάνεια του υγρού. Η οροφή αυτών των δεξαμενών ανεβαίνει και κατεβαίνει με την μεταβολή του επιπέδου του υγρού.

❖ Θολωτές δεξαμενές με εσωτερική (καλυμμένη) πλωτή οροφή

Οι δεξαμενές αυτές λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο με τις δεξαμενές εσωτερικής (καλυμμένης) πλωτής οροφής. Συγκεκριμένα, οι θολωτές δεξαμενές με εσωτερική (καλυμμένη) πλωτή οροφή δημιουργήθηκαν από την αναπροσαρμογή μίας θολωτής οροφής σε μία υπάρχουσα δεξαμενή εξωτερικής οροφής. Οι θολωτές δεξαμενές με εσωτερική (καλυμμένη) πλωτή οροφή συχνά αναφέρονται ως θολωτές γεωδαιτικές δεξαμενές. Ο κύριος σκοπός του θόλου είναι να παρέχει προστασία της δεξαμενής, αλλά παρέχει επίσης περιβαλλοντικό έλεγχο των εκπομπών. Κατά τη διάρκεια των πρώτων σταδίων των διαδικασιών πυρόσβεσης σε αυτές τις δεξαμενές, τα πάνελ μπορούν να λιώσουν με αποτέλεσμα το πλαίσιο στήριξης να είναι το μόνο εμπόδιο για την πυρόσβεση. Καθώς η φωτιά συνεχίζει να καίει το πλαίσιο στήριξης είναι πιθανόν να διπλώσει και να καταρρεύσει [11].

2.3 ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ ΣΕ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ



Διάγραμμα 2.1 Η εξέλιξη της εμφάνισης των πυρκαγιών ανά είδος αναπτυσσόμενης πυρκαγιάς σε πυρκαγιές που αναπτύχθηκαν στις Η.Π.Α. [12]



Τα στοιχεία για την δημιουργία του παραπάνω διαγράμματος προέκυψαν από το επίσημο site της NFPA [12]. Σύμφωνα με το διάγραμμα αυτό προκύπτει πως τα μεγαλύτερα ποσοστά πυρκαγιών στις ΗΠΑ εμφανίζονται στην άγρια φύση και στα οδικά οχήματα. Ένα εξίσου σημαντικό ποσοστό πυρκαγιών αναπτύσσεται στα απορρίμματα, ενώ εξαιρετικά μικρά είναι τα ποσοστά των πυρκαγιών που αναπτύσσονται σε εξωτερικές κατασκευές αλλά όχι σε οχήματα και των πυρκαγιών που αναπτύσσονται σε άλλα οχήματα, όπως τρένα και βάρκες. Οι πυρκαγιές σε δεξαμενές υγρών καυσίμων ανήκουν στις πυρκαγιές που αναπτύσσονται σε εξωτερικές κατασκευές αλλά όχι σε οχήματα. Κατά την πάροδο των χρόνων από το 1980 έως και το 2015 προκύπτει πως οι πυρκαγιές αυτές εμφανίζουν το μικρότερο ποσοστό. Το ποσοστό τους, ωστόσο, φαίνεται να αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου. Δεδομένου ότι οι πυρκαγιές που αναπτύσσονται σε δεξαμενές υγρών καυσίμων είναι ένα τμήμα των πυρκαγιών που αναπτύσσονται σε εξωτερικές κατασκευές άγεται το γενικό συμπέρασμα πως οι πυρκαγιές που αναπτύσσονται σε δεξαμενές υγρών καυσίμων αποτελούν ένα εξαιρετικά μικρό ποσοστό του συνολικού αριθμού των πυρκαγιών που αναπτύσσονται ανά έτος.

Η Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (USEPA) [13] διεξήγαγε μια μελέτη για να διερευνήσει τις πιο κοινές αιτίες βλάβης μίας δεξαμενής. Από την μελέτη αυτή προέκυψε πως ένας σημαντικός παράγοντας για την εμφάνιση μίας βλάβης σε μία δεξαμενή είναι το ανθρώπινο λάθος. Η μελέτη που διεξήχθη κάλυπτε μία δεκαετή περίοδο (1990-2000), από όπου προέκυψε πως ο αριθμός των ατυχημάτων σε εγκαταστάσεις μακροπρόθεσμης αποθήκευσης παραμένει σχετικά σταθερός. Από τα 312 ατυχήματα στα δεξαμενόπλοια που εξετάστηκαν κατά την περίοδο αυτή διαπιστώθηκε ότι το σφάλμα του ανθρώπινου φορέα αντιπροσώπευε το ποσοστό 22% των ατυχημάτων. Επιπλέον, το 55% των ατυχημάτων αποδόθηκε σε βλάβη της δεξαμενής, το 10% των ατυχημάτων σε βλάβη βαλβίδας, το 4% των ατυχημάτων σε βλάβη αντλίας και το 3% των ατυχημάτων σε βλάβη στην βιδωτή τοποθέτηση της δεξαμενής. Το ανθρώπινο λάθος αντιστοιχούσε επίσης στο 100% των ατυχημάτων που οδήγησαν σε θανάτους και στο 88% των ατυχημάτων που συνεπάγονταν βλάβη σε κάποια περιουσία. Το ανθρώπινο λάθος εμφανιζόταν στην υπερπλήρωση της δεξαμενής ή στην δημιουργία υπερπίεσης.



Παρόλα αυτά, η δημιουργία βλάβης στις δεξαμενές αποθήκευσης μπορεί να αποδοθεί σε μία σειρά από αιτίες που μπορούν να συμπεριλαμβάνουν το ανθρώπινο σφάλμα, την κακή συντήρηση, την ανάφλεξη των ατμών, τον σεισμό, τον τυφώνα, τις ζημιές από πλημμύρες και την υπερπίεση. Τέτοιες καταστάσεις δείχνουν πόσο σημαντική είναι η ανάγκη για σωστή εκτίμηση των δυνητικών κινδύνων και η απαίτηση για την εφαρμογή μεθόδων εξομάλυνσης των φαινομένων. Παρακάτω περιγράφονται ορισμένα από τα βασικά ατυχήματα που έχουν λάβει χώρα σε δεξαμενές σε διάφορες περιοχές και σε διαφορετικές χρονικές περιόδους [13].

❖ **Νάπολη, Ιταλία 21 Δεκεμβρίου 1985**

Κατά τη διάρκεια της πλήρωσης της δεξαμενής, το καύσιμο ξεχείλισε από την πλωτή οροφή της δεξαμενής για περίπου μιάμιση ώρα. Εκτιμάται ότι 700 τόνοι καυσίμου διέφυγαν στο δευτερεύον περίβλημα της δεξαμενής. Η διαρροή σχημάτισε γρήγορα ένα σύννεφο ατμών, το οποίο άρχισε να αναφλέγεται. Η έκρηξη είχε ως αποτέλεσμα τον τραυματισμό πέντε ατόμων και την καταστροφή της εγκατάστασης. Είκοσι τέσσερις δεξαμενές καταστράφηκαν από την φωτιά, ενώ εμφανίστηκαν βλάβες σε πολλές σωληνώσεις. Το γεγονός αυτό συνέβαλε στην ανάπτυξη της φωτιάς και στην απώλεια ελέγχου της πυρκαγιάς από το κέντρο ελέγχου της πυρόσβεσης.

❖ **Pennsylvania, Η.Π.Α. 16 Οκτωβρίου 1995**

Πέντε εργαζόμενοι σκοτώθηκαν όταν δύο δεξαμενές εξερράγησαν σε ένα διυλιστήριο. Συγκεκριμένα, κατά την διάρκεια μίας διαδικασίας συγκόλλησης σε ένα τμήμα του διυλιστηρίου ανάμεσα σε δύο δεξαμενές αποθήκευσης υγρών αποβλήτων, δημιουργήθηκε μία βλάβη στο κέλυφος του πυθμένα μίας δεξαμενής και το κέλυφος αυτό απομακρύνθηκε από τη δεξαμενή ως αποτέλεσμα της ταχείας υπερπίεσης που είχε προκληθεί από την ανάφλεξη των εύφλεκτων ατμών της δεξαμενής. Το περιεχόμενο της δεξαμενής απελευθερώθηκε στιγμιαία αναφλέγοντας το περιεχόμενο της δεύτερης δεξαμενής, το οποίο τελικά εξερράγη απελευθερώνοντας το σύνολο του περιεχομένου της. Δεν υπήρχε δευτερεύον περίβλημα γύρω από αυτές τις δεξαμενές με αποτέλεσμα το κύμα της καύσης του υγρού περιεχομένου τους να εξαπλωθεί γρήγορα σε όλη την περιοχή προκαλώντας



βλάβη σε δεκατρείς δεξαμενές αποθήκευσης. Επιπλέον, προέκυψε η ανάφλεξη άλλων πέντε δεξαμενών με αποτέλεσμα την απώλεια 95,000 γαλονιών διαλυτών και μαζούτ.

❖ **Delaware, Η.Π.Α. 17 Ιουλίου 2001**

Ένας εργαζόμενος σκοτώθηκε και οκτώ τραυματίστηκαν, όταν εξερράγη μια μεγάλη δεξαμενή θειικού οξέος. Η έκρηξη προέκυψε από τους σπινθήρες που δημιουργήθηκαν σε ένα διάδρομο εργασίας που βρισκόταν πάνω από αρκετές δεξαμενές και εισήλθαν στην δεξαμενή διαμέσου των οπών που είχαν προκληθεί λόγω διάβρωσης. Λόγω της επακόλουθης ανάφλεξης των εύφλεκτων ατμών, το περίβλημα της δεξαμενής απομακρύνθηκε και ένας σημαντικός όγκος θειικού οξέος απελευθερώθηκε στο περιβάλλον. Άμεσο αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η δημιουργία εκτεταμένων περιβαλλοντικών βλαβών, συμπεριλαμβανομένης της μεγάλης ποσότητας θειικού οξέος που εισήλθε στον ποταμό Delaware σκοτώνοντας χιλιάδες ψάρια και άλλα άγρια ζώα. Οι οικονομικές αποζημιώσεις που καταβλήθηκαν για τις βλάβες που δημιουργήθηκαν περιλάμβαναν σημαντικά ποσα.

❖ **Βέλγιο, 25 Οκτωβρίου 2004**

Μια δεξαμενή αποθήκευσης καταστράφηκε ολοκληρωτικά απελευθερώνοντας 37,000 m³ αργού πετρελαίου, το γεγονός αυτό προέκυψε από έναν συνδυασμό παραγόντων. Από επτά δεξαμενές που βρίσκονταν στο ίδιο φράγμα με την δεξαμενή που υπέστη βλάβη μόνο τρεις βρίσκονταν σε λειτουργία κατά την διάρκεια του συμβάντος, ενώ κατά την απελευθέρωση της ποσότητας αργού πετρελαίου από την δεξαμενή που είχε υποστεί βλάβη ενεργοποιήθηκε ο συναγερμός που υποδήλωνε την χαμηλή στάθμη του περιεχομένου της. Το περιστατικό αυτό ξεκίνησε ως μία μικρή απώλεια του περιεχομένου της δεξαμενής και γρήγορα εξελίχθηκε σε μία σημαντική βλάβη με πλήρη απώλεια του περιεχομένου της εντός δεκαπέντε λεπτών από την ηχητική ειδοποίηση του συναγερμού. Η απελευθέρωση του περιεχομένου της δεξαμενής από την βάση της ήταν αρκετά ισχυρή ώστε να προκαλέσει την μετατόπιση της δεξαμενής και την δημιουργία κλίσης της δεξαμενής λόγω της διάβρωσης της εγκατάστασης.



Η κύρια αιτία της βλάβης εντοπίστηκε στην διαδικασία κατασκευής της δεξαμενής, ενώ παρόμοιες βλάβες εντοπίστηκαν αργότερα στις υπόλοιπες γειτονικές δεξαμενές. Οι δεξαμενές είχαν τοποθετηθεί πάνω σε μία βάση από άμμο με ένα εξωτερικό δακτύλιο συμπιεσμένου θρυμματισμένου βράχου που λειτουργούσε ως θεμέλιο. Αυτή η κάλυψη του στρώματος της άμμου στις βάσεις των δεξαμενών δημιουργήθηκε για να επιτρέψει την πιθανή ροή του νερού στην περιοχή αυτή. Κατά την αρχική πλήρωση της δεξαμενής, λόγω των συνθηκών του μαλακού εδάφους, όλες οι δεξαμενές υπέστησαν καθίζηση η οποία είχε ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση των βάσεων. Αυτό επέτρεψε τη δημιουργία ροής νερού που παγιδεύτηκε από τα φρεάτια που βρίσκονταν γύρω από τις δεξαμενές. Στην δεξαμενή όπου προκλήθηκε η βλάβη η ροή του νερού που είχε παγιδευτεί είχε μήκος 35 μέτρα και πλάτος 0.2 μέτρα με αποτέλεσμα την δημιουργία μίας σοβαρής διάβρωσης που οδήγησε στην δημιουργία ενός ρήγματος.

❖ Louisiana, Η.Π.Α. 3 Σεπτεμβρίου 2005

Πολλά διυλιστήρια σταμάτησαν την παραγωγή πριν από τον τυφώνα Κατρίνα, ωστόσο, μετά τον τυφώνα αρκετά διυλιστήρια ανέφεραν την δημιουργία σημαντικών διαρροών. Το χειρότερο συμβάν παρουσιάστηκε στο διυλιστήριο Meraux. Μια δεξαμενή αποθήκευσης αργού πετρελαίου 65,000 bbl καταστράφηκε κατά τη διάρκεια της καταιγίδας και εκτιμήθηκε πως απελευθερώθηκαν 25,110 bbl πετρελαίου. Η ακριβής αιτία της βλάβης ήταν αβέβαιη. Θεωρήθηκε πως είτε προέκυψε ως άμεσο αποτέλεσμα της καταιγίδας, είτε λόγω της δύναμης του υλικού που διέφευγε από την δεξαμενή.

❖ (Buncefield) Hertfordshire, Ηνωμένο Βασίλειο 11 Δεκεμβρίου 2005

Μια δεξαμενή, που υπερπληρώθηκε μέσα σε πολλές ώρες με εκτιμώμενο ρυθμό 550 m³, υπερχείλισε δημιουργώντας τεράστιες ποσότητες ατμού. Η κατάσταση αυτή προέκυψε από την αποτυχία των οργάνων μέτρησης του υψηλού επιπέδου της δεξαμενής, καθώς δεν υπέδειξαν πως αυτή ήταν γεμάτη. Αυτή ήταν η δεύτερη μεγάλη καταστροφή που έλαβε χώρα σε λιγότερο από 10 μήνες, που προέκυψε από την δημιουργία υπερπίεσης σε δοχεία λόγω ελαττωματικών οργάνων.



Στην πρώτη περίπτωση η έκρηξη και η επακόλουθη ζημία συνέβη στο δυλιστήριο της BP στο Τέξας, όπου ένας πύργος απόσταξης είχε υπερβολική πίεση κατά την εκκίνηση της διεργασίας με αποτέλεσμα την δημιουργία 170 τραυματιών και την απώλεια 15 ζώων. Η καταστροφή στο Buncfield εκτιμάται ότι ξεπέρασε τα £ 10,000,000 σε αποθηκευμένα υλικά, εκτός από την καταστροφή στην ίδια την εγκατάσταση και την επίδραση στις γύρω επιχειρήσεις. Τέλος, προκλήθηκαν βλάβες σε τουλάχιστον 20 επιχειρήσεις που στεγάζονταν σε ένα κοντινό βιομηχανικό κτίριο με αποτέλεσμα να επηρεαστεί ο βιοπορισμός περίπου 500 ανθρώπων.

❖ **Mississippi, Η.Π.Α. 5 Ιουνίου 2006**

Τρεις εργολάβοι σκοτώθηκαν και ένας τραυματίστηκε σοβαρά σε έκρηξη και πυρκαγιά που έλαβαν χώρα σε μία περιοχή με πετρελαιοπηγές. Οι εργολάβοι βρίσκονταν πάνω σε ένα γερανό που ήταν τοποθετημένος πάνω από τέσσερις μονάδες παραγωγής πετρελαίου προετοιμάζοντας την συγκόλληση σωληνώσεων, όταν το εργαλείο της συγκόλλησης ανέφλεξε τους εύφλεκτους ατμούς σε μία δεξαμενή [13].

2.4 ΣΥΝΗΘΕΣΤΕΡΑ ΠΕΡΙΣΤΑΤΙΚΑ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ ΣΕ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ

Υπάρχουν ορισμένοι κίνδυνοι για την εμφάνιση πυρκαγιών που μπορούν να προκληθούν στους διάφορους τύπους των δεξαμενών. Αυτοί οι κίνδυνοι ποικίλλουν ως προς τον βαθμό σοβαρότητας από μία απλή πυρκαγιά μέχρι μία μεγάλη πυρκαγιά σε όλη την επιφάνεια της δεξαμενής. Τα πιο κοινά περιστατικά είναι δυνατόν να περιλαμβάνουν τα εξής:

❖ **Επιφανειακές φωτιές που προέρχονται από ξεχύλισμα υγρού καυσίμου (overfill ground fires)**

Οι επιφανειακές φωτιές που προέρχονται από ξεχύλισμα υγρού καυσίμου (overfill ground fires) προκύπτουν ως αποτέλεσμα της διαρροής από μία σωλήνωση ή από μία δεξαμενή. Πολλές φορές οι πυρκαγιές αυτές θεωρούνται πως είναι οι λιγότερο σοβαροί τύποι ενός ατυχήματος και μπορούν να προκύψουν από άλλες



αιτίες όπως είναι το σφάλμα ενός χειριστή, η δυσλειτουργία του εξοπλισμού. Στην περίπτωση διαρροής χωρίς ανάφλεξη είναι απαραίτητο να απομονωθούν όλες οι πηγές ανάφλεξης. Ωστόσο, εάν προκληθεί ανάφλεξη πρέπει να αντιμετωπιστεί η πυρκαγιά όπως θα γινόταν και στην περίπτωση μίας πυρκαγιάς σε μία μεγάλη δεξαμενή. Οι επιφανειακές φωτιές που προέρχονται από ξεχύλισμα (overfill ground fires) είναι αρκετά συχνές στην περίπτωση των δεξαμενών σταθερής, κωνικής οροφής, των δεξαμενών εσωτερικής πλωτής οροφής, των δεξαμενών εξωτερικής πλωτής οροφής και των δεξαμενών θολωτής οροφής.

❖ Φωτιές στον εξαερισμό των δεξαμενών (vent fires)

Οι φωτιές στον εξαερισμό των δεξαμενών (vent fires) τυπικά συνδέονται με τις δεξαμενές σταθερής οροφής, όπως οι δεξαμενές σε κωνικό σχήμα και οι δεξαμενές με εσωτερική πλωτή οροφή. Η κύρια αιτία αυτών των πυρκαγιών είναι μία φωτεινή ανάφλεξη που μπορεί να αναφλέξει του ατμούς που υπάρχουν στο στόμιο του εξαερισμού. Αυτές οι πυρκαγιές είναι λιγότερο σοβαρές και μπορούν να σβήσουν με ένα πυροσβεστήρα που περιέχει ένα ξηρό χημικό ή με μείωση της πίεσης της δεξαμενής.

❖ Φωτιές στο χείλος και σφράγισμα της δεξαμενής (rim seal fires)

Οι φωτιές στο χείλος και σφράγισμα της δεξαμενής (rim seal fires) περιλαμβάνουν μία μεγάλη πλειοψηφία πυρκαγιών που λαμβάνουν χώρα σε δεξαμενές εξωτερικής πλωτής οροφής, αλλά μπορούν να συμβούν και σε δεξαμενές εσωτερικής πλωτής οροφής ή σε δεξαμενές θολωτής οροφής. Όπως συμβαίνει στις περισσότερες πυρκαγιές σε δεξαμενές η ανάφλεξη είναι η κύρια αιτία έναρξης της πυρκαγιάς, ωστόσο στην περίπτωση των δεξαμενών με πλωτή οροφή ένα τεχνητό ηλεκτρικό φορτίο χωρίς την άμεση εμφάνιση σπίθας είναι πιθανό να προκαλέσει ανάφλεξη. Οι πυρκαγιές αυτές είναι πολύ συχνές, άρα υπάρχει ένα μεγάλο ποσοστό επιτυχίας για την κατάσβεσή τους. Ένα μεγάλο ποσοστό της επιτυχούς κατάσβεσης αυτών των πυρκαγιών αποδίδεται στην τοποθέτηση συστημάτων στεγανοποίησης στις δεξαμενές, όπως είναι οι θάλαμοι αφρού. Αυτά τα συστήματα πλήρους προστασίας ή ημιπροστασίας από την πυρκαγιά μπορούν να έχουν σημαντικές αποδόσεις



υποθέτοντας πως έχουν σχεδιαστεί σωστά, έχουν εγκατασταθεί καλά και λαμβάνει χώρα η συντήρησή τους.

Οι φωτιές στο χείλος και σφράγισμα της δεξαμενής (rim seal fires) εμφανίζουν περιορισμένες προκλήσεις ως προς την διαχείρισή τους. Αυτό σημαίνει πως η μόνη δυσκολία για την κατάσβεση μία τέτοιας πυρκαγιάς είναι η πρόσβαση στην περιοχή και η εφαρμογή των μέσων μαζικής πυρόσβεσης.

❖ **Πλήρης επιφανειακή φωτιά υγρού με εμπόδια (obstructed full liquid surface fires)**

Οι πυρκαγιές αυτές μπορούν να προκληθούν σε δεξαμενές με σταθερή κωνική οροφή, σε δεξαμενές με εσωτερική πλωτή οροφή ή σε δεξαμενές με εξωτερική πλωτή οροφή. Οι πυρκαγιές αυτές είναι δύσκολα διαχειρίσιμες επειδή η οροφή της δεξαμενής περιορίζει την πρόσβαση στην φλεγόμενη επιφάνεια. Η οροφή μπορεί να υποστεί καθίζηση για διάφορους λόγους, όπως είναι η αύξηση της πίεσης των ατμών στην εσωτερική πλωτή οροφή.

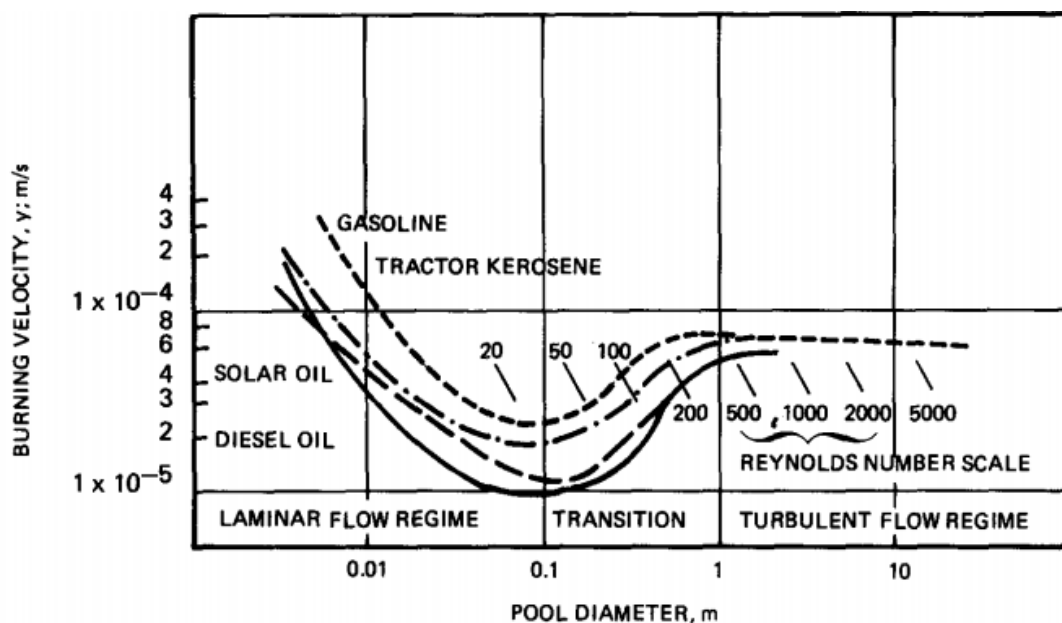
❖ **Πλήρης ανεμπόδιση επιφανειακή φωτιά υγρού (unobstructed liquid surface fires)**

Αυτές οι πυρκαγιές εμφανίζονται σε δεξαμενές όπου η διάμετρος είναι σχετικά μεγάλη (μικρότερη από 150 πόδια) και υπάρχει προσωπικό και επαρκείς πόροι για να αντιμετωπιστούν. Οι πιο δύσκολα διαχειρίσιμες πυρκαγιές είναι αυτές που περιλαμβάνουν μεγάλες δεξαμενές (μεγαλύτερες από 150 πόδια σε διάμετρο), επειδή η επιφάνεια της πυρκαγιάς είναι μεγάλη και απαιτείται μεγάλος αριθμός πόρων για τον έλεγχο και την κατάσβεση της πυρκαγιάς. Οι πυρκαγιές αυτές μπορούν να λάβουν χώρα σε δεξαμενές με σταθερή οροφή χωρίς εσωτερική οροφή, όπου και η οροφή της δεξαμενής μπορεί να διαχωριστεί από το υπόλοιπο τμήμα της δεξαμενής ως αποτέλεσμα μίας έκρηξης ή της εμφάνισης υπερπίεσης. Οι δεξαμενές με εξωτερική πλωτή οροφή είναι επιρρεπείς σε αυτά τα είδη των πυρκαγιών, οι οποίες μπορούν να προκληθούν κατά την διάρκεια ισχυρών βροχοπτώσεων. Στην περίπτωση των κλειστών οροφών, η οροφή είναι πιθανό να βυθιστεί αφήνοντας εκτεθειμένο το αποθηκευμένο υγρό [11].

2.5 ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΚΑΥΣΗΣ

2.5.1 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΤΗΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ

Οι Blinov και Khudiakov [14] μελέτησαν τις πυρκαγιές σε δεξαμενές υγρών υδρογονανθράκων για ένα μεγάλο εύρος διαμέτρων. Τα καύσιμα που χρησιμοποίησαν ήταν βενζίνη, ντίζελ, ηλιέλαιο και λάδι από οικιακά απόβλητα. Η καύση έλαβε χώρα σε κυλινδρικές λεκάνες (cylindrical pans) με διαμέτρους από 0.37 cm έως και 22.9 cm. Οι ταχύτητες καύσης μετρήθηκαν, ενώ λήφθηκαν φωτογραφίες των φλογών. Ο Hottel [15] συγκέντρωσε αυτά τα δεδομένα και έφτιαξε το Διάγραμμα 2.2.



Διάγραμμα 2.2 Ταχύτητες καύσης για πυρκαγιές διαφόρων υδρογονανθράκων [16].

Από το Διάγραμμα 2.2 γίνεται εμφανές ότι η ταχύτητα καύσης συναρτήσει της διαμέτρου της λεκάνης εμφανίζει την ίδια μορφή για όλα τα είδη των καυσίμων. Αρχικά, μειώνεται με σταθερή κλίση καθώς αυξάνεται η διάμετρος της λεκάνης. Σε αυτήν την περιοχή επικρατεί στρωτή ροή και ο αριθμός Reynolds είναι μικρότερος



από 20. Στην συνέχεια, παρατηρείται μείωση της ταχύτητας καύσης καθώς η διάμετρος της λεκάνης (ρ_{an}) συνεχίζει να αυξάνεται. Η απότομη αύξηση της ταχύτητας καύσης προκαλείται στο εύρος των αριθμών Reynolds από 20 έως 200. Η μέγιστη τιμή της ταχύτητας καύσης παρατηρείται όταν ο αριθμός Reynolds είναι ίσος με 500. Πάνω από αυτή την τιμή, η καύση είναι τυρβώδης και η ταχύτητα καύσης είναι ανεπηρέαστη από την διάμετρο της λεκάνης ή τον τύπο του καυσίμου [16].

Ωστόσο, οι πυρκαγιές που αναπτύσσονται σε μεγάλες δεξαμενές έχουν μεγάλο πρακτικό ενδιαφέρον. Η χρήση των μεγάλων δεξαμενών απλοποιεί σημαντικά την ανάλυση δεδομένων. Έτσι, η παρακάτω ανάλυση βασίστηκε σε δεξαμενές με διάμετρο μεγαλύτερη ή ίση με 0.2 m, εκτός από ορισμένα σημεία όπου διευκρινίζεται.

Ο Hottel [17] με βάση την αρχή διατήρησης ενέργειας στα υγρά ανέλυσε τα δεδομένα για την καύση των δεξαμενών. Έτσι, προέκυψε η σχέση:

$$\dot{m}'' \Delta h_g = \dot{q}_r'' + \dot{q}_c'' - \dot{q}_{rr}'' - \dot{q}_{misc}'' \quad (2.1)$$

Οι ποσοτικές εκφράσεις για την \dot{q}_{misc}'' δεν είναι διαθέσιμες, ενώ η \dot{q}_{rr}'' είναι συνήθως μικρή. Για απλοποιημένη ανάλυση και οι δύο όροι θεωρούνται αμελητέοι. Η ανάλυση του Hottel [17] και τα δεδομένα των Blinov και Khudiakov [18] έδειξαν πως είναι δυνατόν να συμβούν δύο σενάρια: είτε η καύση να κυριαρχείται από την ακτινοβολία για μεγάλες διαμέτρους δεξαμενών, είτε η καύση να κυριαρχείται από συναγωγή για μικρές διαμέτρους δεξαμενών. Επιπλέον, στην συναγωγή είναι δυνατόν να υπάρξει είτε τυρβώδης είτε στρωτή ροή, ενώ στην ακτινοβολία είναι δυνατόν να υπάρξουν είτε πυκνές είτε λεπτές φλόγες.

Πίνακας 2.1 Δεδομένα για την λειτουργία της καύσης με βάση την ανάλυση του Hottel [17] και των Blinov και Khudiakov [18].

D (m)	Λειτουργία καύσης
<0.05	συναγωγή, στρωτή ροή
0.05 έως 0.2	συναγωγή, τυρβώδης ροή
0.2 έως 1.0	ακτινοβολία, οπτικά λεπτές φλόγες
>1.0	ακτινοβολία, οπτικά πυκνές φλόγες



Στα όρια της συναγωγής, δηλαδή για μικρές δεξαμενές, μπορούμε να δεχτούμε ότι ισχύει η σχέση:

$$\dot{m}'' \sim \dot{q}_c'' / \Delta h_g \quad (2.2)$$

Η συμπεριφορά στην συναγωγή και σε στρωτή ροή δεν έχει πλήρως διευκρινιστεί, ωστόσο οι Blinov et al [18] και Corlett και Fu [19] υπέδειξαν σχέσεις της μορφής:

$$\dot{m}'' = \alpha D^{-n} + b \quad (2.3)$$

με $\frac{1}{2} \leq n \leq \frac{3}{2}$. Για συναγωγή με την εμφάνιση τυρβώδους ροής το \dot{m}'' είναι ανεξάρτητο του D.

Η ακτινοβολία τόσο σε πυκνές όσο και σε λεπτές οπτικά φλόγες είναι δυνατόν να μοντελοποιηθεί από την σχέση:

$$\dot{m}'' = \frac{\sigma T_f^4 (1 - e^{-\kappa \beta D})}{\Delta h_g} \quad (2.4)$$

Ο αποτελεσματικός όγκος εκπομπής εκφράζεται από τον όρο: $(1 - e^{-\kappa \beta D})$.

Για τα περισσότερα καύσιμα υπάρχουν αξιόπιστες μετρήσεις μόνο για το \dot{m}'' ως μία συνάρτηση του D και όχι μόνο του T_f , κ ή του β ξεχωριστά. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να παρουσιαστούν με τον εξής τύπο:

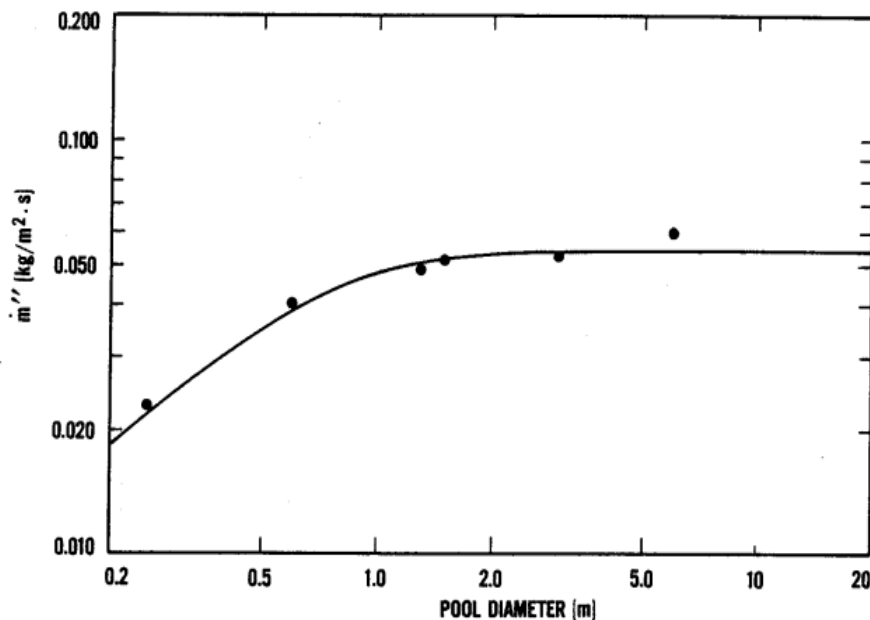
$$\dot{m}'' = \dot{m}''_{\infty} (1 - e^{-\kappa \beta D}) \quad (2.5)$$

Αυτός ο τύπος προτάθηκε από τους Zabetakis και Burgess [20] και απαιτεί δύο εμπειρικές παραμέτρους: \dot{m}''_{∞} και $(\kappa \beta)$, όχι ξεχωριστά το κ και το β . Ξεχωριστές τιμές για τα T_f , κ και β έχουν αναφερθεί για λίγα καύσιμα.

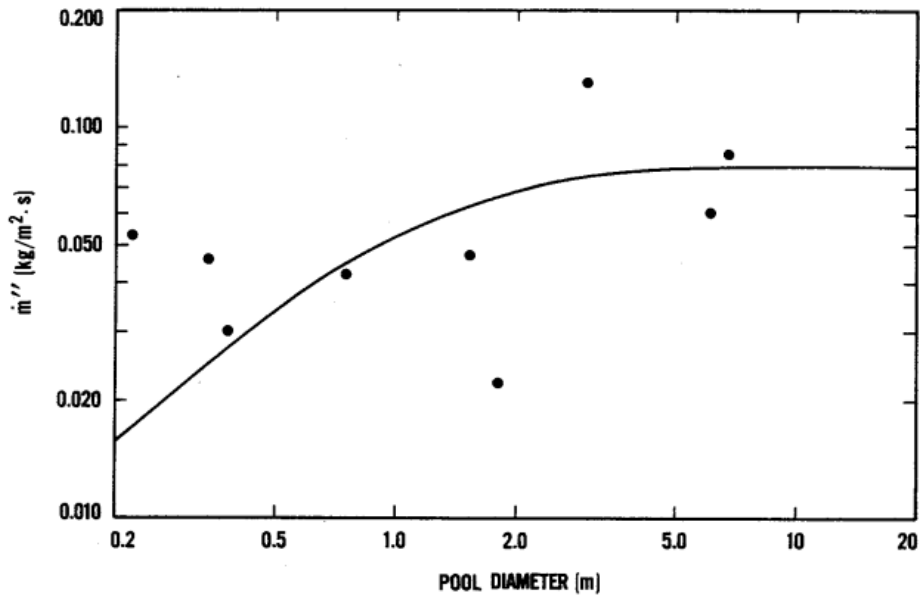
Με βάση πειραματικά δεδομένα από την μελέτη του V. Babrauskas [21] μπορούν να προσδιοριστούν διάφορες τιμές για τα $\kappa \beta$ και το \dot{m}''_{∞} . Η διαδικασία για τον προσδιορισμό αυτών των παραμέτρων περιλάμβανε την χρήση ενός αριθμητικού αλγορίθμου για μία μη γραμμική καμπύλη. Σε αυτήν την περίπτωση η Εξίσωση (2.5) χρησιμοποιήθηκε για όλες τις περιπτώσεις καυσίμων εκτός από τις αλκοόλες. Για τις αλκοόλες η μορφή της εξίσωσης έχει ως εξής:

$$\dot{m}'' = \dot{m}''_{\infty}, D \geq 0.2 \text{ m} \quad (2.6)$$

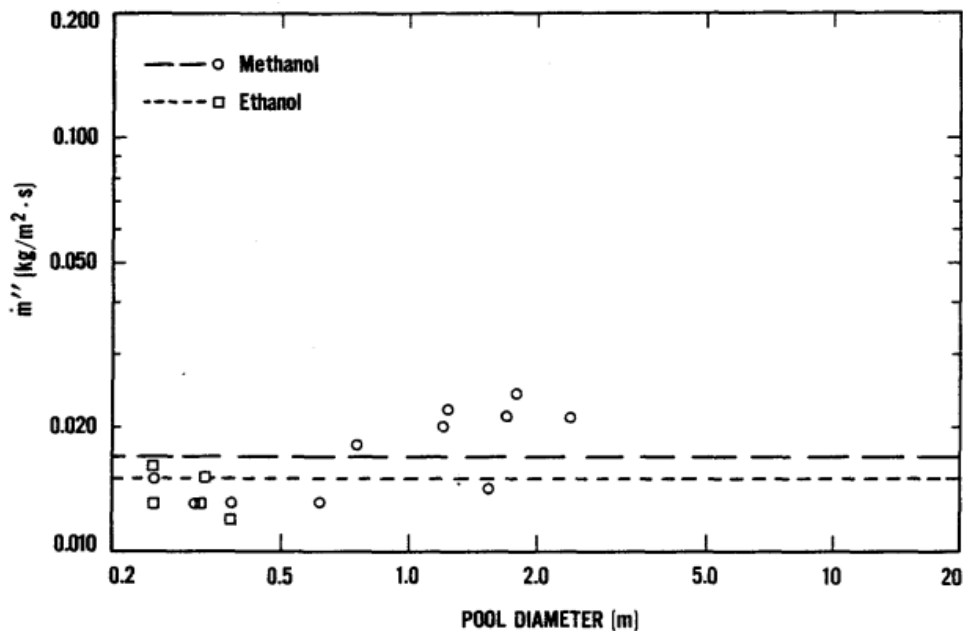
Τα πειραματικά δεδομένα και οι μορφές της καμπύλης από την μελέτη του του V. Babrauskas [21] παρουσιάζονται για τρία καύσιμα στα Διαγράμματα 2.3, 2.4 και 2.5. Το Διάγραμμα 2.3 δείχνει τις τιμές για την βενζίνη. Το Διάγραμμα 2.4 δίνει τα αποτελέσματα για το LNG και επιλέχθηκε για να δείξει ότι ο μεγαλύτερος βαθμός διασκορπισμού σχετίζεται με το μέτρο του κρυογενικού καυσίμου. Τέλος, το Διάγραμμα 2.5 παρουσιάζει την συμπεριφορά των καυσίμων αλκοόλης.



Διάγραμμα 2.3 Ταχύτητες καύσης για πυρκαγιές που αναπτύσσονται σε δεξαμενές βενζίνης συναρτήσει της διαμέτρου της δεξαμενής με βάση τα δεδομένα της μελέτης του V. Babrauskas [21].



Διάγραμμα 2.4 Ταχύτητες καύσης για πυρκαγιές που αναπτύσσονται σε δεξαμενές LNG συναρτήσει της διαμέτρου της δεξαμενής με βάση τα δεδομένα της μελέτης του V. Babrauskas [21].



Διάγραμμα 2.5 Ταχύτητες καύσης για πυρκαγιές που αναπτύσσονται σε δεξαμενές αλκοολών συναρτήσει της διαμέτρου της δεξαμενής με βάση τα δεδομένα της μελέτης του V. Babrauskas [21].



Τα δεδομένα για την δημιουργία των διαγραμμάτων αναφέρονται σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης, σε ένα περιβάλλον χωρίς αέρα και σε ένα δοχείο χωρίς υπερβολικό ύψος χείλους. Σε περίπτωση που δεν είχαν γίνει αυτές οι υποθέσεις, τότε οι προβλέψιμες τιμές δεν θα ήταν αρκετά έγκυρες. Συγκεκριμένα, θα μπορούσαν να προκύψουν διάφορες επιπλοκές όπως το ξεχειλίσμα του δοχείου που εμφανίζεται όταν τα καύσιμα δεν έχουν σταθερές ιδιότητες καύσης με αποτέλεσμα να ξεκινούν να βράζουν γρήγορα. Αυτό το πρόβλημα συνδέεται κυρίως με συγκεκριμένα είδη αργού πετρελαίου και με πετροχημικά προϊόντα που περιέχουν σημαντική ποσότητα υγρασίας. Μία άλλη πιθανή επιπλοκή είναι η εμφάνιση παροδικών φαινομένων που να εμποδίζουν την πυρκαγιά να φτάσει σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης. Μερικά από τα παροδικά φαινόμενα που μπορούν να παρατηρηθούν είναι η αλλαγή των απωλειών θερμότητας μέσα στο υγρό, η επίδραση των θερμαινόμενων γωνιών, η θέρμανση του πυθμένα του δοχείου στην περίπτωση που το στρώμα του είναι λεπτό και η αλλαγή στη ροή θερμότητας μέσω ακτινοβολίας και συναγωγής που μπορεί να προκύψει όταν το ύψος του υγρού εξαντληθεί σημαντικά.

Επιπλέον, τα υλικά και το πάχος των τοιχωμάτων της δεξαμενής ενδεχομένως να επιφέρουν ορισμένες επιπλοκές. Πυρκαγιές σε δοχεία κατασκευασμένα από διαφορετικά υλικά αναμένεται να δείξουν διαφορετικές ταχύτητες καύσης κυρίως λόγω των απωλειών από την αγωγή. Το πάχος του τοιχώματος μίας δεξαμενής έχει σημαντική επίδραση, ιδιαίτερα στην περίπτωση που αυτό είναι μικρότερο από το απαιτούμενο για να φτάσει το σύστημα σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης. Ακόμα, η ύπαρξη μίας απόστασης d ανάμεσα στα χείλη της δεξαμενής και στην ανώτατη στάθμη του καυσίμου, έχει σημαντικές επιδράσεις σε όλες τις πυρκαγιές των δεξαμενών και συμπεριλαμβάνει πολλά φαινόμενα που μπορούν να προκαλέσουν επιπλοκές. Για μεγάλες δεξαμενές, υπάρχουν οι επιδράσεις της συναγωγής, της αγωγής και της ακτινοβολίας. Το μεγάλο ύψος της δεξαμενής είναι δυνατόν να προκαλέσει αναταραχές στην άκρη της και αλλαγές στην κατανομή της θερμοκρασίας των τοιχωμάτων. Στις μεγάλες δεξαμενές υπάρχει η τάση να προωθείται ένας αποτελεσματικός όγκος φλόγας με μικρότερο ύψος και μεγαλύτερο πάχος. Τέλος, οι επιδράσεις του αέρα και του μεγέθους της δεξαμενής είναι δυνατόν να επιφέρουν επιπλοκές. Συγκεκριμένα, οι επιδράσεις του αέρα στις πυρκαγιές των δεξαμενών



είναι περίπλοκες. Στην περίπτωση των δεξαμενών με μικρές διαμέτρους θεωρείται πως υπάρχει η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή. Ωστόσο, στις πυρκαγιές που αναπτύσσονται σε μεγάλες δεξαμενές εκτός από την μεταφορά θερμότητας με συναγωγή, εμφανίζονται και άλλα φαινόμενα.

Οι Blinov και Khudiakov [18] έδειξαν πως στην περίπτωση των πυρκαγιών που αναπτύσσονται σε μεγάλες δεξαμενές παρουσία αέρα ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$\frac{\dot{m}_{windy}''}{\dot{m}_{still}''} = 1 + 0.15 \frac{u}{D} \quad (2.7)$$

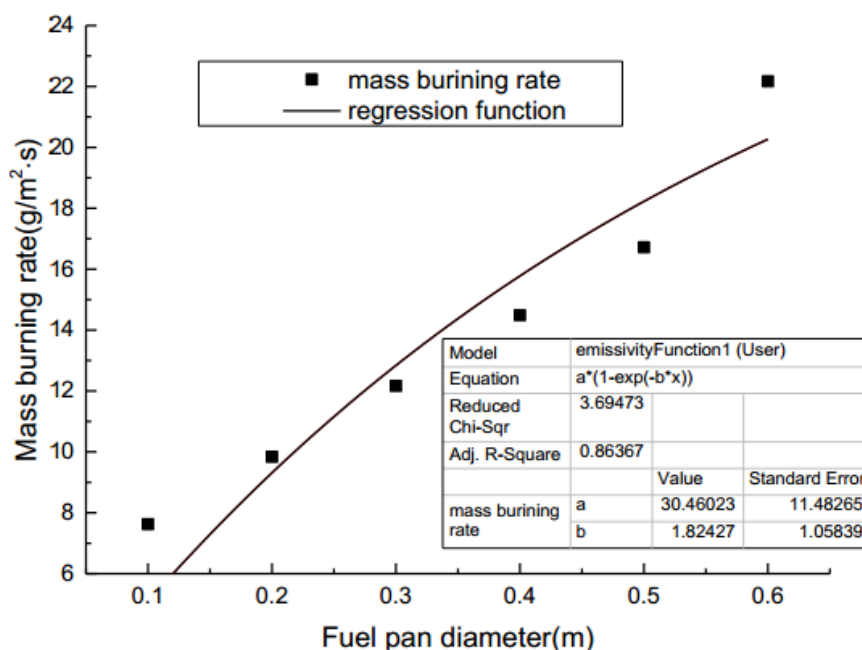
Η παραπάνω σχέση φαίνεται να είναι η καλύτερη σχέση που είναι διαθέσιμη προς χρήση, με τον περιορισμό ότι δεν είναι διαθέσιμη για αλκοόλες, ούτε για ταχύτητες ανέμου που να μπορούν να παρασύρουν το καύσιμο. Όσον αφορά το μέγεθος της δεξαμενής έχουν προκύψει μικρές μειώσεις της ταχύτητας καύσης σε πολύ μεγάλες δεξαμενές ($D \geq 5$ ή 10 m). Ωστόσο, δεν υπάρχουν αρκετά ακριβή δεδομένα για να γίνει η υπόθεση για την ανεξαρτησία του \dot{m}'' από το D [21].

2.5.2 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΠΛΑΓΙΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

Από την μελέτη των P. Jiang και S. Lu [22] προέκυψαν οι ταχύτητες καύσης για ένα καύσιμο αεροπορίας σε συνθήκες απουσίας ανέμου. Οι ταχύτητες αυτές παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 2.6. Σύμφωνα με τα δεδομένα του Διαγράμματος 2.6 προκύπτει η εξής σχέση:

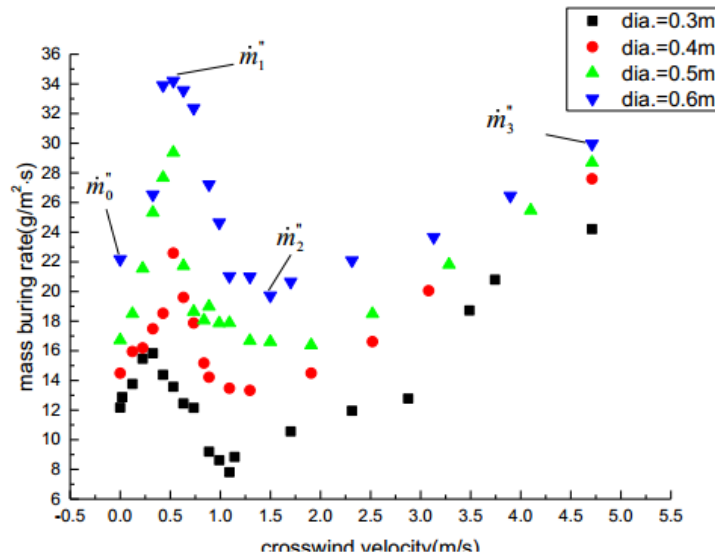
$$\dot{m}'' = 30.46(1 - e^{-1.824D}) \quad (2.8)$$

Επομένως, η μέγιστη τιμή της ταχύτητας καύσης της μάζας, \dot{m}''_{∞} , για ένα καύσιμο αεροπορίας είναι ίση με 30.46 g/(m²s) και η αντίστοιχη τιμή του γινομένου κβ είναι 1.82427 m⁻¹.



Διάγραμμα 2.6 Ταχύτητα καύσης σε συνθήκες απουσίας ανέμου κατά την μελέτη των P. Jiang και S. Lu [22].

Στην ίδια μελέτη παρατηρήθηκε πως οι ταχύτητες καύσης σε πυρκαγιές δεξαμενών που αναπτύσσονταν υπό την επίδραση πλαγίου ανέμου αυξάνονταν με αύξηση της διαμέτρου της πειραματικής λεκάνης που περιείχε το καύσιμο. Αυτή η παρατήρηση προκύπτει από το Διάγραμμα 2.7 στο οποίο απεικονίζονται τα αποτελέσματα για διαφορετικές πειραματικές λεκάνες που περιέχουν το καύσιμο. Οι ταχύτητες καύσης για μία πυρκαγιά σε μία δεξαμενή δε μεταβάλλονταν μονότονα με αύξηση της ταχύτητας του πλαγίου ανέμου. Ωστόσο, οι ταχύτητες καύσης σε πυρκαγιές που αναπτύσσονταν σε διαφορετικές δεξαμενές μεταβάλλονταν αντίστοιχα με το μέγεθος της δεξαμενής υπό την επίδραση σταθερής ταχύτητας του ανέμου.



Διάγραμμα 2.7 Ταχύτητες καύσης υπό την επίδραση διαφορετικών ταχυτήτων πλάγιου ανέμου κατά την μελέτη των P. Jiang και S. Lu [22].

Από το Διάγραμμα 2.7 παρατηρήθηκε μία απότομη αύξηση των ταχυτήτων καύσης μέχρι μία μέγιστη τιμή \dot{m}_1'' , στην συνέχεια ακολούθησε μία μείωση μέχρι την ελάχιστη τιμή \dot{m}_2'' και τέλος εμφανίστηκε μία αύξηση μέχρι την μέγιστη τιμή \dot{m}_3'' . Η συμπεριφορά αυτή παρατηρήθηκε, καθώς η ταχύτητα του ανέμου αυξανόταν αλλά λάμβανε χαμηλές τιμές. Επομένως, η μεταβολή των ταχυτήτων καύσης με αύξηση της ταχύτητας του πλάγιου ανέμου μπορεί να χωριστεί σε τρία τμήματα (αύξηση-μείωση-αύξηση των ταχυτήτων καύσης).

2.5.3 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΕΡΑ

Τέλος, ένα ακόμα στοιχείο μεγάλης σημασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς υπό χαμηλή πίεση αέρα. Η έρευνα των R. Tu et al [23] βασίστηκε σε μετρήσεις σε ιστορικά κτίρια σε περιοχές μεγάλου ύψους και αφορούσε την μελέτη της επίδρασης της πίεσης του αέρα στις ταχύτητες καύσης. Η



πίεση του αέρα φάνηκε να έχει σημαντική επίδραση στην δυναμική της πυρκαγιάς και στα χαρακτηριστικά της καύσης.

Η επίδραση της πίεσης του αέρα στην ταχύτητα καύσης έχει την τάση να δείχνει κάποια σύνθετη μεταβολή, η οποία θα μπορεί να περιγραφεί ως $\dot{m}'' \propto p^n$, όπου το n προσδιορίζεται από πειραματικά δεδομένα. Επιπλέον, οι περισσότερες από τις σχετικές δοκιμές κατά την μελέτη των R. Tu et al [23] διεξάχθηκαν στο Hafei (100.0±1.0 kPa) και στο Lhasa (65.0±1.5 kPa), δύο αντιπροσωπευτικές τοποθεσίες με φυσική υψομετρική διαφορά στην Κίνα.

Οι επιδράσεις της χαμηλής πίεσης στην ταχύτητα καύσης σε πυρκαγιές δεξαμενών μπορούν να εξεταστούν σε 3 διαφορετικές περιοχές, οι οποίες ρυθμίζονται από την αγωγή και την συναγωγή για μικρό μέγεθος διαμέτρου ($D < 7$ cm), από την ακτινοβολία για μεγάλο μέγεθος διαμέτρου ($D > 20$ cm), και από την συναγωγή για μεσαίο μέγεθος διαμέτρου ($D = 10 \sim 20$ cm). Η επίδραση της πίεσης στην ταχύτητα της καύσης για πυρκαγιές ίδιας διαμέτρου είναι ουσιαστικά η επίδραση του p στο ΔT .

Η T_f επηρεάζεται σημαντικά από την πίεση στην περιοχή που ρυθμίζεται από την αγωγή. Επιπλέον, δεδομένου του χαμηλού σημείου βρασμού σε χαμηλή πίεση, το \dot{m}'' πρέπει να αυξάνεται υπό χαμηλή πίεση για μία πυρκαγιά που ρυθμίζεται από την αγωγή, ως εξής:

$$\dot{m}'' \propto p^n, n < 0 \quad (2.9)$$

$$\text{ή } \dot{m}_d'' / \dot{m}_o'' \sim \Delta T_d / \Delta T_o > 1 \quad (2.10)$$

Στην συνέχεια, σε συνθήκες ελεγχόμενες από την ακτινοβολία φαίνεται να υπάρχει μία σχέση ανάμεσα στην ταχύτητα καύσης και στην πίεση βασιζόμενη στην σημαντική υπόθεση ότι η θερμοκρασία της φλόγας T_f πρέπει να είναι ανεπηρέαστη από την κλίμακα της πυρκαγιάς ή την πίεση του περιβάλλοντος. Ο τύπος που προκύπτει για συνθήκες ελεγχόμενες από την ακτινοβολία είναι:

$$\dot{m}'' \sim p^{3/2} * (\dot{m}'' / p)^{3/10} \quad (2.11)$$

$$\dot{m}'' \sim p^{1.7} \quad (2.12)$$

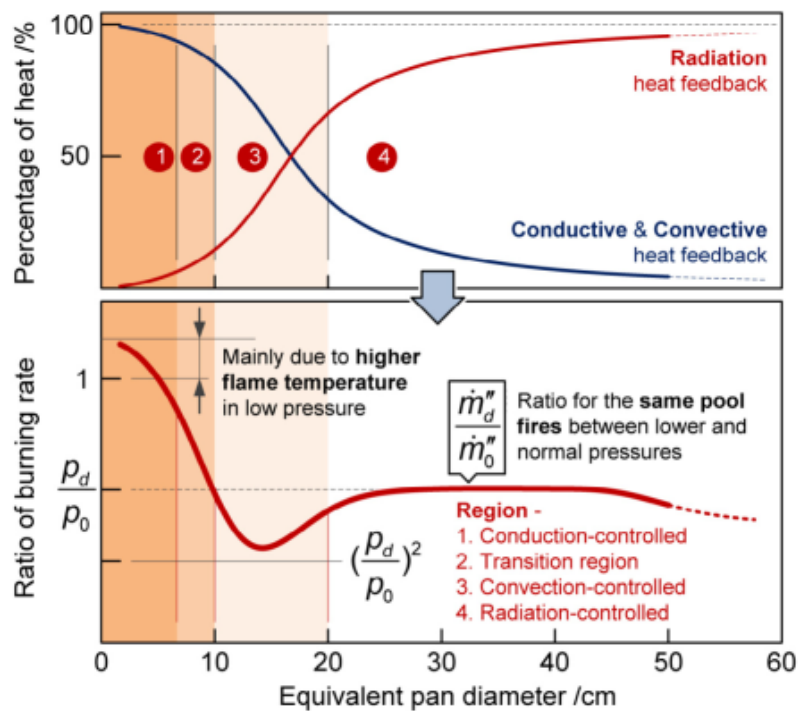
για μεγάλης κλίμακας πυρκαγιά ελεγχόμενη από ακτινοβολία και

$$\dot{m}'' \sim p \quad (2.13)$$

για σχετικά μικρής κλίμακας πυρκαγιά που ελέγχεται από την ακτινοβολία.

Τελικά για τις περιοχές που ελέγχονται από την συναγωγή προκύπτει η ακόλουθη σχέση

$$\dot{m}'' \sim \rho_f * u \sim (p^{1+m} = p^n), \quad n=1 \sim 2 \quad (2.14)$$



Διάγραμμα 2.8 Θεωρητικές επιδράσεις της πίεσης στις ταχύτητες καύσης υπό διαφορετικούς μηχανισμούς ανατροφοδότησης θερμότητας [23].



2.5.4 ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΚΑΥΣΗΣ ΣΕ ΜΙΓΜΑΤΑ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Οι πυρκαγιές σε μίγματα καυσίμων, ιδιαίτερα σε μίγματα των οποίων τα συστατικά διαφέρουν σημαντικά όσο αφορά την πυκνότητα, δεν εξελίσσονται με μία ενιαία ταχύτητα. Στην αρχή, τα χαρακτηριστικά της καύσης είναι ίδια με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά του πιο πτητικού συστατικού. Στην συνέχεια της καύσης το λιγότερο πτητικό συστατικό φτάνει στο σημείο βρασμού του μίγματος. Τελικά, καθώς προχωράει η κλασμάτωση η ταχύτητα καύσης γίνεται ίδια με την ταχύτητα καύσης του συστατικού με το υψηλότερο σημείο βρασμού. Οι Grumer et al [24] πραγματοποίησαν μία σειρά από δοκιμές σε ανεξέλεγκτες καύσεις μιγμάτων του ασύμμετρου διμεθυλοϋδραζινίου (UDMH) και διαιθυλοτριάμινης (DETA). Το σημείο βρασμού του UDMH είναι 63° C και του DETA 207° C. Οι μελετητές παρατήρησαν ότι η αρχική ταχύτητα καύσης ήταν παρόμοια με την αντίστοιχη ταχύτητα καύσης του UDMH, ενώ η τελική ταχύτητα καύσης ήταν παρόμοια με τον αντίστοιχη του DETA. Με βάση τα εκτεταμένα πειραματικά δεδομένα οι Grumer et al [24] κατέληξαν στην ακόλουθη σχέση για τον καθορισμό των ταχυτήτων καύσης σε μίγματα καυσίμων:

$$y_{max} = 1.27 \times 10^{-6} \frac{\sum_{i=1}^N n_i \Delta H_{ci}}{\sum_{i=1}^N n_i \Delta H_{vi} + \sum_{i=1}^N m_i \int_{T_a}^{T_b} c_p(T) dT} \quad (2.15)$$

Η συνολική θερμοχωρητικότητα που υπάρχει στον παρονομαστή της παραπάνω σχέσης καθορίζει την εξάρτηση της ταχύτητας καύσης από την θερμοκρασία. Για μίγματα καυσίμων, όπως μίγματα βενζίνης, των οποίων οι ειδικές θερμότητες καύσης και εξάτμισης είναι συγκρίσιμες και συνήθως $n_i \sim m_i$, η Εξίσωση (2.15) μπορεί να πάρει την ακόλουθη μορφή:

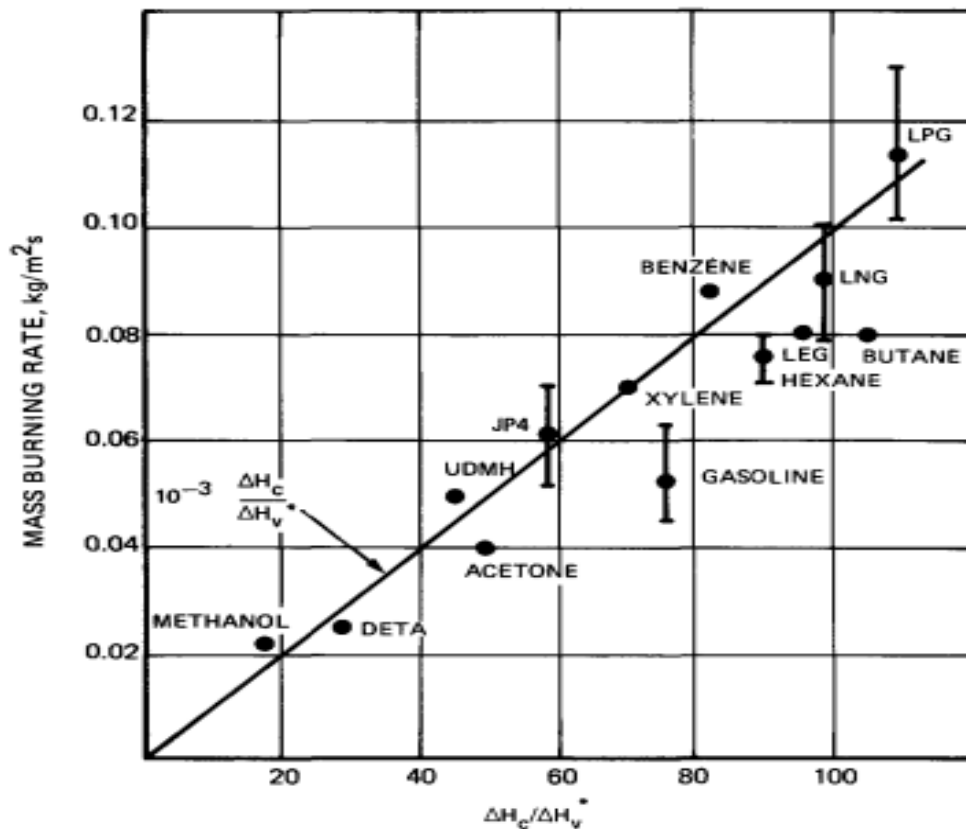
$$y_{max} = n_1 y_1 + n_2 y_2 + \dots \quad (2.16)$$

Από τις Εξισώσεις (2.15) και (2.16) μπορούν να προκύψουν καλές εκτιμήσεις για τις ταχύτητες καύσης ακόμα και εάν τα μίγματα αποτελούνται από συστατικά με πολύ διαφορετικές τιμές στα σημεία βρασμού.

Τέλος, η ταχύτητα καύσης της μάζας (σε kg/m² s) μπορεί να καθοριστεί πολλαπλασιάζοντας την ταχύτητα καύσης με την πυκνότητα του υγρού. Το

Διάγραμμα 2.9 προέκυψε από την μελέτη των Grumer et al [24] και παρουσιάζει τη συσχέτιση ανάμεσα στην ταχύτητα καύσης της μάζας και τη θερμοχημεία του καυσίμου. Η σχέση από την οποία προκύπτει η ταχύτητα καύσης της μάζας είναι η εξής:

$$\dot{m}'' = 1 \times 10^{-3} \frac{\Delta H_c}{\Delta H_v^*} \quad (2.17)$$



Διάγραμμα 2.9 Συσχέτιση ανάμεσα στην ταχύτητα καύσης της μάζας και στις θερμοχημικές ιδιότητες του καυσίμου για διάφορα καύσιμα σύμφωνα με την μελέτη των Grumer et al [24].

Η Εξίσωση (2.17) δεν εμφανίζει τόσο μεγάλη ακρίβεια με τα πειραματικά αποτελέσματα των Grumer et al [24] όπως η Εξίσωση (2.15), η οποία καλύπτει ένα μεγάλο εύρος καυσίμων συμπεριλαμβανομένων των υγροποιημένων αερίων.

Αξίζει να επισημανθεί πως τα δεδομένα για τις ταχύτητες καύσης που παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 2.9 αφορούν τις πυρκαγιές σε δεξαμενές υγρών



υδρογονανθράκων που βρίσκονται στο έδαφος. Οι ταχύτητες καύσης για πυρκαγιές σε δεξαμενές που εξελίσσονται στο νερό είναι λίγο μεγαλύτερες λόγω της μεταφοράς θερμότητας από το νερό. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την καύση των υγροποιημένων αερίων, όπου οι ταχύτητες καύσης πάνω στο νερό θα μπορούσαν να είναι και διπλάσιες από τις αντίστοιχες που προκύπτουν στο έδαφος [16].

2.5.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΑΥΣΗΣ

Η ταχύτητα καύσης σε μία πυρκαγιά που αναπτύσσεται σε μία δεξαμενή εξαρτάται από 7 παράγοντες. Παρακάτω, ακολουθεί η ανάλυση των παραγόντων αυτών σύμφωνα με την μελέτη των P. Jiang et al [22]. Η ανάλυση αυτή στηρίχθηκε στην ανατροφοδότηση θερμότητας στην καύση, ωστόσο η ταχύτητα καύσης καθορίζεται από την ανατροφοδότηση θερμότητας στο υγρό καύσιμο. Με βάση αυτά τα δεδομένα άγεται το συμπέρασμα πως η ταχύτητα καύσης θα εμφανίζει αντίστοιχες μεταβολές με την ανατροφοδότηση θερμότητας.

- ❖ **k:** Το k μειώνεται κατά 15%, καθώς η θερμοκρασία του υγρού καυσίμου αυξάνεται ανά 100 K. Η μεταβολή του παράγοντα k , όπως και η ταχύτητα καύσης, δεν επηρεάζει σημαντικά την ανατροφοδότηση θερμότητας στην καύση.
- ❖ **D:** Η εκπομπή της φλόγας αυξάνεται εκθετικά με αύξηση της διαμέτρου της δεξαμενής D . Όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος της δεξαμενής τόσο λιγότερο αυξάνεται ο παράγοντας της αγωγής θερμότητας με αύξηση της ταχύτητας του πλάγιου ανέμου. Σε πυρκαγιές σε δεξαμενές με μεγάλες διαμέτρους παρατηρήθηκε πως η μεταβολή στην ανατροφοδότηση θερμότητας λόγω αγωγής μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, καθώς επικρατούν διαφορετικές τιμές ταχυτήτων πλαγίων ανέμων.
- ❖ **T_F:** Η χαμηλή ταχύτητα του ανέμου συμβάλλει στην ανάμιξη του ανέμου και του αερίου του καυσίμου με αποτέλεσμα την εμφάνιση βελτιωμένης απόδοσης της καύσης. Αυτό οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας της φλόγας και αύξηση της ανατροφοδότησης της θερμικής ακτινοβολίας. Η ταχύτητα καύσης αυξάνεται σημαντικά για χαμηλές τιμές της ταχύτητας του πλάγιου ανέμου. Παρόμοια



συμπεριφορά εμφανίζει και το μήκος της φλόγας. Ωστόσο, όταν η T_f μειώνεται η επίδραση της μεταβολής της θερμοκρασίας μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

- ❖ **T_b :** Η θερμοκρασία του υγρού καυσίμου μειώνεται στους 15 K, καθώς η ταχύτητα του πλαγίου ανέμου αυξάνεται. Η ανατροφοδότηση της θερμότητας δεν επηρεάζεται από την μεταβολή της θερμοκρασίας του υγρού καυσίμου.
- ❖ **F :** Το μήκος της φλόγας αυξάνεται στο εύρος των χαμηλών ταχυτήτων του ανέμου λόγω της αύξησης της ταχύτητας καύσης, άρα και ο συντελεστής ορατότητας ενδεχομένως να αυξάνεται. Ωστόσο, η εμφάνιση μεγαλύτερης γωνίας της φλόγας παρουσιάζει αντίθετα αποτελέσματα στον συντελεστή ορατότητας. Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου, η γωνία της φλόγας αυξάνεται και το μήκος της μειώνεται, άρα ο συντελεστής ορατότητας της φλόγας μειώνεται. Επομένως, και το ποσοστό της ακτινοβολίας που ανατροφοδοτείται στην φλόγα μειώνεται, καθώς η γωνία της φλόγας βρίσκεται στα όρια των 30-65°. Τέλος, καθώς η γωνία της φλόγας παίρνει τιμές μεγαλύτερες από 65°, ο συντελεστής ορατότητας και η θερμοκρασία της φλόγας μεταβάλλονται ελάχιστα. Παρόμοια συμπεριφορά εμφανίζει και η ακτινοβολία που ανατροφοδοτείται στην φλόγα.
- ❖ **$1-e^{-k\beta D}$:** Ο παράγοντας $k\beta$ ενδεχομένως να αυξάνεται με αύξηση της ταχύτητας του πλαγίου ανέμου. Ωστόσο, μεταβολή της θερμότητας ανατροφοδότησης θεωρείται πως είναι ασήμαντη, καθώς μεταβάλλεται ο όρος $1-e^{-k\beta D}$.
- ❖ **h :** Η ένταση της μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής αυξάνεται με αύξηση της ταχύτητας του πλαγίου ανέμου και η συνολική θερμότητα ανατροφοδότησης ενδεχομένως να αυξάνεται από 10-25 % σε 60-80 %, καθώς ο αριθμός Fr αυξάνεται από μηδέν σε 7.55 [22].

2.6 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΣΤΙΣ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ

Σε όλους τους τύπους των επιχειρήσεων απαιτείται ένα καλό σχέδιο απόκρισης στην περίπτωση μίας πυρκαγιάς. Με βάση το σχέδιο αυτό είναι δυνατόν να προσδιοριστούν οι κίνδυνοι, οι απαιτούμενοι και οι διαθέσιμοι πόροι και το δυναμικό που απαιτείται για να αντιμετωπιστεί ένα σημαντικό περιστατικό. Η γνώση του τύπου της δεξαμενής, του προϊόντος, των διατάξεων ασφαλείας, της θέσης



πρόσβασης στους δρόμους και στις περιοχές στάσεις και των πηγών του νερού είναι αρκετά επωφελής για τον προληπτικό σχεδιασμό της απόκρισης στις πυρκαγιές.

Οι πυρκαγιές σε δεξαμενές είναι περίπλοκα φαινόμενα. Η καταπολέμησή τους απαιτεί εφαρμογή σχεδίων, προετοιμασία και ορθή χρήση των πόρων προκειμένου να γίνει η αποτελεσματική διαχείριση. Ωστόσο, ακόμα και με την εφαρμογή ενός συγκεκριμένου σχεδίου η επιτυχία δεν είναι σίγουρη. Εάν το εφαρμόσιμο σχέδιο δεν έχει το επιθυμητό αποτέλεσμα κατά την διάρκεια μίας πυρκαγιάς, απαιτείται η αλλαγή της στρατηγικής προκειμένου να επιτευχθεί η ασφάλεια.

Τα βασικά στοιχεία τα οποία πρέπει να μελετηθούν κατά την διάρκεια ενός προληπτικού ελέγχου είναι τα εξής:

- ❖ Η κατασκευή της δεξαμενής
- ❖ Οι συσκευές και ο εξοπλισμός που σχετίζονται με την δεξαμενή
- ❖ Ο κίνδυνος για την ζωή
- ❖ Το έδαφος όπου είναι τοποθετημένες οι δεξαμενές
- ❖ Η παροχή νερού
- ❖ Οι βοηθητικές συσκευές που απαιτούνται για την κατάσβεση της πυρκαγιάς
- ❖ Οι συνθήκες στους δρόμους πρόσβασης στις δεξαμενές
- ❖ Οι καιρικές συνθήκες
- ❖ Το εμβαδόν της περιοχής της πυρκαγιάς
- ❖ Η θέση και η έκταση της πυρκαγιάς
- ❖ Ο χρόνος εμφάνισης της πυρκαγιάς
- ❖ Το ύψος της δεξαμενής αποθήκευσης
- ❖ Οι ειδικές συνθήκες που επικρατούν κατά την ανάπτυξη της πυρκαγιάς [11].

2.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- ❖ Οι πυρκαγιές που αναπτύσσονται σε δεξαμενές υγρών καυσίμων αποτελούν ένα μικρό ποσοστό των πυρκαγιών που αναπτύσσονται ανά έτος σύμφωνα με την



έρευνα της NFPA στις Η.Π.Α. Ωστόσο, διάφορα ατυχήματα που περιλαμβάνουν δεξαμενές υγρών καυσίμων έχουν διαπιστωθεί σε διάφορες περιοχές και όχι μόνο στις Η.Π.Α κατά την πάροδο των ετών.

- ❖ Η επίδραση του μεγέθους της δεξαμενής στην ταχύτητα καύσης της μάζας του καυσίμου είναι σημαντική. Συγκεκριμένα, για μικρές δεξαμενές οι ταχύτητες καύσης της μάζας μειώνονται με αύξηση της διαμέτρου της δεξαμενής. Ωστόσο, για δεξαμενές μεγαλύτερες ή ίσες με 0.20 m η ταχύτητα καύσης της μάζας αυξάνεται σταδιακά με αύξηση της τιμής της διαμέτρου της δεξαμενής όπου αναπτύσσεται η φλόγα. Τέλος, για πολύ μεγάλες τιμές της διαμέτρου της φλεγόμενης δεξαμενής η ταχύτητα καύσης του καυσίμου παραμένει σταθερή και ανεξάρτητη της διαμέτρου της.
- ❖ Η λειτουργία της καύσης δεν ήταν ίδια για όλες τις τιμές των διαμέτρων των δεξαμενών. Συγκεκριμένα, για μικρές τιμές διαμέτρων επικρατεί η μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής, για μεσαίες τιμές διαμέτρων επικρατεί η μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής και τέλος για μεγάλες τιμές διαμέτρων επικρατεί η μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας.
- ❖ Για τα περισσότερα καύσιμα ο τύπος: $\dot{m}'' = \dot{m}_{\infty}''(1 - e^{-kBD})$, μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά την ταχύτητα καύσης της μάζας του καυσίμου. Ωστόσο, ο τύπος αυτός δεν εμφανίζει ικανοποιητικά αποτελέσματα στην περίπτωση των αλκοολών όπου παρατηρήθηκε πως ισχύει: $\dot{m}'' = \dot{m}_{\infty}''$.
- ❖ Η επίδραση του ανέμου στην ταχύτητα καύσης της μάζας του καυσίμου είναι σημαντική. Η συμπεριφορά που εμφανίζεται περιλαμβάνει μία σταδιακή αύξηση, μείωση και μετά πάλι αύξηση της ταχύτητας καύσης της μάζας του καυσίμου, καθώς η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται διατηρώντας χαμηλές τιμές. Ωστόσο, στην περίπτωση των πυρκαγιών που αναπτύσσονται σε μεγάλες δεξαμενές παρατηρείται πως οι ταχύτητες καύσης της μάζας του καυσίμου εμφανίζουν μεγάλες τιμές χωρίς να επηρεάζονται σημαντικά από την ταχύτητα του ανέμου.
- ❖ Η επίδραση της πίεσης του ανέμου στην ταχύτητα καύσης της μάζας μπορεί να περιγραφεί από τον τύπο: $\dot{m}'' = p^n$. Ανάλογα με την διάμετρο της δεξαμενής που



φλέγεται και την αντίστοιχη λειτουργία της καύσης, ο τύπος αυτός παίρνει διαφορετικές τιμές για το n .

- ❖ Τέλος, οι ταχύτητες καύσης της μάζας στην περίπτωση των μιγμάτων των καυσίμων είναι μεταβαλλόμενες κατά την διάρκεια της καύσης. Αρχικά, παίρνουν τιμή που είναι ίση με την ταχύτητα καύσης του πιο πτητικού συστατικού και σταδιακά η τιμή της ταχύτητας καύσης της μάζας γίνεται ίση με την τιμή του λιγότερου πτητικού συστατικού.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

\dot{m}'' : η ταχύτητα καύσης της μάζας ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου

Δh_g : η συνολική θερμότητα αεριοποίησης, δηλαδή η θερμότητα που απαιτείται για να φέρουμε ένα υγρό καύσιμο των 298 K στη θερμοκρασία βρασμού του και μετά να το μετατρέψουμε σε ατμό.

\dot{q}_r'' : η ροή ακτινοβολίας που απορροφάται από τη δεξαμενή

\dot{q}_c'' : η θερμότητα που λαμβάνεται με συναγωγή

\dot{q}_{rr}'' : η απώλεια θερμότητας της ακτινοβολίας, λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας στην οποία βρίσκεται η επιφάνεια της δεξαμενής

\dot{q}_{misc}'' : οι απώλειες από τα τοιχώματα της δεξαμενής λόγω αγωγής σε συνθήκες μη μόνιμης κατάστασης

σ : η σταθερά των Stefan-Boltzmann

T_f : είναι η αποτελεσματική ισοδύναμη θερμοκρασία της φλόγας.

$\kappa\beta$: ο συντελεστής απόσβεσης

D : η διάμετρος της δεξαμενής

β : ο συντελεστής διόρθωσης του μήκους της δέσμης των ακτίνων



\dot{m}''_{∞} : η μέγιστη τιμή της ταχύτητας καύσης της μάζας μονάδα επιφάνειας και χρόνου

\dot{m}''_{windy} : η ταχύτητα καύσης της μάζας παρουσία ανέμου ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου

\dot{m}''_{still} : η ταχύτητα καύσης της μάζας σε συνθήκες ήρεμου ανέμου

u : η ταχύτητα του ανέμου

n : συντελεστής που δείχνει την εξάρτηση της ταχύτητας καύσης της μάζας από την πίεση του αέρα

p : η πίεση του αέρα

\dot{m}''_d : η ταχύτητα καύσης της μάζας σε συνθήκες μειωμένης πίεσης

\dot{m}''_o : η ταχύτητα καύσης της μάζας σε συνθήκες κανονικής πίεσης

ΔT_d : η θερμοκρασιακή διαφορά σε συνθήκες μειωμένης πίεσης

ΔT_o : η θερμοκρασιακή διαφορά σε συνθήκες κανονικής πίεσης

m : συντελεστής που δείχνει την εξάρτηση της ταχύτητας καύσης της μάζας από την πίεση του αέρα

ρ_f : η πυκνότητα του μίγματος των θερμών αερίων στην φλόγα

n_i : το κλάσμα mole της φάσης των ατμών

m_i : το κλάσμα mole της φάσης του υγρού

γ : η ταχύτητα καύσης

γ_i : η ταχύτητα καύσης για κάθε συστατικό του μίγματος των καυσίμων

γ_{max} : η μέγιστη τιμή της ταχύτητας καύσης

T_a : η αρχική θερμοκρασία

T_b : η θερμοκρασία βρασμού

C_p : η ειδική θερμοχωρητικότητα



ΔH_c : η καθαρή θερμότητα καύσης

ΔH_c : η καθαρή θερμότητα εξάτμισης για κάθε συστατικό του μίγματος καυσίμων

ΔH_v : η θερμότητα εξάτμισης

ΔH_{v_i} : η θερμότητα εξάτμισης για κάθε συστατικό του μίγματος των καυσίμων

N: ο αριθμός των συστατικών του μίγματος καυσίμων

ΔH_p^* : η τροποποιημένη θερμότητα εξάτμισης που δίνεται από τον παρονομαστή της Εξίσωσης (2.15)

k: ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

T_F : η θερμοκρασία της φλόγας

T_B : η θερμοκρασία του υγρού καυσίμου

F: ο συντελεστής ορατότητας

h: ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας κατά την συναγωγή



3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ-ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΑΠΟ ΦΩΤΙΕΣ

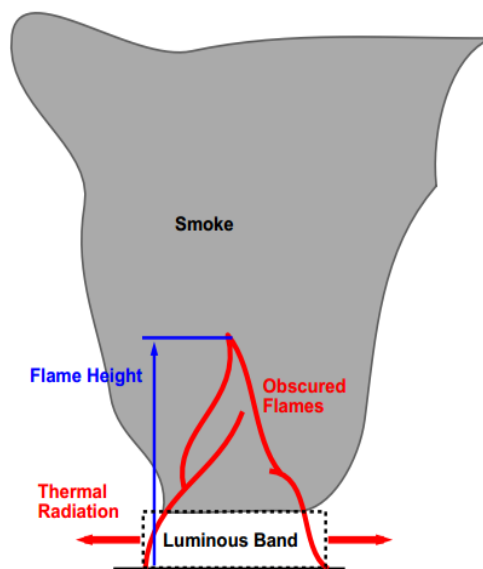
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι πυρκαγιές σε βιομηχανίες μπορούν να είναι έντονες πηγές θερμότητας, καπνού και άλλων προϊόντων καύσης. Αυτό συμβαίνει κυρίως εάν το καύσιμο προέρχεται από το πετρέλαιο, με υψηλή θερμότητα καύσης και απόθεση αιθάλης. Η ενέργεια της ακτινοβολίας μπορεί να είναι αρκετά υψηλή ώστε να απειλεί την δομική ακεραιότητα των γειτονικών κτιρίων, την σωματική ακεραιότητα των πυροσβεστών, των φυτών, του προσωπικού αλλά και όλων των δυνητικά ευρισκόμενων ατόμων στα όρια της εγκατάστασης.

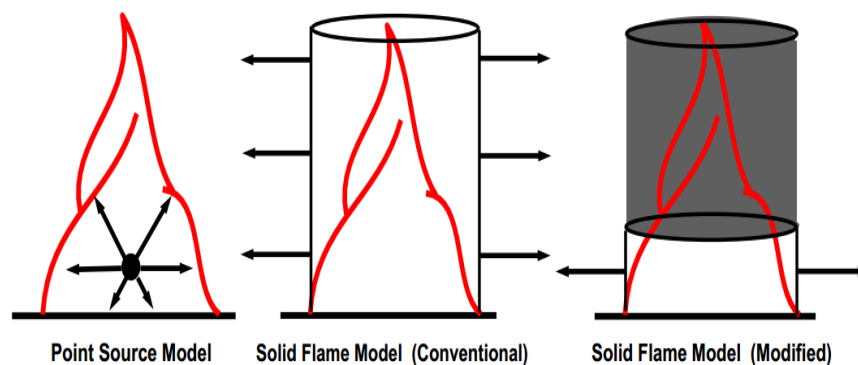
Το Υπουργείο Αστική Ανάπτυξης των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής (HUD) [25] καθιέρωσε τα εξής ανώτατα επιτρεπτά όρια ροής της θερμικής ακτινοβολίας: 31,5 kW/m² για κτίρια και 1,4 kW/m² για ανθρώπους. Εδώ και πολλά χρόνια, το πεδίο της επιστήμης των πυρκαγιών έχει αυξηθεί ραγδαία, οδηγώντας σε βελτιωμένες μεθόδους μέτρησης και πρόβλεψης της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς. Έχουν αναπτυχθεί πολλά σενάρια για την εκτίμηση της ροής της ακτινοβολίας. Ορισμένα από αυτά τα σενάρια μπορούν να παράγουν εκτιμήσεις που να είναι μεγαλύτερες μέχρι και κατά μία τάξη μεγέθους από εκείνες που μετρήθηκαν σε πειραματικές διαδικασίες. Ο κύριος λόγος εμφάνισης αυτής της διαφοράς είναι η παραδοχή ότι η πυρκαγιά εμφανίζει απεριόριστο καπνό. Οι περισσότερες μεγάλες πυρκαγιές από τα πιο εύφλεκτα υγρά και αέρια παράγουν μεγάλη ποσότητα καπνού. Ανάλογα με το καύσιμο και το μέγεθος της φωτιάς, μέχρι και το 20% της μάζας των καυσίμων μπορεί να μετατραπεί σε σωματίδια καπνού κατά την διαδικασία της καύσης. Αυτός ο καπνός μπορεί να προστατεύσει ένα άτομο από την έκθεσή του στην φωτεινή περιοχή της φλόγας, αυτή η περιοχή αποτελεί την πηγή εκπομπής του μεγαλύτερου μέρους της θερμικής ακτινοβολίας. Αυτό το φαινόμενο της θωράκισης έχει μεγαλύτερα αποτελέσματα για πυρκαγιές που έχουν διαστάσεις δεκάδων ή εκατοντάδων μέτρων, λόγω της μειωμένης αποτελεσματικότητας της καύσης σε

αυτές τις κλίμακες. Μία σχηματική απεικόνιση του παραπάνω φαινομένου δίνεται στην Εικόνα 3.1 [26].

Στο κεφάλαιο αυτό, λοιπόν, θα μελετηθεί η ακτινοβολία που εκπέμπεται από πυρκαγιές στερεών, υγρών και αερίων καύσιμων με βάση τα δεδομένα διαφόρων ερευνών. Τα μοντέλα που παρουσιάζονται στην Εικόνα 6.2 είναι βασικά για την κατανόηση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από αυτές τις πυρκαγιές, ενώ εξίσου σημαντική κρίνεται και η απορρόφηση της ακτινοβολίας από την ατμόσφαιρα. Στο τέλος του κεφαλαίου θα γίνει μία ανάλυση των κινδύνων που προκύπτουν από την εκπομπή ακτινοβολίας από πυρκαγιές.



Εικόνα 3.1 Σχηματική απεικόνιση μίας πυρκαγιάς μεγάλης έκτασης υγρού καυσίμου [26].



Εικόνα 3.2 Σχηματική αναπαράσταση των μοντέλων θερμικής ακτινοβολίας [26].



3.2 ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΑΠΟ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΥΓΡΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Η ανάλυση των πυρκαγιών εύφλεκτων υγρών καυσίμων είναι ανεξάρτητη από τον τύπο του καυσίμου. Αυτό συμβαίνει διότι οι ταχύτητες καύσης και η απελευθέρωση θερμότητας δεν διαφέρουν σημαντικά από καύσιμο σε καύσιμο, ούτε εξαρτώνται σημαντικά από την φύση της πυρκαγιάς. Η πιο γνωστή μέθοδος εκτίμησης της ροής ακτινοβολίας από πυρκαγιές σε δεξαμενές υγρών καυσίμων είναι το μαθηματικό μοντέλο της φλόγας στερεού καυσίμου (solid flame model), το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 3.2. Σε αυτήν την περίπτωση, η φλόγα θεωρείται πως είναι ένας στερεός κατακόρυφος κύλινδρος που εκπέμπει θερμική ακτινοβολία από τις πλευρές του. Αυτό το μοντέλο είναι σχετικά απλό, αλλά απαιτεί εκτιμήσεις της διαμέτρου και του ύψους του κυλίνδρου και μία επιπλέον εκτίμηση της εκπεμπόμενης ισχύος [26].

Στο μαθηματικό μοντέλο της φλόγας στερεού καυσίμου (solid flame model), η ροή της θερμικής ακτινοβολίας, q'' , από την πυρκαγιά σε ένα κοντινό αντικείμενο δίνεται από τον τύπο:

$$q'' = F * E_f * \tau * \epsilon_f \quad (3.1)$$

Οι όροι της παραπάνω σχέσης είναι οι εξής:

F: είναι ο συντελεστής ορατότητας ανάμεσα στον στόχο και την πυρκαγιά, ο οποίος τυπικά προσδιορίζεται θεωρώντας σταθερό το σχήμα της πυρκαγιάς,

τ : η ατμοσφαιρική μεταδοτικότητα που δικαιολογεί την απορρόφηση ακτινοβολίας από τους υδρατμούς,

E_f : η εκπεμπόμενη ισχύς της πυρκαγιάς, που συνήθως εκτιμάται εμπειρικά (kW/m^2),

ϵ_f : η αποτελεσματική ακτινοβολία της φλόγας που εκφράζεται ως $1 - e^{-k * D}$, όπου

k: ο συντελεστής απορρόφησης και

D: το πλάτος ή η διάμετρος της φλόγας.



Για μεγάλες τιμές διαμέτρου, η αποτελεσματική ακτινοβολία της φλόγας μπορεί να θεωρηθεί ίση με ένα. Επίσης, για εκτιμήσεις στα συντηρητικά πλαίσια της θεώρησης του συγκεκριμένου μοντέλου, η ατμοσφαιρική μεταδοτικότητα θεωρείται ίση με ένα. Επομένως, μένει να γίνει υπολογισμός του F και του E_f [26].

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΚΠΕΜΠΟΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ E_f

Δύο συχνά χρησιμοποιούμενες σχέσεις της εκπεμπόμενης ισχύος είναι:

$$E_f = E_m * e^{-S*D} + E_s * (1 - e^{-S*D}) \quad (3.2)$$

$$E_f = 58 * 10^{-0.00823 * D} \quad (3.3)$$

Οι όροι των παραπάνω σχέσεων είναι οι εξής:

E_f : η εκπεμπόμενη ισχύς της πυρκαγιάς (όχι μόνο η εκπεμπόμενη ισχύς των φωτεινών φλογών) (kW/m^2),

E_m : η μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύς της φλόγας (140 kW/m^2),

E_s : η εκπεμπόμενη ισχύς του καπνού (20 kW/m^2),

S : μία εμπειρική σταθερά (0.12 m^{-1}),

D : το πλάτος της φλόγας (m) [27].

Ωστόσο, η μέτρηση της εκπεμπόμενης ισχύος των μεγάλων πυρκαγιών είναι δύσκολη και υπόκεινται σε σημαντική αβεβαιότητα. Οι μέθοδοι υπολογισμού του παρελθόντος, συμπεριλαμβανομένων των οδηγιών του Υπουργείου Αστικής Ανάπτυξης των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής (HUD) [28], θεωρούσαν ότι ο συντελεστής ορατότητας και η εκπεμπόμενη ισχύς ήταν ανεξάρτητα μεταξύ τους, το οποίο για ορισμένα σενάρια πυρκαγιάς οδηγούσε σε εκτιμήσεις των τιμών της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από την πυρκαγιά που ήταν σημαντικά μεγαλύτερες από τη συνολική ενέργεια της πυρκαγιάς. Αυτό που έλειπε από τις αναλύσεις αυτές ήταν ο υπολογισμός της συνολικής ενέργειας. Αυτό το πρόβλημα διορθώθηκε τις

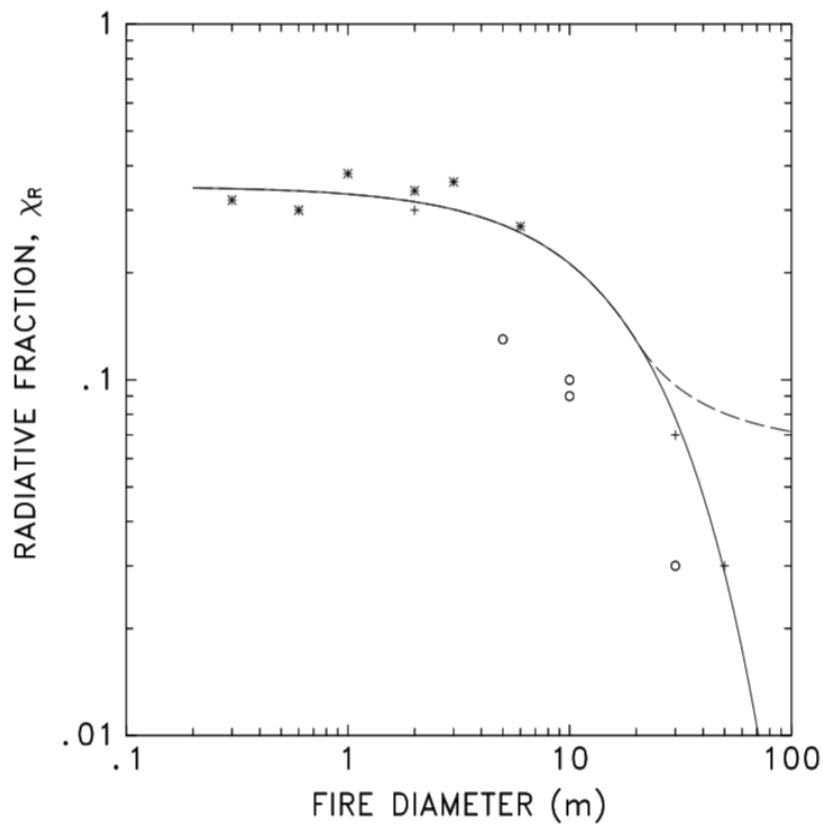


τελευταίες δεκαετίες, διότι πλέον το πεδίο της μηχανικής πυρασφάλειας αναγνωρίζει πως η συνολική ταχύτητα απελευθέρωσης θερμότητας μίας πυρκαγιάς (HRR) είναι υπεύθυνη για να προκαλέσει κάποια βλάβη. Εξάλλου, η HRR της φωτιάς είναι εύκολο να υπολογιστεί από τη θερμοκρασία της ή κάποιο φυσικό της μέγεθος, επειδή η HRR είναι ανάλογη με την ταχύτητα κατανάλωσης καυσίμου, ποσότητα που είναι σχετικά εύκολο να μετρηθεί.

Το Εργαστήριο Έρευνας για Δομικές Κατασκευές και Πυρκαγιές στο NIST [29] έχει εκτελέσει πειράματα με 100 μεγάλες πυρκαγιές και μία ποικιλία από εύφλεκτα υγρά και αέρια, με στόχο τον υπολογισμό της συνολικής ταχύτητας απελευθέρωσης θερμότητας (HRR) από την πυρκαγιά. Για πυρκαγιές με διάμετρο μέχρι περίπου τέσσερα μέτρα, το κλάσμα της ενέργειας που ακτινοβολείται στον περιβάλλοντα χώρο προς την συνολική ταχύτητα απελευθέρωσης θερμότητας της πυρκαγιάς (HRR), χ_r , είναι μεταξύ 0.30 και 0.40, και η τιμή αυτή μειώνεται με τη αύξηση της διαμέτρου της πυρκαγιάς λόγω της σκίασης του καπνού. Μεγάλο μέρος της θερμικής ακτινοβολίας από μία μεγάλη πυρκαγιά με παραγωγή καπνού εκπέμπεται από το φωτεινό τείχος (luminous "wall") της φλόγας που περιβάλλει τη βάση της πυρκαγιάς. Οι φλόγες πάνω από αυτό το φωτεινό τείχος επισκιάζονται από τον καπνό που σχηματίζεται λόγω της ατελούς καύσης. Ο αέρας παρασύρεται μέσα από την πυρκαγιά προς τη βάση της και η αιθάλη σχηματίζεται γρήγορα κατά την διαδικασία καύσης, δημιουργώντας ένα θερμικό φράγμα υψηλότερα στην πυρκαγιά που εμποδίζει την ενέργεια της ακτινοβολίας να διαφύγει στο εσωτερικό της πυρκαγιάς [26].

Η εικόνα πως η πυρκαγιά έχει το σχήμα ενός κυλίνδρου με ύψος H , διάμετρο D και συνολικό HRR ίσο με Q' , δηλαδή το μαθηματικό μοντέλο φλόγας στερεού καυσίμου (solid flame model), θεωρείται εξιδανικευμένη αναπαράσταση της πυρκαγιάς. Σε μία πιο γενική θεώρηση, η πυρκαγιά μπορεί να θεωρηθεί πως έχει ένα αυθαίρετο σχήμα με μήκος περιμέτρου ίσο με P . Η θεωρήση αυτή υιοθετήθηκε από την μελέτη των K. B. McGrattan et al [26]. Επομένως, η ακτινοβολούσα ενέργεια από την φλόγα μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\chi_r \cdot \dot{Q} = P \cdot H \cdot E_f \quad (3.4)$$



Διάγραμμα 3.1 Κλάσμα της ενέργειας που ακτινοβολείται στον περιβάλλοντα χώρο προς τη συνολική ταχύτητα απελευθέρωσης θερμότητας, χ_r , ως συνάρτηση της διαμέτρου της πυρκαγιάς D για το επτάνιο (*), το αργό πετρέλαιο (○) και την κηροζίνη (+). Η συμπαγής γραμμή είναι μία καμπύλη που περιγράφεται από την σχέση $\chi_r = 0.35 \exp(-\kappa D)$ όπου $\kappa = 0.05$ (Εξίσωση (3.5)) [26].

Οι μετρήσεις των ραδιομέτρων που λήφθηκαν από τις πειραματικές μελέτες των J. C. Yang et al [30] και H. Koseki et al [31] σε μεγάλες πυρκαγιές έδειξαν πως το χ_r μειώνεται με αύξηση της διαμέτρου της πυρκαγιάς σύμφωνα με την σχέση:

$$\chi_r = \chi_{rmax} \cdot e^{-\kappa \cdot D} \quad (3.5)$$

όπου $\chi_{rmax} = 0.35$ και $\kappa = 0.05 \text{ m}^{-1}$. Αυτές οι τιμές βασίστηκαν στην καμπύλη του Διαγράμματος 3.1 που περιλαμβάνει ένα εύρος από διαφορετικά καύσιμα υγρά που



προέκυψαν από πολλές μελέτες [29, 30, 31]. Το συνολικό HRR της πυρκαγιάς, \dot{Q} , μπορεί να εκφραστεί ως μία συνάρτηση του ποσοστού απελευθέρωσης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας q_f'' και της περιοχής της βάσης της πυρκαγιάς A:

$$\dot{Q} = q_f'' * A \quad (3.6)$$

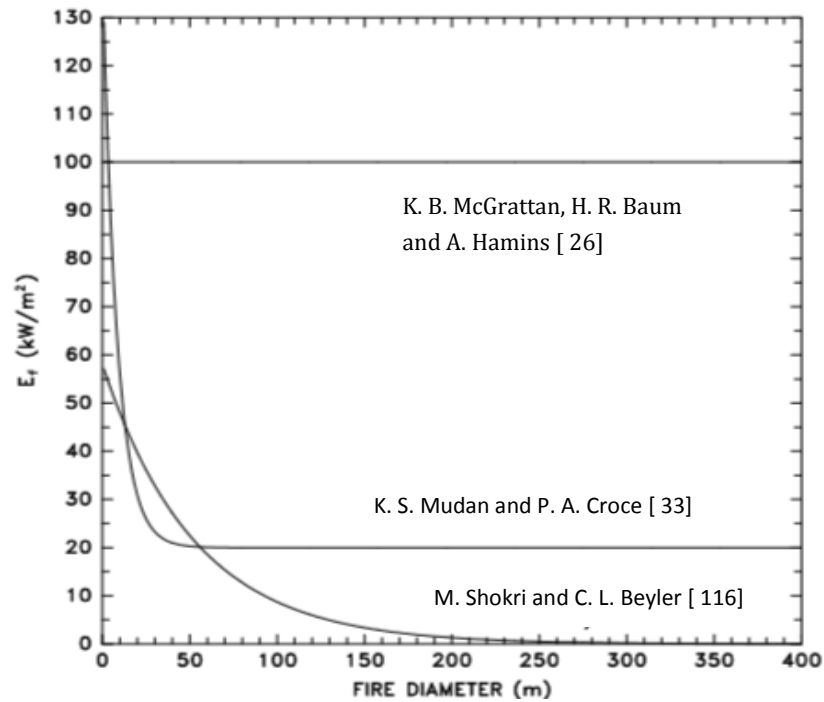
Για δεδομένο καύσιμο, το ποσοστό απελευθέρωσης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας q_f'' είναι σχετικά σταθερό επειδή η ταχύτητα καύσης της μάζας του καυσίμου ανά μονάδα επιφάνειας είναι σχετικά σταθερή.

Επομένως, οι δύο παράμετροι της Εξίσωσης (3.4) που πρέπει να προσδιοριστούν είναι το E_f και το ύψος H του εξιδανικευμένου κυλίνδρου. Οι αναφερόμενες τιμές της εκπεμπόμενης ισχύος (E_f) από φλεγόμενα υγρά και αέρια ποικίλουν σημαντικά από μελέτη σε μελέτη. Η διαφορά των αναφερόμενων τιμών της εκπεμπόμενης ισχύος σχετίζεται με τον ορισμό του ύψους του εξιδανικευμένου κυλίνδρου που αναπαριστά την πυρκαγιά. Συγκεκριμένα, η μορφή της πυρκαγιάς από απόσταση εμφανίζεται να έχει πολύ καπνό με περιστασιακές εκρήξεις της φωτεινής φλόγας που προκύπτουν από τον καπνό. Το ύψος της φλόγας της πυρκαγιάς ορίζεται ως η κατακόρυφη έκταση της περιοχής καύσης (Εικόνα 3.1) και μπορεί να θεωρηθεί ως το μέγιστο ύψος πάνω από το έδαφος στο οποίο εμφανίζονται οι φωτεινές εκρήξεις. Θεωρώντας μία εξιδανικευμένη κυλινδρική πυρκαγιά με ύψος ίσο με το ύψος της φλόγας της πυρκαγιάς (Εικόνα 3.2) κατά μέσο όρο περίπου το 20% της επιφάνειας της κυλινδρικής πυρκαγιάς αποτελείται από ορατές φλόγες και το 80% είναι καπνός. Το μεγαλύτερο ποσοστό της ορατής φλόγας βρίσκεται στην βάση της πυρκαγιάς, αν και περιοδικά φωτεινές φλόγες εμφανίζονται ψηλά και μέσα στο πλουμίο (plume) του καπνού.

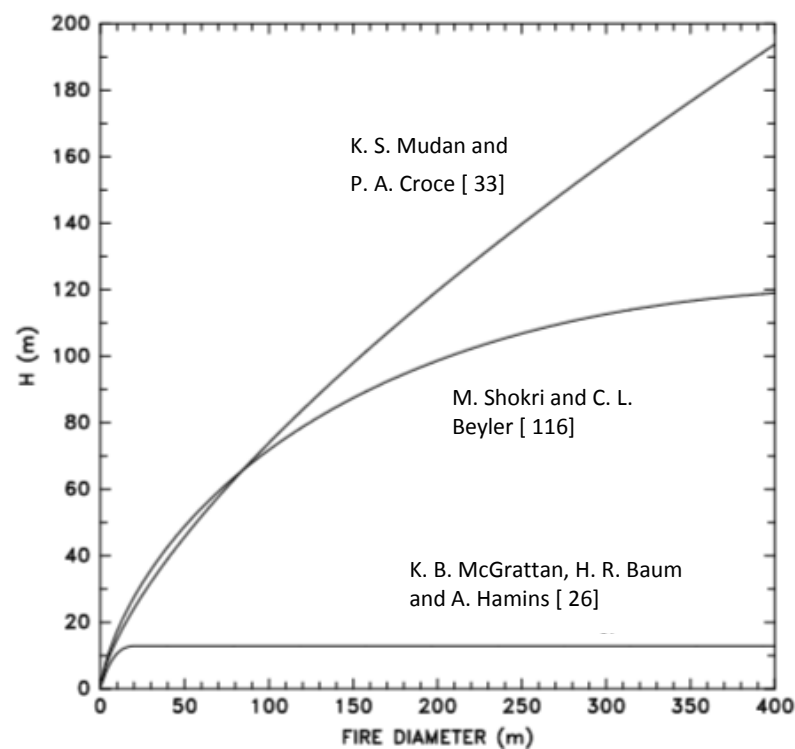


Εικόνα 3.3 Φωτογραφία από μία πυρκαγιά σε τετράγωνη δεξαμενή 15 m που περιέχει πετρέλαιο με νερό [26].

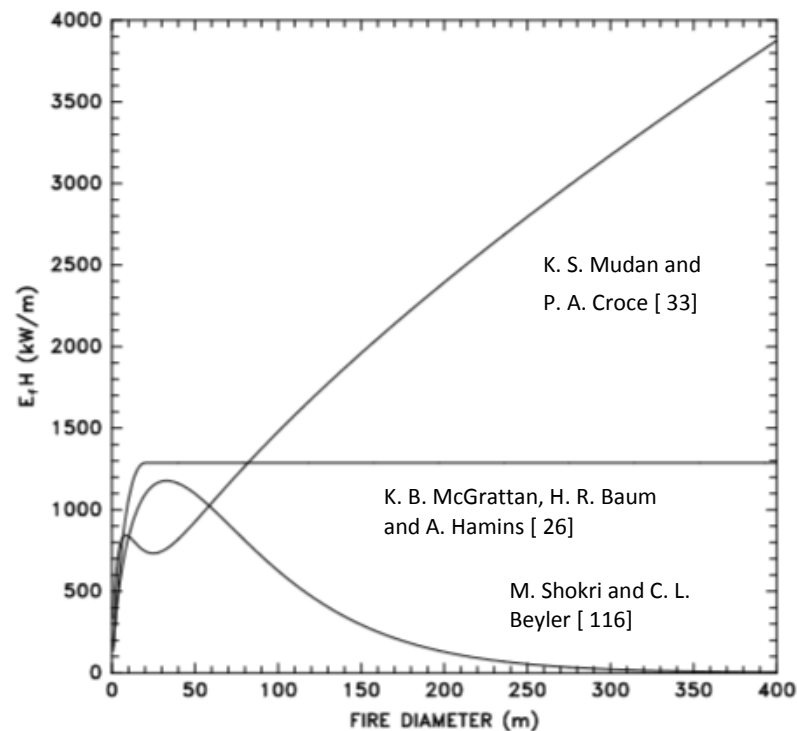
Η Εικόνα 3.3 δείχνει μία φωτογραφία από μία πυρκαγιά πετρελαίου σε μία τετράγωνη λεκάνη από χάλυβα. Οι αναφερόμενες τιμές της εκπεμπόμενης ισχύος σε μία τέτοια πυρκαγιά είναι συνήθως οι μέσες τιμές από το συνολικό ύψος της φλόγας. Εάν η αναφερόμενη μέση τιμή εμφανίζεται και στην επιφάνεια του εξιδανικευμένου κυλίνδρου του οποίου το ύψος είναι ίσο με το ύψος της φλόγας της πυρκαγιάς, τότε η εκτίμηση της ροής ακτινοβολίας σε αποστάσεις μεγαλύτερες από μερικές διαμέτρους των πυρκαγιών θα είναι ακριβής. Ωστόσο, σε μικρότερες αποστάσεις η ροή της ακτινοβολίας εκτιμάται πως είναι υποεκτιμημένη, επειδή η ενέργεια της ακτινοβολίας θεωρείται πως διανέμεται σε όλο το ύψος της πυρκαγιάς, αντί να είναι συγκεντρωμένη κοντά στην βάση της, όπως συμβαίνει στην πραγματικότητα [26].



Διάγραμμα 3.2 Η εκπεμπόμενη ισχύς ως συνάρτηση της διαμέτρου της πυρκαγιάς για πυρκαγιά σε δεξαμενή βενζίνης σύμφωνα με τα δεδομένα διαφόρων μελετών.



Διάγραμμα 3.3 Το ύψος της φλόγας ως συνάρτηση της διαμέτρου της πυρκαγιάς για πυρκαγιά σε δεξαμενή βενζίνης σύμφωνα με τα αποτελέσματα μελετών.



Διάγραμμα 3.4 Η ροή ενέργειας ακτινοβολίας, $E_f \cdot H$, ως συνάρτηση της διαμέτρου της πυρκαγιάς για πυρκαγιά σε δεξαμενή βενζίνης σύμφωνα με τα αποτελέσματα μελετών.

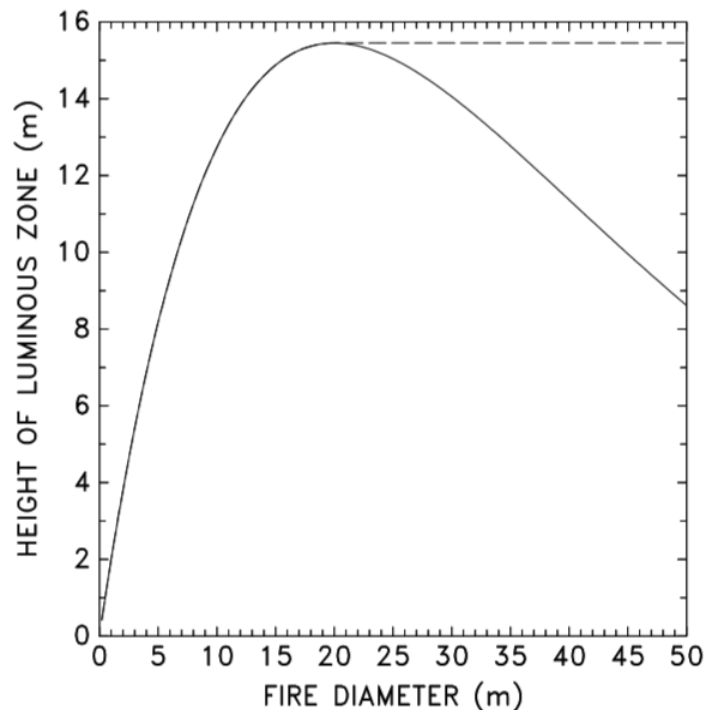
Για πυρκαγιές με διάμετρο μεγαλύτερη από 30 m, η μέση εκπεμπόμενη ισχύς έχει αναφερθεί πως είναι μικρότερη από 31.5 kW/m². Τα Διαγράμματα 3.2-3.4 απεικονίζουν συσχετίσεις της εκπεμπόμενης ισχύος, E_f , και του ύψους της φλόγας, H . Τόσο η μέθοδος των Shokri και Beyler [116] όσο και η μέθοδος των Mudan και Croce [33] χρησιμοποίησαν μία μέση τιμή της εκπεμπόμενης ισχύος πάνω από το ύψος της φλόγας της πυρκαγιάς. Και οι δύο συσχετίσεις εμφάνισαν τιμές μικρότερες από 31.5 kW/m² για πυρκαγιές με διάμετρο μεγαλύτερη από 30 m (Διάγραμμα 3.2). Με βάση αυτά τα δεδομένα προέκυψε το συμπέρασμα πως τα κτίρια μπορούν να χτιστούν ακριβώς δίπλα σε θέσεις που δυνητικά μπορούν να υπάρξουν μεγάλες πυρκαγιές λόγω του ότι η προβλεπόμενη ροή δεν υπερβαίνει τα 31.5 kW/m² ανεξάρτητα της απόστασής της από την πυρκαγιά. Ωστόσο, επειδή οι κατευθυντήριες γραμμές του Υπουργείου Αστικής Ανάπτυξης των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής (HUD) [28]



πρέπει να λάβουν υπόψιν τόσο το εγγύς όσο και το μακρινό πεδίο, και λόγω της σημασίας της αξιολόγησης της αποτελεσματικότητας των θερμικών φραγμάτων, η μεθοδολογία για την πρόβλεψη της ροής της ακτινοβολίας πρέπει να είναι εφαρμόσιμη σε ολόκληρη την κλίμακα της πυρκαγιάς και σε αποστάσεις διαχωρισμού.

Η μεθοδολογία των K. S. Mudan et al [33] απέδωσε περίπου τις ίδιες τιμές για το γινόμενο $E_f \cdot H$, όπως και άλλες μέθοδοι, ωστόσο το E_f θεωρήθηκε ως η εκπεμπόμενη ισχύς από την φωτεινή περιοχή της φλόγας (υψηλότερη από την μέση εκπεμπόμενη ισχύ που αναφέρεται συχνά στην βιβλιογραφία), και το H θεωρήθηκε ως το ύψος αυτής την φωτεινής περιοχής (χαμηλότερο από το ύψος της φλόγας που μπορεί να προβλεφθεί από τις μηχανικές συσχετίσεις). Για λόγους απλότητας, θεωρήθηκε η σταθερή τιμή της εκπεμπόμενης ισχύος ίση με 100 kW/m^2 , επειδή αναφερόταν στις φωτεινές εκπομπές από πυρκαγιές βενζίνης και κηροζίνης. Το ύψος της φωτεινής ζώνης της φλόγας υπολογιζόταν από την Εξίσωση (3.4). Για την απλοποίηση της ανάλυσης, η περιοχή της πυρκαγιάς θεωρήθηκε κυκλική ($P=\pi D$ και $Q'=\pi (D/2)^2 q_f''$), αλλά αυτή η υπόθεση δεν είναι περιοριστική. Αντικαθιστώντας τις εκφράσεις του χ_r και του Q' στην Εξίσωση (3.4) προκύπτει η εξής έκφραση του ύψους:

$$H = \frac{\chi_{r\max} e^{-\kappa D} D q_f''}{4 E_f} \quad (3.7)$$



Διάγραμμα 3.5 Το ύψος της φωτεινής ζώνης της φλόγας για πυρκαγιά βενζίνης, όπου $\chi_{rmax}=0.35$, $q' f''=2,400 \text{ kW/m}^2$, $\kappa=0.05 \text{ m}^{-1}$, και $E_f=100 \text{ kW/m}^2$ (Εξίσωση (3.7)) με βάση την μελέτη των των K. S. Mudan et al [33]. Η διακεκομμένη γραμμή στο διάγραμμα αντιπροσωπεύει το H_{max} ³ [26].

Στο Διάγραμμα 3.5 εμφανίζεται το H ως συνάρτηση του D . Στο διάγραμμα αυτό το H φτάνει την μέγιστη τιμή του όταν $D=20 \text{ m}$. Λόγω της έλλειψης δεδομένων σχετικά με το χ_r και το Q' για πολύ μεγάλες πυρκαγιές, θεωρήθηκε πως για πυρκαγιές με διάμετρο μεγαλύτερη από 20 m , το ύψος της ζώνης της φωτεινής περιοχής παραμένει στην μέγιστη τιμή. Η μέγιστη τιμή του ύψους προκύπτει με αντικατάσταση του $D=20 \text{ m}$, $\chi_{rmax}=0.35$, $\kappa=0.05 \text{ m}^{-1}$, και $E_f=100 \text{ kW/m}^2$ στην Εξίσωση (3.7):

³ Γενικά, το μέγιστο ύψος της φωτεινής περιοχής της φλόγας για μία πυρκαγιά σε δεξαμενή υγρού καυσίμου δίνεται από τον τύπο $H_{max}=6.4 \times 10^{-3} q' f''$, όπου $q' f''$ είναι το ποσοστό απελευθέρωσης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας σε μονάδες kW/m^2 .



$$H_{\max} = \frac{0.35 \cdot e^{-1} \cdot 20 \cdot q''_f}{4 \cdot 100} = 6.4 \times 10^{-3} \times q''_f \quad (3.8)$$

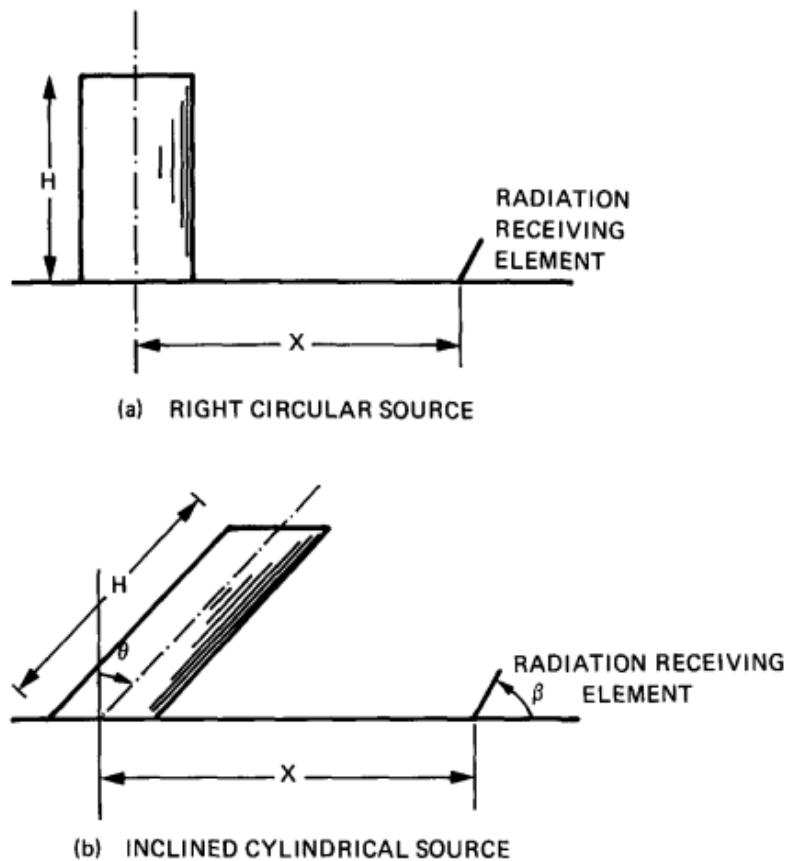
Το Διάγραμμα 3.4 συγκρίνει τα αποτελέσματα του $E_f \cdot H$ με τις τρεις μεθοδολογίες (Mudan και Croce [33], Shokri και Beyler [116] και K. B. McGrattan, H. R. Baum and A. Hamins [26]). Για πυρκαγιές με διαμέτρους ανάμεσα σε 1 m και 50 m όλες οι μέθοδοι εμφανίζουν παρόμοια αποτελέσματα των τιμών $E_f \cdot H$. Για πυρκαγιά με διάμετρο μεγαλύτερη από 50 m, οι μέθοδοι αποκλίνουν, λόγω του ότι τα πειράματα στα οποία βασίστηκαν οι συσχετισμοί δεν περιλαμβάνουν πυρκαγιές με διαμέτρους μεγαλύτερες από 50 m. Ωστόσο, οι κατευθυντήριες γραμμές του Υπουργείου Αστικής Ανάπτυξης των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής (HUD) πρέπει να περιλαμβάνουν δεδομένα για πυρκαγιές των οποίων η διάμετρος θα είναι δυνητικά μέχρι και μερικές εκατοντάδες μέτρα. Η υπόθεση που έγινε από την μεθοδολογία των K. S. Mudan and P. A. Croce [26] είναι ότι για διαμέτρους μεγαλύτερες των 20 m η ροή της ενέργειας ακτινοβολίας ανά μονάδα μήκους της περιμέτρου της πυρκαγιάς και οι τιμές του $E_f \cdot H$, παραμένουν σχετικά σταθερές. Έτσι μπόρεσε να γίνει η πρόβλεψη της ροής της ακτινοβολίας από εξαιρετικά μεγάλες πυρκαγιές που δεν έχουν ποτέ μελετηθεί πειραματικά [26].

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΟΡΑΤΟΤΗΤΑΣ F

Στην συνέχεια μένει να καθορισμός του συντελεστή ορατότητας F (view factor) από την πυρκαγιά σε έναν στόχο για τον υπολογισμό της ροής της θερμικής ακτινοβολίας από την Εξίσωση (3.1). Για το υπολογισμό του συντελεστή ορατότητας, έχουν αναπτυχθεί βιβλιογραφικά ορισμένες εξισώσεις, ο οποίες παρουσιάζονται παρακάτω. Γενικά, ο συντελεστής ορατότητας ανάμεσα σε μία πυρκαγιά και ένα στοιχείο εκτός της πυρκαγιάς εξαρτάται από το σχήμα της φλόγας, την σχετική απόσταση ανάμεσα στο στοιχείο και την πυρκαγιά και τον προσανατολισμό του στοιχείου. Η γενική εξίσωση υπολογισμού του συντελεστή ορατότητας είναι η ακόλουθη:

$$F_{A1 \rightarrow dA2} = \oint_{A1} \frac{\cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2}{r^2} dA_1 \quad (3.9)$$

Στην παραπάνω εξίσωση οι όροι θ_1 και θ_2 είναι οι γωνίες που σχηματίζονται από τις καθέτους dA στην πυρκαγιά και dA_2 στο στοιχείο λήψης αντίστοιχα, ενώ r είναι η απόσταση ανάμεσα στο στοιχείο της πυρκαγιάς και στο στοιχείο λήψης. Η ολοκλήρωση διεξάγεται σε όλη την επιφάνεια της φλόγας.



Εικόνα 3.4 Γεωμετρική διαμόρφωση για τον υπολογισμό των συντελεστών ορατότητας για κατακόρυφες κυκλικές και κεκλιμένες κυλινδρικές πηγές [16].

Στο μαθηματικό μοντέλο φλόγας στερεού καυσίμου (solid flame model), ο κύλινδρος προσεγγίζει την τυρβώδη φλόγα. Υπό συνθήκες έλλειψης ανέμου, ο κύλινδρος είναι κατακόρυφος. Υπό την επίδραση του ανέμου, ο κύλινδρος θεωρείται πως γέρνει. Αυτές οι δύο διαμορφώσεις του μαθηματικού μοντέλου φλόγας στερεού καυσίμου (solid flame model) δίνονται στην Εικόνα 3.4. Οι οριζόντιοι και



κατακόρυφοι συντελεστές ορατότητας για έναν κατακόρυφο κύλινδρο δίνονται από τις εξής εξισώσεις:

$$F_H = \frac{1}{\pi} * \left[\frac{(B-1/S)}{\sqrt{B^2-1}} * \tan^{-1} \sqrt{\frac{(B+1)*(S-1)}{(B-1)*(S+1)}} - \frac{(A-1/S)}{\sqrt{A^2-1}} * \tan^{-1} \sqrt{\frac{(A+1)*(S-1)}{(A-1)*(S+1)}} \right] \quad (3.10)$$

$$F_V = \frac{1}{\pi} * \left[\frac{1}{S} * \tan^{-1} \frac{H}{\sqrt{S^2-1}} + \frac{H}{S} * \left\{ \tan^{-1} \sqrt{\frac{S-1}{S+1}} - \frac{A}{\sqrt{A^2-1}} * \tan^{-1} \sqrt{\frac{(A+1)*(S-1)}{(A-1)*(S+1)}} \right\} \right] \quad (3.11)$$

οι όροι της παραπάνω εξίσωσης είναι οι εξής:

H: το ύψος της φλόγας

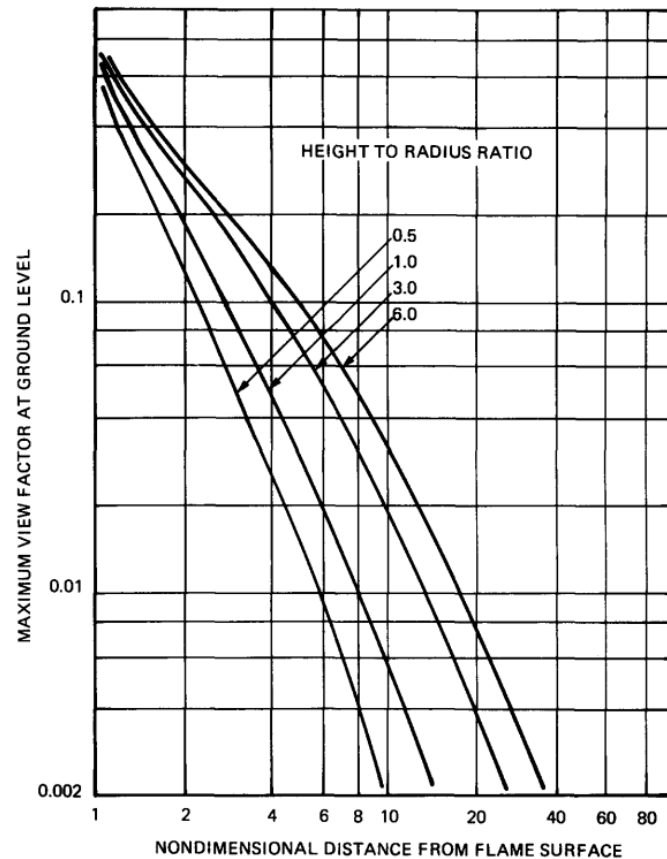
S: η απόσταση του παρατηρητή από τον άξονα/ακτίνα της φλόγας

$$A = \frac{H^2 + S^2 + 1}{2 * S} \quad (3.12)$$

$$B = \frac{1 + S^2}{2 * S} \quad (3.13)$$

Η μέγιστη τιμή του συντελεστή ορατότητας είναι η συνισταμένη της κατακόρυφης και της οριζόντιας συνιστώσας:

$$F_m = \sqrt{F_H^2 + F_V^2} \quad (3.14)$$



Διάγραμμα 3.6 Οι μέγιστες τιμές του συντελεστή ορατότητας για έναν παρατηρητή που είναι τοποθετημένος στο επίπεδο του εδάφους για διάφορες τιμές του λόγου ύψος φλόγας προς την ακτίνα της φλόγας σύμφωνα με την μελέτη των K. S. Mudan and P. A. Croce [33].

Στο Διάγραμμα 3.6 απεικονίζεται ο μέγιστος συντελεστής ορατότητας, για διάφορες τιμές του λόγου ύψος κυλίνδρου προς ακτίνα κυλίνδρου, σε συνάρτηση με τη θέση ενός παρατηρητή που βρίσκεται σε απόσταση από την φλόγα σύμφωνα με την μελέτη των K. S. Mudan and P. A. Croce [33]. Για θέσεις πολύ κοντά στην πυρκαγιά, ο συντελεστής ορατότητας δεν επηρεάζεται άμεσα από το ύψος της φλόγας. Αυτό συμβαίνει επειδή ο παρατηρητής βλέπει την μέγιστη επιφάνεια της φλόγας και η αύξηση του ύψους της φλόγας δεν επιδρά σημαντικά στον συντελεστή ορατότητας. Ωστόσο, σε μεγαλύτερες αποστάσεις από την επιφάνεια της φλόγας, ο συντελεστής ορατότητας επηρεάζεται σημαντικά από το ύψος της φλόγας. Για παράδειγμα, σε μία απόσταση ίση με 10 φορές την ακτίνα της φλόγας, ο συντελεστής



ορατότητας ποικίλει από 0.003 σε 0.034 όταν το κλάσμα του ύψους της φλόγας προς την ακτίνα της φλόγας αυξάνεται από 0.5 σε 6 [16].

Με τον υπολογισμό του συντελεστή ορατότητας κυλίνδρων που ήταν τοποθετημένοι με κλίση ασχολήθηκαν και οι Rein et al [34]. Για τους υπολογισμούς τους, διαίρεσαν τον κύλινδρο που αντιπροσωπεύει την φλόγα σε ένα αριθμό στοιχειωδών ορθογωνίων περιοχών. Επιπλέον, οι Raj και Kalelkar [35] χρησιμοποίησαν μία αναλυτική προσέγγιση για τον προσδιορισμό των συντελεστών ορατότητας για κυλίνδρους που επίσης είχαν κλίση. Σύμφωνα με τις μελέτες αυτές, ο συντελεστής ορατότητας για κυλίνδρους με κλίση που είχαν κυκλική βάση δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$F = \frac{1}{\pi} * [(\cos \beta * \sin \theta - \sin \beta * \cos \theta)(A_1 * \cos \varphi + h * A_2) + \cos \beta * (A_3 - A_4)] \quad (3.15)$$

οι όροι της παραπάνω εξίσωσης είναι οι εξής:

β : η γωνία κλίσης από ένα οριζόντιο παρατηρητή

φ : $\sin^{-1} 1/S$

H: το ύψος της φλόγας

S: η απόσταση του παρατηρητή από τον άξονα/ακτίνα της φλόγας

Οι άλλες παράμετροι που εμφανίζονται στην Εξίσωση (3.15) είναι:

$$A_1 = \frac{1}{B_1} * \left[\tan^{-1} \left[\frac{h - (S - \frac{1}{S}) * \sin \theta}{B_1} \right] + \tan^{-1} \left[\frac{(S - \frac{1}{S}) * \sin \theta}{B_1} \right] \right] \quad (3.16)$$

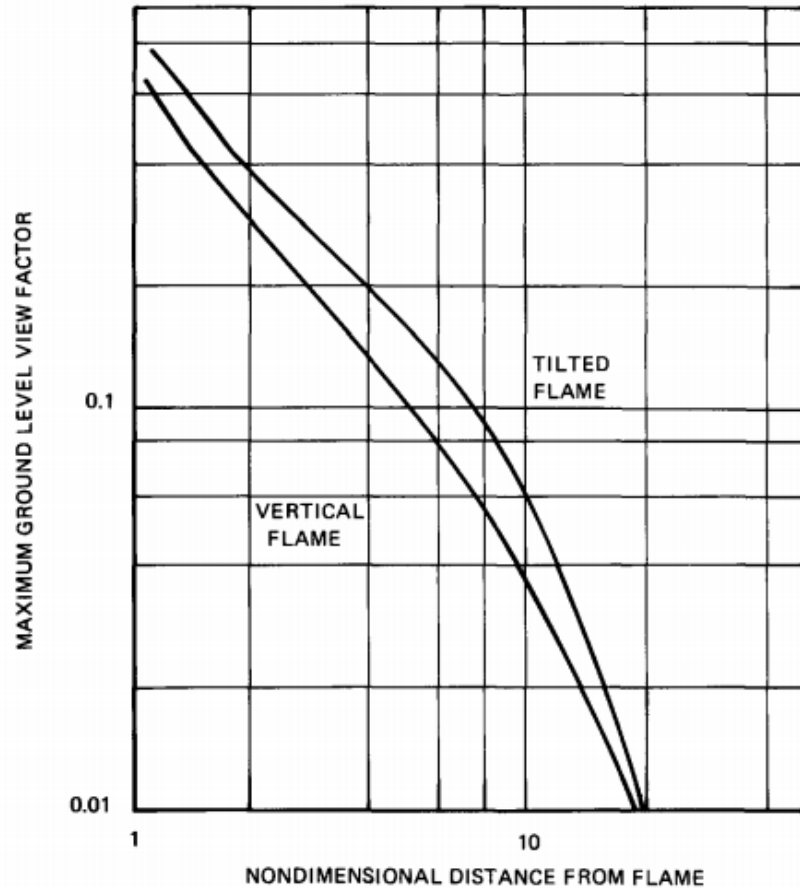
$$B_1 = \left\{ (S^2 - 1) * \cos^2 \theta + \left(1 - \left(\frac{1}{S}\right)^2 * \sin^2 \theta \right) \right\}^{1/2} \quad (3.17)$$

$$A_2 = \int_{\nu=0}^{\pi/2} \frac{\sin \nu \, d\nu}{[(1+h^2+S^2-2*S*h*\sin\theta)+2(h*\sin\theta-S)\sin\nu]} \quad (3.18)$$

$$A_3 = \int_{\nu=0}^{\pi/2} \frac{(S*\sin \nu - 1) \, d\nu}{(1+S^2-2*S*\sin\nu)} \quad (3.19)$$

$$A_4 = \int_{\nu=0}^{\pi/2} \frac{(S*\sin \nu - 1) \, d\nu}{[(1+h^2+S^2-2*S*h*\sin\theta)+2(h*\sin\theta-S)*\sin\nu]} \quad (3.20)$$

Οι παραπάνω όροι υπολογίστηκαν με στόχο τον καθορισμό του συντελεστή ορατότητας. Για τον υπολογισμό των όρων αυτών ο προσανατολισμός του παρατηρητή μεταβαλλόταν από 0 μέχρι 180 για τον υπολογισμό της μέγιστης τιμής του συντελεστή ορατότητας [16].



Διάγραμμα 3.7 Οι μέγιστες τιμές του συντελεστή ορατότητας για έναν κατακόρυφο κυκλικό κύλινδρο και για ένα πλάγια τοποθετημένο κύλινδρο. Ο λόγος του ύψους της φλόγας προς την διάμετρο είναι τρία. Η γωνία κλίσης του κεκλιμένου κυλίνδρου είναι 45°. Το διάγραμμα αυτό προέκυψε από τα δεδομένα των μελετών των K. S. Mudan and P. A. Croce [33], Rein et al [34] και Raj και Kalelkar [35].



Στο Διάγραμμα 3.7 απεικονίζονται οι υπολογιζόμενες τιμές του συντελεστή ορατότητας για μία φλόγα με τιμή του λόγου ύψος προς ακτίνα ίση με 6 και τιμή της γωνίας κλίσης ίση με 45° σύμφωνα με τα δεδομένα των μελετών των δεδομένα των μελετών των K. S. Mudan and P. A. Croce [33], Rein et al [34] και Raj και Kalelkar [35]. Επιπλέον, στο Διάγραμμα 3.7 απεικονίζονται οι τιμές του συντελεστή ορατότητας για έναν κατακόρυφο κύλινδρο παρόμοιας γεωμετρίας. Όπως γίνεται φανερό από το Διάγραμμα 3.7, ο κύλινδρος που βρίσκεται υπό κλίση παρουσιάζει υψηλότερες τιμές του συντελεστή ορατότητας από τις αντίστοιχες του κατακόρυφου κυλίνδρου. Οι συντελεστές ορατότητας και για τις δύο γεωμετρίες εμφάνισαν παρόμοιες τιμές σε μεγάλες αποστάσεις από την επιφάνεια της φλόγας.

3.3 ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΑΠΟ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΣΤΕΡΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Οι περισσότερες σχέσεις που υπάρχουν στη βιβλιογραφία αφορούν στην εκπεμπόμενη ισχύ που αναπτύσσεται σε δεξαμενές υγρών καυσίμων, ενώ υποεκτιμούν την εκπεμπόμενη ισχύ της φλόγας που αναπτύσσεται σε στερεά καύσιμα. Με την χρήση πειραματικών δεδομένων προέκυψαν συσχετίσεις εκπεμπόμενης ισχύος για στερεά καύσιμα, οι οποίες δίνουν αρκετά ρεαλιστικά αποτελέσματα [27].

Η ροή θερμότητας (kW/m^2) που μεταδίδεται από μία πυρκαγιά σε έναν στόχο δίνεται από την Εξίσωση (3.1). Η σχέση αυτή, που αναλύθηκε παραπάνω, αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας δεδομένα για πυρκαγιές σε δεξαμενές υγρών καυσίμων, ωστόσο χρησιμοποιείται συνήθως και για προβλέψεις σε πυρκαγιές στερεών καυσίμων. Επιπλέον, οι Εξισώσεις (3.2) και (3.3), που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της εκπεμπόμενης ισχύος, προέρχονται από δεδομένα για πυρκαγιές σε δεξαμενές. Οι σχέσεις αυτές δείχνουν τη μείωση της εκπεμπόμενης ισχύος, καθώς η διάμετρος της φλόγας αυξάνεται. Αυτή η συμπεριφορά είναι αναμενόμενη και εξηγείται από το γεγονός ότι κατά την καύση των υδρογονανθράκων εμφανίζεται πυκνός μαύρος καπνός κατά μήκος της περιφέρειας της πυρκαγιάς ο οποίος θα απορροφήσει ένα σημαντικό τμήμα της ακτινοβολίας και θα μειώσει την

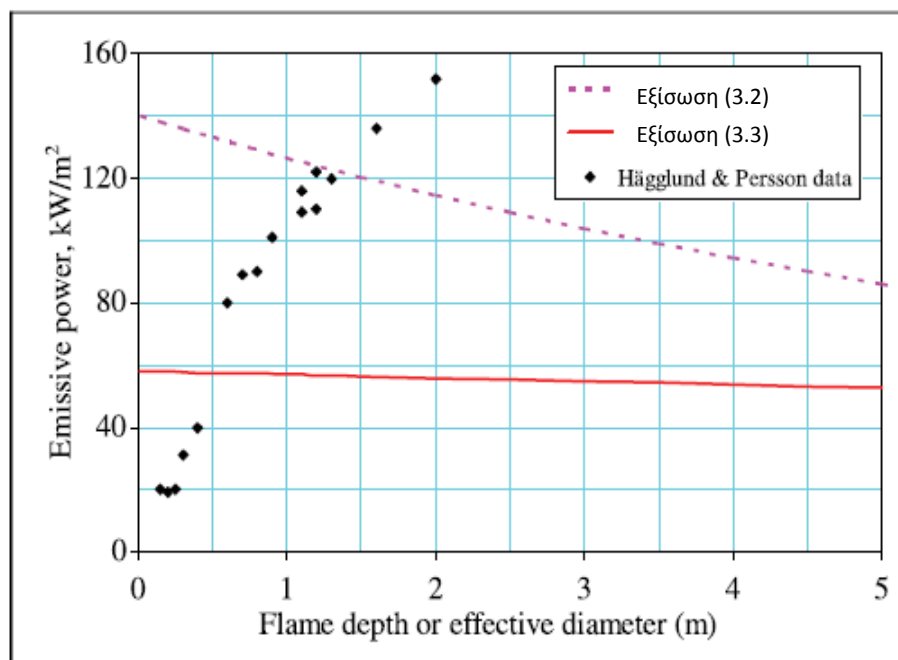


αποτελεσματική εκπεμπόμενη ισχύ από τη φωτιά, όπως αναλύθηκε παραπάνω. Παρότι οι παραπάνω σχέσεις αναπτύχθηκαν για πυρκαγιές υδρογονανθράκων, η NFPA 555 [36] προτείνει πως μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για άλλα καύσιμα.

Δεν υπάρχουν πολλά δεδομένα μέτρησης της εκπεμπόμενης ισχύος για πυρκαγιές εκτός αυτών που αναπτύσσονται σε δεξαμενές υγρών καυσίμων. Δημοσιευμένα δεδομένα εκπεμπόμενης ισχύος έχουν εκτιμηθεί από μετρήσεις της θερμοκρασίας της φλόγας ή προέρχονται από μετρήσεις της ροής θερμότητας χρησιμοποιώντας εκτιμήσεις γεωμετρικών σχημάτων. Υπάρχουν δύο εμπειρικές σειρές δεδομένων, όπου μετρήθηκε η εκπεμπόμενη ισχύς φλογών.

Οι Hägglund και Persson [37] μέτρησαν την εκπεμπόμενη ισχύ των φλογών παραγόμενη από ξύλα. Οι μετρήσεις έγιναν σε ύψος 0.15 m ή 0.5 m πάνω από την επιφάνεια. Η γεωμετρική διαμόρφωση των ξύλων είχε 1.2 m πλάτος και βάθος τους (ή αποτελεσματική διάμετρος της φλόγας) διέφερε από 0.25 έως 2 m. Η εκπεμπόμενη ισχύς υπολογίστηκε με φασματόμετρο και διέφερε από 20 έως 150 kW/m², με τις μεγαλύτερες τιμές να παρατηρούνται για μεγαλύτερες διαμέτρους φλογών. Οι μεγαλύτερες θερμοκρασίες των φλογών διέφεραν από 600 έως 1,030 °C. Οι θερμοκρασίες μετρήθηκαν με θερμοστοιχεία σε τμηματικές αποστάσεις των 0.1 m, στο ύψος του φασματόμετρου.

Το Διάγραμμα 3.6 δείχνει τα πειραματικά αποτελέσματα των Hägglund and Persson [37], μαζί με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επίλυση των Εξισώσεων (3.2) και (3.3).



Διάγραμμα 3.8 Εκπεμπόμενη ισχύς συναρτήσει της αποτελεσματικής διαμέτρου της φλόγα με βάση τα δεδομένα των Hägglund and Persson [37].

Η δεύτερη σειρά μετρήσεων έγινε από τους Butler et al. [38]. Κατά την πειραματική μελέτη των Butler et al. [38], μετρήθηκε η εκπεμπόμενη ισχύς της ακτινοβολίας και η κατανομή των θερμοκρασιών σε φλεγόμενες ξύλινες εξέδρες. Αυτές οι εξέδρες είχαν μέσο ύψος 13 m, και πλάτος που διέφερε από 75 έως 150 m. Τα όργανα τοποθετήθηκαν στο κάτω άκρο των πύργων για κάθε δοκιμή, ενώ η φωτιά ξεκίνησε από το άνω άκρο των πύργων. Η ροή θερμότητας της ακτινοβολίας μετρήθηκε με ακτινόμετρα στενής οπτικής γωνίας, παρατηρώντας οριζόντια το μέτωπο της φλόγας που πλησίαζε. Το πεδίο όρασης σχημάτιζε γωνία ίση με 4.1°. Για την μέτρηση της θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκαν θερμοστοιχεία από γυμνά καλώδια τύπου K και διαμέτρου 0.13 mm.

Έξι δοκιμές διεξάχθηκαν κατά την διάρκεια του πειράματος των Butler et al. [38]. Τα δημοσιευμένα αποτελέσματα έχουν ομαδοποιηθεί τα στοιχεία από αυτές τις έξι δοκιμές κατά την ανύψωση του οργάνου με στόχο την κατανόηση της κατακόρυφης ροής θερμότητας και των θερμοκρασιακών κατανομών. Η μέση τιμή της εκπεμπόμενης ισχύος ήταν 190 kW/m² με τυπική απόκλιση τα 90 kW/m². Η



μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύς που παρατηρήθηκε στην διάρκεια των δοκιμών ήταν 290 kW/m². Δεν υπήρχε σημαντική μεταβολή στη κατακόρυφη κατανομή ροής θερμότητας για τα ομαδοποιημένα αποτελέσματα. Οι μέσες θερμοκρασίες διέφεραν από 550° C έως 1,000° C, με τις μικρότερες τιμές να εμφανίζονται σε απόσταση 3.1 m πάνω από το έδαφος. Η μέγιστη θερμοκρασία της φλόγας παρατηρήθηκε στους 1,330° C. Η τυπική απόκλιση για τις θερμοκρασίες της φλόγας στις πάνω ανυψώσεις (9.2, 12.3, και 13.8 m) ήταν περίπου 100° C. Τα αποτελέσματα αυτών των πειραμάτων μεγάλου μεγέθους, παρατίθενται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1 Πειραματικά αποτελέσματα των Butler et al [38].

Υψομετρικές θέσεις μέτρησης της ροής θερμότητας, (m)						
		13.8	12.3	9.2	6.2	3.1
Δοκιμή	Πύργος	Εκπεμπόμενη ισχύς της φλόγας (kW/m ²)				
1	4	122	139	170	109	189
1	5	175	219	219	163	205
4	1	231	186	...	88	140
4	4	161	180	183
5	3	166	150	134
6	1	...	277	260	268	253
6	2	156	229	178	290	280
9	2	220	243	259	238	160
9	3	243	199	289	178	258

Η μέση ταχύτητα εξάπλωσης της φωτιάς για τις δοκιμές των Butler et al [38] κυμαινόταν από 0.48 έως 1.16 m/s. Δεδομένου ότι η έντονη περίοδος καύσης διαρκούσε περίπου 30 s, η αποτελεσματική διάμετρος της φλόγας εκτιμήθηκε από την ταχύτητα εξάπλωσης της φλόγας και το χρόνο καύσης. Οι τιμές δίνονται στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2 Πειραματικά αποτελέσματα των Butler et al [38].

Δοκιμή	Υπολογιζόμενο ύψος της φλόγας (m)	Εκπεμπόμενη ισχύς (kW/m ²)	SD
A	28.2	169	39
1	17.7	171	39
4	22.2	167	45
5	14.4	150	16
6	18.0	243	47
9	34.8	229	40

Για την πρόβλεψη της μαθηματικής πρόβλεψης της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας με βάση τα δύο παραπάνω πειράματα χρησιμοποιήθηκε η συσχέτιση για ένα ισόθερμο αέριο που ακτινοβολεί ,

$$E_f = a \cdot (1 - e^{-b \cdot D_f}) \quad (3.21)$$

Οι όροι της παραπάνω σχέσης είναι οι εξής:

E_f : η εκπεμπόμενη ισχύς της φωτιάς (kW/m²)

D_f : η αποτελεσματική διάμετρος της φλόγας (m)

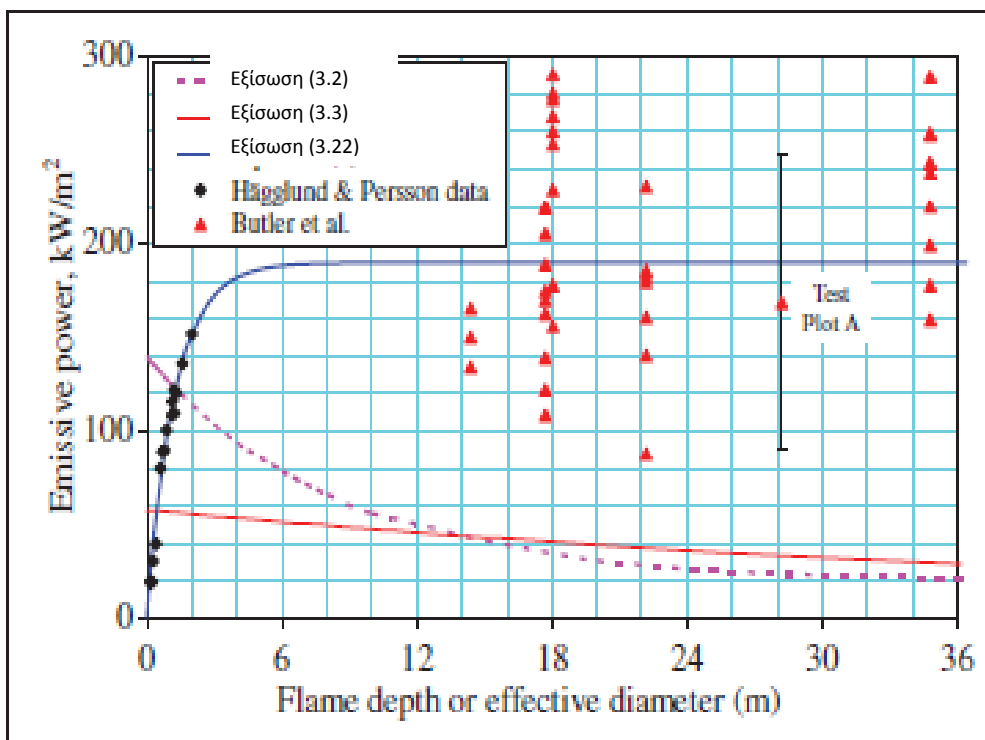
a : μία εμπειρική σταθερά (kW/m²)

b : μία εμπειρική σταθερά (m⁻¹)

Οι σταθερές εκτιμήθηκαν χρησιμοποιώντας ελάχιστα τετράγωνα των δεδομένων των αποτελεσμάτων των Πινάκων (3.1) και (3.2).

Η σταθερά a υπολογίστηκε ως 189 ± 16 kW/m² και η σταθερά b υπολογίστηκε ως 0.80 ± 0.18 m⁻¹. Αυτές οι τιμές στρογγυλοποιήθηκαν στα 190 και 0.80 αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα της νέας αυτής συσχέτισης φαίνονται στο Διάγραμμα 3.9, μαζί με τα πειραματικά αποτελέσματα των πειραμάτων των 2 ερευνητικών ομάδων. Αυτά τα αποτελέσματα είναι τα ίδια με τη σχέση που προτάθηκε από τον Babrauskas [39] χρησιμοποιώντας μόνο τα δεδομένα των Hägglund και Persson [37]. Η σχέση, λοιπόν που προκύπτει είναι η παρακάτω:

$$E_f = 190 * (1 - e^{-0.8 * D_f}) \quad (3.22)$$



Διάγραμμα 3.9 Η συσχέτιση της σχέσης υπολογισμού της εκπεμπόμενης ισχύος με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα από τα οποία προέκυψε.

Επομένως, με βάση τα παραπάνω προκύπτει ότι η εμπειρική συσχέτιση που προκύπτει από την Εξίσωση (3.22) είναι εξιδανικευμένη για πυρκαγιές που περιλαμβάνουν ξύλο και παρόμοια υλικά κυτταρίνης, καθώς προβλέπει ικανοποιητικά τα πειραματικά δεδομένα για φλόγες με αποτελεσματική διάμετρο από 0,15 έως 35 m.

Κατά την διάρκεια των δοκιμών των Hägglund και Persson [37] η αποτελεσματική διάμετρος της φλόγας περιορίστηκε στα 2 m. Τα δεδομένα που είχαν δημοσιευθεί το 2003 έδειχναν πως η ισχύς της Εξίσωσης (3.22) περιοριζόταν μόνο σε διαμέτρους φλόγας 0.15-2 m. Ωστόσο, κατά την μελέτη της διεύρυνσης της ισχύος της Εξίσωσης (3.22) σε μεγαλύτερες διαμέτρους προέκυψε πως για διαμέτρους μεγαλύτερες των 2 m οι εξισώσεις της NFPA 555 [36] υποεκτιμούσαν την



εκπεμπόμενη ισχύ για πυρκαγιές που περιλάμβαναν ξύλο και παρόμοια υλικά. Έτσι προκύπτει το συμπέρασμα πως η NFPA 555 [36] θα πρέπει να ανανεώσει τις εξισώσεις της, συμπεριλαμβάνοντας την Εξίσωση (3.22) για πυρκαγιές ξύλων και παρόμοιων υλικών.

3.4 ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΑΠΟ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΑΕΡΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Τα εύφλεκτα αέρια που αποθηκεύονται υπό πίεση, ιδιαίτερα το LNG και το LPG, δεν έχουν προβλέψιμη συμπεριφορά. Υπάρχει μεγάλος αριθμός αναφορών για πυρκαγιές LNG και LPG, στις οποίες ένα σύννεφο εύφλεκτου αερίου αναφλέγεται και σχηματίζει fireball με διάμετρο της τάξεως των 100 m. Η ακτινοβολία από πυρκαγιές αερίων που διαρρέουν από τις δεξαμενές αποθήκευσης μπορεί να προκαλέσει το φαινόμενο BLEVE μέσα στην δεξαμενή που είναι δυνατόν όχι μόνο να παράγει ένα τεράστιο ποσό θερμικής ακτινοβολίας, αλλά και να προκαλέσει την εκτόξευση τμημάτων της δεξαμενής σε δεκάδες ή εκατοντάδες μέτρα. Ειδικότερα, το LPG είναι τόσο ασταθές που είναι πιο πιθανόν να εξατμίζεται από το να σχηματίζει μία λίμνη υγρού, έτσι η σημαντική έρευνα που έχει γίνει για τις μεγάλες πυρκαγιές υγρών καυσίμων δεν μπορεί να ισχύσει για τις πυρκαγιές LPG.

Με βάση τα παραπάνω η πρόβλεψη της εκπομπής της ροής της θερμικής ακτινοβολίας από μία πυρκαγιά εύφλεκτων αερίων είναι πιο περίπλοκη από μία πυρκαγιά εύφλεκτου υγρού, επειδή πρέπει να ληφθούν υπόψιν πολλά πιθανά σενάρια. Σε μία πυρκαγιά υγρού καυσίμου, η δυναμική της πυρκαγιάς είναι περισσότερο κατανοητή και προβλέψιμη από την αντίστοιχη δυναμική που προκύπτει από αέρια καύσιμα. Αντί να υπάρξει μία ξεχωριστή μεθοδολογία για την εκτίμηση της θερμικής ακτινοβολίας για κάθε δυναμικό σενάριο πυρκαγιάς αερίου καυσίμου, είναι προτιμότερο να αναπτυχθεί μία απλή μέθοδος που να περικλείει μία ποικιλία σεναρίων που να αφαιρεί τις περισσότερες γεωμετρικές παραμέτρους από τους υπολογισμούς και να παραμένει γενική. Μία τέτοια μέθοδος είναι γνωστή ως το σημειακό μαθηματικό μοντέλο (point source model) (Εικόνα 3.2). Το μόνο που απαιτείται από αυτό το μοντέλο είναι μία εκτίμηση της συνολικής ταχύτητας



απελευθέρωσης θερμότητας από την πυρκαγιά και του κλάσματος ενέργειας που εκπέμπεται ως θερμική ακτινοβολία. Αυτά τα δεδομένα είναι διαθέσιμα με βάση τις μετρήσεις ενός ραδιομέτρου μακρινού πεδίου, αλλά είναι υπερβολικά περιορισμένα, διότι θεωρείται πως όλη η ενέργεια της ακτινοβολίας από την πυρκαγιά εκπέμπεται από ένα μόνο σημείο αντί να κατανέμεται σε ένα εξιδανικευμένο σχήμα (συνήθως έναν κώνο ή έναν κύλινδρο) που να αντιπροσωπεύει την πυρκαγιά [26].

Με βάση τα παραπάνω, η απλούστερη μέθοδος υπολογισμού της θερμικής ακτινοβολίας, που είναι γνωστή ως σημειακό μαθηματικό μοντέλο (point source model), μπορεί να εκτιμήσει την ταχύτητα απελευθέρωσης θερμότητας της πυρκαγιάς. Το μοντέλο αυτό θεωρεί ένα κλάσμα της συνολικής ενέργειας που απελευθερώνεται με την μορφή θερμικής ακτινοβολίας, και στην συνέχεια ορίζει αυτήν την ακτινοβολούσα ενέργεια πάνω σε μία σφαιρική επιφάνεια της οποίας η ακτίνα είναι η απόσταση του κέντρου της πυρκαγιάς από τον στόχο:

$$q''' = \frac{\chi_r \cdot Q'}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (3.23)$$

Ουσιαστικά, η μέθοδος αυτή υποθέτει ότι όλη η φλόγα μπορεί να θεωρηθεί ως μία μικρή πηγή θερμικής ενέργειας. Για στόχους σε μεγαλύτερη απόσταση από την απόσταση των μερικών μέτρων από την πηγή, αυτή η υπόθεση είναι αρκετά λογική. Ωστόσο, για πιο κοντινές αποστάσεις η υπόθεση αυτή δεν είναι έγκυρη, αλλά είναι γενική επειδή υποθέτει όλη η ενέργεια έχει συμπυκνωθεί σε ένα σημείο αντί να εξαπλωθεί πάνω από όλο το ύψος και το πλάτος της πυρκαγιάς, όπως υποτέθηκε από το μαθηματικό μοντέλο φλόγας στερεού καυσίμου (solid flame model). Επιπλέον, το σημειακό μαθηματικό μοντέλο (point source model) υποθέτει πως η ενέργεια που ακτινοβολείται από την φλόγα είναι ένα τμήμα της ενέργειας που απελευθερώνεται κατά την διάρκεια της καύσης και η συχνότητα της θερμικής ακτινοβολίας ποικίλει ανάλογα με το αντίστροφο τετράγωνο της απόστασης από την πηγή [16].

Η Εξίσωση (3.23) αποτελείται από δύο τμήματα: το κλάσμα της ακτινοβολίας χ_r , και την συνολική HRR, Q' . Επειδή οι πυρκαγιές των αερίων εμφανίζονται συχνά με την μορφή εκλάμψεων, δεν είναι απαραίτητο να θεωρηθεί ότι το χ_r μειώνεται με την μείωση της διαμέτρου της πυρκαγιάς, όπως έγινε παραπάνω στην περίπτωση των



πυρκαγιών σε δεξαμενές υγρών καυσίμων. Οι εκλάμψεις είναι πολύ πιο φωτεινές από τις πυρκαγιές σε δεξαμενές υγρών καυσίμων. Αυτό συμβαίνει διότι το οξυγόνο μπορεί να διεισδύσει καλύτερα στην περιοχή καύσης και έτσι η καύση να είναι πιο αποτελεσματική με τον σχηματισμό λιγότερου καπνού. Μία γενική εκτίμηση της τιμής του χ_r είναι το 0.2, η τιμή αυτή είναι κατάλληλη για ένα ευρύ φάσμα αερίων καυσίμων. Η εκτίμηση των τιμών HRR και \dot{Q} , δεν είναι τόσο εύκολη όσο στην περίπτωση των υγρών, επειδή τις περισσότερες φορές δεν υπάρχει διάμετρος για την πυρκαγιά. Αυτό συμβαίνει, διότι δεν υπάρχει δεξαμενή υγρού ούτε ακόμη και στην περίπτωση των υγροποιημένων αερίων όπως το LPG και το LNG. Σε αυτήν την περίπτωση γίνεται μία εκτίμηση της ταχύτητας καύσης της μάζας, \dot{m} , και στην συνέχεια πολλαπλασιάζεται με την θερμότητα καύσης (Πίνακας 3.3):

$$\dot{Q} = \dot{m} * \Delta H_c \quad (3.24)$$

Λόγω της εγγενούς αβεβαιότητας ως προς την πρόβλεψη του κινδύνου που σχετίζεται με την αποθήκευση των αερίων υπό πίεση, η εξέταση των θερμικών φραγμάτων ως μέσων ελάττωσης της ροής ακτινοβολίας σε μακρινούς στόχους είναι δύσκολη. Τα υγροποιημένα αέρια μπορούν να σχηματίσουν μία πηλίνα που να εκρήγνυται σε μία πυρκαγιά, ή ενδεχομένως να εξατμίζονται τόσο γρήγορα ώστε να σχηματίζεται ένα fireball ή τυρβώδεις μορφές jet. Στην πρώτη περίπτωση, ένα τοιχίο μπορεί να περιβάλλει την πυρκαγιά και εμποδίσει την μεταφορά ενός σημαντικού κλάσματος της ενέργειας ακτινοβολίας. Ωστόσο, στην δεύτερη περίπτωση ένα τοιχίο είναι δυνατόν να μειώσει ελάχιστα την επίδραση της θερμικής ακτινοβολίας στους γύρω στόχους. Κατά συνέπεια, η εκτίμηση των κινδύνων της θερμικής ακτινοβολίας από πυρκαγιές σε δεξαμενές αερίων υπό πίεση ή σε αγωγούς εύφλεκτων αερίων δεν πρέπει να περιλαμβάνει την δημιουργία θερμικών φραγμάτων [26].

Πίνακας 3.3 Ταχύτητες καύσης για εύφλεκτα αέρια ⁴ [41, 42].

Αέριο	Ταχύτητα καύσης (kg/m ² /s)	Θερμότητα καύσης (kJ/kg)	Ποσοστό απελευθέρωσης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας, q' r'' (kW/m ²)
Υγροποιημένα αέρια (Κρυογενικά)			
Υγρό Υδρογόνο	0.02	120,000	2,400
LNG	0.08	50,000	4,000
LPG	0.10	46,000	4,600
Αέρια			
Ακεταλδεΐδη	-	25,100	-
Βουταδιένιο	-	45,500	-
Βουτάνιο	-	45,400	-
Αιθάνιο	-	47,200	-
Αιθυλένιο	-	47,200	-
Οξείδιο του αιθυλενίου	-	27,700	-
Μεθάνιο	-	50,000	-
Προπάνιο	-	46,000	-
Προπυλένιο	-	45,800	-
Βινυλοχλωρίδιο	-	16,900	-

Παρόλο που το σημειακό μαθηματικό μοντέλο (point source model) είναι ελκυστικό λόγω της απλότητάς του, υπάρχουν δύο σημαντικοί περιορισμοί που πρέπει να ληφθούν υπόψιν. Ο πρώτος αφορά την μοντελοποίηση της ακτινοβολίας που παράγεται και ο δεύτερος αφορά την περιγραφή της μεταβολής της έντασης της θερμικής ακτινοβολίας ως συνάρτηση της απόστασης από την πηγή. Συγκεκριμένα, το σημειακό μαθηματικό (point source model) υπερεκτιμά την συχνότητα της θερμικής ακτινοβολίας σε σημεία παρατήρησης κοντά στην πυρκαγιά. Αυτό

⁴ Η στήλη <<Ποσοστό απελευθέρωσης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας>> αναφέρεται στην συνολική ενέργεια που παράγεται από την πυρκαγιά ανά μονάδα επιφάνειας. Να σημειωθεί πως οι τιμές αυτές είναι απαραίτητες για τα υγροποιημένα αέρια, διότι μόνο αυτά μπορούν να σχηματίσουν υγρό μέσα σε μία δεξαμενή. Οι μη συμπληρωμένες τιμές του πίνακα είτε δεν είναι είναι εφαρμόσιμες για τις αντίστοιχες ενώσεις.



συμβαίνει κυρίως επειδή η ακτινοβολία στο εγγύς πεδίο επηρεάζεται σημαντικά από το μέγεθος της φλόγας, το σχήμα, την κλίση και τον σχετικό προσανατολισμό του παρατηρητή. Ωστόσο, το μοντέλο μπορεί να προβλέψει την θερμική ακτινοβολία σε μεγαλύτερες αποστάσεις με λογική ακρίβεια [16].

Συμπερασματικά, το μοντέλο σημειακό μαθηματικό μοντέλο (point source model) παρέχει μία απλή εκτίμηση της έντασης της θερμικής ακτινοβολίας σε διαστάσεις όπου οι επιδράσεις της γεωμετρίας της φλόγας δεν είναι σημαντικές. Έτσι, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των κινδύνων της θερμικής ακτινοβολίας στο προσωπικό που εργάζεται, όπου μία γενική εκτίμηση του κινδύνου της ακτινοβολίας θεωρείται αποδεκτή. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στη χρήση του μοντέλου για τον καθορισμό των ορίων χωροθέτησης, όπως η απόσταση δύο δεξαμενών αποθήκευσης [16].

3.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Ο προσδιορισμός της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από πυρκαγιές υγρών καυσίμων είναι πιο εύκολος συγκριτικά με τον προσδιορισμό της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από πυρκαγιές στερεών ή αερίων καυσίμων. Ο κύριος λόγος αυτού του περιορισμού είναι η απουσία συγκεκριμένης γεωμετρίας της πηγής τόσο στην περίπτωση των στερεών όσο και στην περίπτωση των αερίων καυσίμων. Επιπλέον, η εκπομπή της ακτινοβολίας από πυρκαγιές υγρών καυσίμων είναι ανεξάρτητη από τον τύπο του καυσίμου, ενώ η περίπτωση των αερίων καυσίμων είναι πιο σύνθετη καθώς τα περισσότερα αέρια δεν έχουν προβλέψιμη συμπεριφορά. Ωστόσο, παρόλους τους περιορισμούς έχουν αναπτυχθεί σχέσεις και έχουν διεξαχθεί περιορισμένης κλίμακας πειράματα με στόχο τον προσδιορισμό της ενέργειας που ακτινοβολείται από πυρκαγιές στερεών και αερίων καυσίμων. Τα μοντέλα για τον προσδιορισμό της ακτινοβολίας από πυρκαγιές που έχουν αναφερθεί στην βιβλιογραφία είναι το μαθηματικό μοντέλο φλόγας στερεού καυσίμου (solid flame model) και το σημειακό μαθηματικό μοντέλο (point source model). Και τα δύο μοντέλα δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα για την περίπτωση των υγρών καυσίμων, ωστόσο στην περίπτωση των



αερίων καυσίμων χρησιμοποιείται το μαθηματικό μοντέλο φλόγας στερεού (point source model). Ο προσδιορισμός της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από πυρκαγιές στερεών καυσίμων βασίζεται στις σχέσεις που ισχύουν για τα υγρά καύσιμα με κάποιες τροποποιήσεις που προέκυψαν από πειραματικές μετρήσεις.

Συγκρίνοντας τα μοντέλα για τον προσδιορισμό της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από πυρκαγιές καυσίμων είναι δυνατόν να προκύψουν συμπεράσματα για το ποιο μοντέλο είναι πιο αξιόπιστο και πιο απλό στην εφαρμογή του. Αρχικά το μαθηματικό μοντέλο φλόγας στερεού καυσίμου (solid flame model) θεωρεί ότι η φλόγα παρουσιάζει τυρβώδη μορφή και έχει το εξιδανικευμένο σχήμα ενός στερεού κυλίνδρου. Στην πιο γενικευμένη μορφή του μοντέλου αυτού, μπορεί να θεωρηθεί πως η φλόγα έχει ένα ακανόνιστο σχήμα περιμέτρου P . Οι κύριες δυσκολίες του μαθηματικού μοντέλου φλόγας στερεού καυσίμου αφορούν την εκτίμηση της διαμέτρου και ύψους του κυλίνδρου, αλλά και του συντελεστή ορατότητας και της εκπεμπόμενης ισχύος, που ιδιαίτερα στην περίπτωση των μεγάλων πυρκαγιών εμφανίζει σημαντική αβεβαιότητα. Σύμφωνα με το μαθηματικό μοντέλο φλόγας στερεού καυσίμου το μεγαλύτερο μέρος της θερμικής ακτινοβολίας εκπέμπεται από την βάση της πυρκαγιάς, ενώ το σύνολο της επιφάνειας του κυλίνδρου αποτελείται από ορατές φλόγες σε ποσοστό 20%, που βρίσκονται κυρίως στην βάση της φλόγας, και από καπνό σε ποσοστό 80%. Για την εκτίμηση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας E_f το μαθηματικό μοντέλο φλόγας στερεού καυσίμου εκτιμά μία μέση τιμή της ποσότητας αυτής από όλο το ύψος της φλόγας. Αυτή η εκτίμηση θεωρείται ακριβής για την ακτινοβολία που εκπέμπεται σε μεγάλες αποστάσεις, ενώ είναι υποεκτιμημένη για την ακτινοβολία που εκπέμπεται σε μικρές αποστάσεις. Όσον αφορά την μεταβολή της ροής ενέργειας ανά μονάδα μήκους και την τιμή του λόγου $E_f \cdot H$ συναρτήσει της διαμέτρου της φλόγας, δεν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα για πυρκαγιές με διάμετρο μεγαλύτερη από 20 m. Ωστόσο, μπορεί να θεωρηθεί πως οι τιμές της ροής ενέργειας ανά μονάδα μήκους και της τιμής του λόγου $E_f \cdot H$ συναρτήσει της διαμέτρου της φλόγας παραμένουν σταθερές για μεγάλες τιμές των διαμέτρων της πυρκαγιάς. Τέλος, όσον αφορά στον προσδιορισμό του συντελεστή ορατότητας F , υπάρχουν περιορισμένες σχέσεις που μπορούν να προβλέψουν τις τιμές του. Τα δεδομένα δείχνουν πως ο συντελεστής ορατότητας για θέσεις κοντά



στην πυρκαγιά δεν επηρεάζεται από το ύψος της φλόγας, ενώ για θέσεις σε μεγαλύτερες αποστάσεις επηρεάζεται σημαντικά. Όσον αφορά την γεωμετρία του κυλίνδρου, δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα σε μεγάλες αποστάσεις από την πυρκαγιά, ενώ σε μικρές αποστάσεις ένας πλάγια τοποθετημένος κύλινδρος εμφανίζει υψηλότερες τιμές του συντελεστή από έναν κατακόρυφα τοποθετημένο κύλινδρο.

Το σημειακό μαθηματικό μοντέλο (point source model), μπορεί να θεωρηθεί πως είναι ένα πιο γενικό μοντέλο, αφού χρησιμοποιείται στην περίπτωση πρόβλεψης της ακτινοβολίας από πυρκαγιές αερίων καυσίμων προκειμένου να αποφευχθεί η χρήση διαφορετικής μεθοδολογίας για καθένα από τα διαφορετικά σενάρια που μπορούν να προκύψουν. Στο μοντέλο αυτό όλη η ενέργεια της ακτινοβολίας θεωρείται πως εκπέμπεται από ένα σημείο και όχι από όλη την έκταση ενός εξιδανικευμένου κυλίνδρου, έτσι το μόνο που απαιτείται είναι η εκτίμηση της συνολικής ταχύτητας απελευθέρωσης θερμότητας από την πυρκαγιά και του κλάσματος ενέργειας που εκπέμπεται ως ποσοστό της θερμικής ακτινοβολίας. Επομένως, το σημειακό μαθηματικό μοντέλο θεωρείται πως είναι ένα μοντέλο που παρουσιάζει βέβαια σημαντική αβεβαιότητα. Η δυσκολία του μοντέλου εμφανίζεται κυρίως στην περιγραφή της μεταβολής της έντασης της θερμικής ακτινοβολίας σε συνάρτηση με την απόσταση από την πηγή. Άρα, το μοντέλο αυτό οδηγεί σε υπερεκτιμημένες τιμές της ακτινοβολίας για μικρές αποστάσεις από την πηγή, ενώ εμφανίζει λιγότερη ακρίβεια την πρόβλεψη σε μεγαλύτερες αποστάσεις από την πηγή.

Συμπερασματικά, δεν μπορούμε να θεωρήσουμε πως κάποιο από τα δύο μοντέλα είναι καλύτερο από το άλλο. Σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε, το σημειακό μαθηματικό μοντέλο (point source model) είναι πιο γενικό και απλό μοντέλο, μίας και η ανάλυσή του περιλαμβάνει περισσότερες απλοποιήσεις και λιγότερες εκτιμήσεις, αλλά εμφανίζει αυξημένη αβεβαιότητα για εκτιμήσεις σε μεγάλες αποστάσεις από την πηγή. Έτσι, θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε πως το σημειακό μαθηματικό μοντέλο (point source model) είναι πιο κατάλληλο για εκτιμήσεις της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από πυρκαγιές σε μικρές αποστάσεις,



π.χ. εκτίμηση της εκπομπής ακτινοβολίας στο ανθρώπινο δυναμικό που εργάζεται σε ορισμένη απόσταση κοντά σε μία πιθανή πυρκαγιά, ενώ το μαθηματικό μοντέλο φλόγας στερεού καυσίμου (solid flame model) είναι πιο κατάλληλο για εκτιμήσεις της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από πυρκαγιές σε μεγάλες αποστάσεις, π.χ. καθορισμός της ελάχιστης απαιτούμενης απόστασης μεταξύ δύο δεξαμενών υγρών καυσίμων.

3.6 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ

Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από μία πυρκαγιά προς τα περιβάλλοντα αντικείμενα είναι δυνατόν να εξασθενίσει μερικώς από την απορρόφηση και τη σκέδασή της κατά μήκος της διαδρομής. Τα κύρια συστατικά της ατμόσφαιρας που απορροφούν θερμική ακτινοβολία είναι οι υδρατμοί (H_2O) και το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Ο Πίνακας 3.4 υποδεικνύει την σύσταση διαφόρων αερίων της ατμόσφαιρας. Η ποσότητα του CO_2 στην ατμόσφαιρα είναι γενικά σταθερή και ίση με 330 ppm ανά όγκο. Η περιεκτικότητα σε υδρατμούς ποικίλει έντονα με την θερμοκρασία και την υγρασία.

Η απορρόφηση της ακτινοβολίας, που εκπέμπεται από μία πηγή, από τους υδρατμούς του νερού και από το διοξείδιο του άνθρακα, αλλά και από ένα μέλαν σώμα που βρίσκεται σε συγκεκριμένη απόσταση από την πηγή μπορεί να υπολογιστεί με την χρήση των διαγραμμάτων ακτινοβολίας που δημοσιεύτηκαν από τους Hottel και Sarofim [43]. Η διαδικασία για τον υπολογισμό της απορρόφησης στη ζώνη των υδρατμών έχει ως εξής:

1. Αρχικά απαιτείται ο καθορισμός της μερικής πίεσης των υδρατμών του νερού σε ατμόσφαιρες που δίνεται από τον τύπο:

$$p'_w = \frac{RH}{100} * \exp \left[14.4114 - \frac{5328}{Ta} \right] \quad (3.25)$$

όπου RH είναι η σχετική υγρασία.



2. Στην συνέχεια ακολουθεί ο καθορισμός του μήκους της διαδρομής L , (σε μέτρα), από την επιφάνεια της φλόγας προς τον παρατηρητή. Ο καθορισμός της μερικής πίεσης συναρτήσει του μήκους της διαδρομής δίνεται από τον τύπο:

$$p_w * L = p'_w * L * (T_s / T_\alpha) \quad (3.26)$$

όπου T_s : η θερμοκρασία της επιφάνειας της πηγής (K) και

T_α : η περιβάλλουσα θερμοκρασία (K).

3. Η θερμοκρασία της πηγής και το γινόμενο $p_w * L$ καθορίζουν την εκπομπή των υδρατμών του νερού, ε_w , με την χρήση διαγραμμάτων εκπομπής.
4. Ο υπολογισμός της σταθεράς απορρόφησης των υδρατμών δίνεται από τον τύπο:

$$\alpha_w = \varepsilon_w * (T_\alpha / T_s)^{0.45} \quad (3.27)$$

Η διαδικασία για τον υπολογισμό της απορρόφησης από το διοξείδιο του άνθρακα είναι αρκετά παρόμοια. Η μερική πίεση του CO_2 παραμένει σταθερή και ίση με 3×10^{-4} atm. Η σταθερά απορρόφησης δίνεται από τον τύπο:

$$\alpha_c = \varepsilon_c * (T_\alpha / T_s)^{0.45} \quad (3.28)$$

Υπάρχει ακόμα ένας παράγοντας διόρθωσης λόγω της φασματικής επικάλυψης για τον υπολογισμό της εκπομπής ενός μίγματος CO_2 και H_2O . Το φαινόμενο αυτό, ωστόσο, αντιπροσωπεύει μία αλλαγή στην εκπομπή που είναι ίση με 5% στους 1,200 K και ακόμα μικρότερη για υψηλότερες θερμοκρασίες.

Τέλος, η μεταδοτικότητα δίνεται από τον τύπο:

$$\tau = 1 - \alpha_w - \alpha_c \quad (3.29)$$

και χρησιμοποιείται στην Εξίσωση (3.1) για να υπολογιστούν οι κίνδυνοι από την εκπομπή της θερμικής ακτινοβολίας [16].

Πίνακας 3.4 Οι συγκεντρώσεις των αερίων της ατμόσφαιρας [16].

Αέρια της ατμόσφαιρας	Συγκέντρωσή τους στην ατμόσφαιρα (% κατά όγκο)
Άζωτο	78.088
Οξυγόνο	20.949
Αργό	0.93
Διοξείδιο του άνθρακα	0.033
Νέον	1.8×10^{-3}
Ήλιο	5.24×10^{-4}
Μεθάνιο	1.4×10^{-4}
Κρυπτόν	1.14×10^{-4}
Μονοξείδιο του Αζώτου	5.0×10^{-5}
Μονοξείδιο του Άνθρακα	2.0×10^{-5}
Ξένον	8.6×10^{-6}
Υδρογόνο	5.0×10^{-6}
Όζον	Ποικίλει
Ατμοί νερού	Ποικίλει (εξαρτάται από την θερμοκρασία και την σχετική υγρασία)

3.7 ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Η ακτινοβολία της θερμότητας από μία πυρκαγιά ενδεχομένως να προκαλέσει εγκαύματα στο δέρμα εάν η ένταση της ακτινοβολίας είναι μεγάλη και η έκθεσή της σε αυτή γίνει με μεγάλη διάρκεια. Τα εγκαύματα του δέρματος μπορούν να έχουν διάφορες μορφές, ξεκινώντας από τα μικρά εγκαύματα τα οποία μόλις προκαλούν μία μικρή ζημιά στο δέρμα, μέχρι και εκτεταμένα εγκαύματα τα οποία προκαλούν ολική καταστροφή σε όλα τα στρώματα του δέρματος ακόμα και στους υποκείμενους ιστούς. Έχουν γίνει διάφορες κατηγοριοποιήσεις των εγκαυμάτων του δέρματος, καθεμία από τις οποίες εξαρτάται από τον βαθμό της ζημιάς που έχει υποστεί το δέρμα. Η πιο συνήθης κατηγοριοποίηση είναι αυτή που διαχωρίζει τα εγκαύματα του δέρματος σε τρεις βαθμούς. Βέβαια, ακόμα και σε αυτήν την κατηγοριοποίηση υπάρχουν πολλές υπόκατηγορίες. Ακολουθεί η ανάλυση των τριών αυτών βαθμών εγκαυμάτων:



1. Πρώτου βαθμού: το έγκαυμα στο εξωτερικό επίπεδο του δέρματος που χαρακτηρίζεται από ερύθημα, αλλά όχι από τον σχηματισμό φυσαλίδων. Τα ηπιότερα από τα εγκαύματα πρώτου βαθμού δεν είναι ιδιαίτερα επώδυνα και συνήθως δεν χρειάζονται ιατρική περίθαλψη. Ενδεχομένως, να μην εμφανίζουν και συμπτώματα, πέρα από την τοπική αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του δέρματος. Τα πιο σοβαρά εγκαύματα πρώτου βαθμού μπορεί να εμφανίζουν πόνο, αλλά όχι μόνιμη βλάβη.

2. Δευτέρου βαθμού: ένα ενδιάμεσο επίπεδο εγκαύματος στο δέρμα, το οποίο χαρακτηρίζεται από τον σχηματισμό φυσαλίδων. Οι φυσαλίδες μπορεί να έχουν μειωμένο βάθος και να εμφανίζουν είτε την δημιουργία ζημιάς μόνο στα επιφανειακά στρώματα του δέρματος, άρα την εμφάνιση ήπιου εγκαύματος δευτέρου βαθμού, είτε την καταστροφή της επιφάνειας σε όλο σχεδόν το βάθος της, άρα την εμφάνιση ενός σοβαρού εγκαύματος δευτέρου βαθμού.

3. Τρίτου βαθμού: βαθιά εγκαύματα που χαρακτηρίζονται από την καταστροφή όλων των στρωμάτων της επιφάνειας. Ο υποκείμενος ιστός ενδεχομένως να καταστραφεί [16].

Τα ιατρικά προβλήματα των εγκαυμάτων που καλύπτουν μεγάλες επιφάνειες του σώματος συμπεριλαμβάνουν σημαντικές απώλειες υγρών και μολύνσεις μετά από την απώλεια σημαντικών στρωμάτων του δέρματος. Η επιβίωση των ενηλίκων και των εφήβων αναμένεται να είναι μικρότερη από 20% εάν η επιφάνεια του σώματος εμφανίσει εγκαύματα δευτέρου ή τρίτου βαθμού (επί τοις εκατό περιοχές του σώματος: 7% το κεφάλι, 14% οι βραχίονες και 5% τα χέρια). Το ποσοστό της επιβίωσης είναι πιθανόν να μειωθεί κι άλλο, ακόμα και εάν ακολουθηθεί εντατική ιατρική περίθαλψη, σε περίπτωση που ένας άνθρωπος εμφανίσει εγκαύματα πλήρους πάχους σε ποσοστό μεγαλύτερο από το 50% της επιφάνειάς του σώματός του.

Ο πόνος και η καταστροφή του ιστού εξαρτώνται από την θέρμανση του δέρματος. Το δέρμα αποτελείται από δύο βασικά στρώματα: την επιδερμίδα η οποία είναι το λεπτό εξωτερικό στρώμα (0.05-0.1 mm) και το χόριο το οποίο είναι το



εσωτερικό παχύ στρώμα (1-2 mm). Δεδομένου ότι το δέρμα είναι ένα πολύπλοκο σύστημα, δεν υπάρχει διαθέσιμο ιδανικό μαθηματικό μοντέλο για την περιγραφή της συμπεριφοράς του υπό συνθήκες θέρμανσης. Ωστόσο, απλοποιημένα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του υπό θέρμανση. Η απλούστερη ανάλυση ξεκινάει με την παραδοχή ότι η επιφάνεια και ο υποκείμενος ιστός συμπεριφέρονται σαν ένα αδιάστατο μέσο με συνεχείς θερμικές ιδιότητες. Η μεταφορά θερμότητας γίνεται μόνο μέσω αγωγής, και το θερμοκρασιακό πεδίο σε οποιοδήποτε σημείο του μέσου δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha^2 * \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3.30)$$

Οι όροι της παραπάνω εξίσωσης είναι οι εξής:

T: η θερμοκρασία στον χρόνο t και σε απόσταση x κάτω από την επιφάνεια του δέρματος

$\alpha^2 = k/\rho c$: η θερμική διάχυση (m^2/s)

k: η θερμικής αγωγιμότητα (W/mK)

ρ : η πυκνότητα (kg/m^3) και

c: η ειδική θερμότητα (J/kgK).

Η λύση της Εξίσωσης (3.30) εξαρτάται από τις αρχικές και τις οριακές συνθήκες. Εάν υποθέσουμε ότι το δέρμα και ο υποκείμενος ιστός βρίσκονται στην ίδια αρχική θερμοκρασία T_0 και ότι σε χρόνο μηδέν η συνεχής ροή θερμότητας είναι q'' , οι αρχικές και οι οριακές συνθήκες είναι οι ακόλουθες:

$$t \leq 0, x \geq 0: T = T_0$$

$$t > 0, x = 0: \frac{\partial T}{\partial t} = -q''/k \quad (3.31)$$

Η Εξίσωση (3.31) που υποδεικνύει την ροή θερμότητας q'' παράγει μία βαθμίδα θερμοκρασίας στην επιδερμίδα, η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη με την



τιμή της θερμικής αγωγιμότητας. Η λύση της Εξίσωσης (3.30) με βάση τις αρχικές και τις οριακές συνθήκες που υποδεικνύονται από την Εξίσωση (3.31) προκύπτει ως εξής:

$$T = \frac{q'''}{k} \left\{ \frac{2 \cdot \alpha \cdot \sqrt{t}}{\sqrt{\pi}} * \exp\left(-\frac{x^2}{4 \cdot \alpha^2 \cdot t}\right) - x * \operatorname{erfc}\left[\frac{x}{2 \cdot \alpha \cdot \sqrt{t}}\right] \right\} + T_o \quad (3.32)$$

Το erfc είναι η συνάρτηση σφάλματος. Η αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του δέρματος ($x=0$) δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

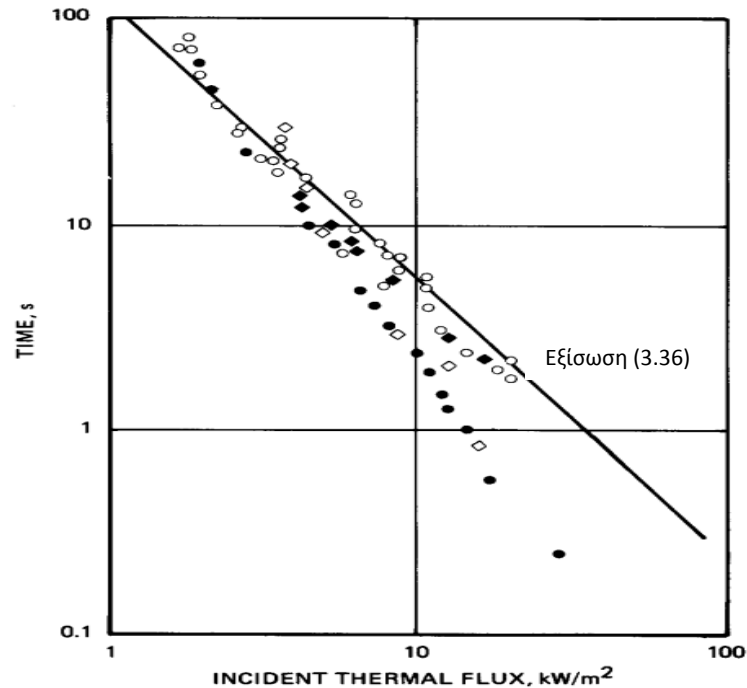
$$T_s - T_o = \frac{2q''' \sqrt{t}}{\sqrt{\pi k \rho c}} \quad (3.33)$$

Τα πειραματικά δεδομένα [16] από εθελοντές που εξέθεσαν τους βραχίονές τους σε ποικίλες τιμές της θερμικής ακτινοβολίας υπέδειξαν τα όρια του πόνου που ένιωθαν αυτά τα άτομα όταν η μέση θερμοκρασία σε βάθος 0.1 mm στο δέρμα αυξανόταν στους 45°. Τα δεδομένα υποδεικνύουν ότι ο χρόνος που απαιτείται για την εμφάνιση του πόνου μπορεί να συσχετιστεί με την ένταση της ακτινοβολίας με βάση την ακόλουθη εξίσωση:

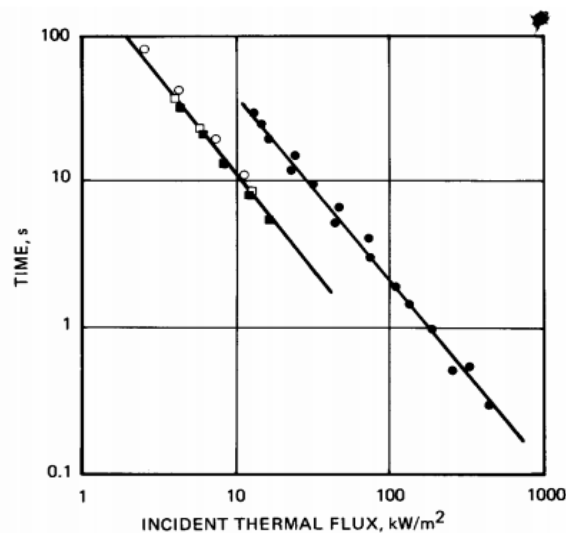
$$t_p = [35/q''']^{1.33} \quad (3.34)$$

όπου t_p : ο απαιτούμενος χρόνος για την εμφάνιση του πόνου (s) και

q''' : η προσπίπτουσα θερμική ακτινοβολία (kW/m^2) [16].



Διάγραμμα 3.10 Χρόνος που απαιτείται για την εμφάνιση πόνου που οφείλεται στην έκθεση στη θερμική ακτινοβολία. Πηγές δεδομένων: ○ Buettner [44], ● Hardy et al [45], ◆ Stoll and Greene [46], ◇ Bigelow et al [47].



Διάγραμμα 3.11 Χρόνος που απαιτείται για την εμφάνιση εγκαυμάτων από την θερμική ακτινοβολία. Πηγές δεδομένων: ■ Stoll και Greene: οριακή εμφάνιση φυσαλίδων [46], □ Stoll και Greene: πλήρης εμφάνιση φυσαλίδων [46], ○ Mehta et al: εγκαύματα δευτέρου βαθμού [48], ● Mixer: εκτεταμένα εγκαύματα δευτέρου βαθμού [49].



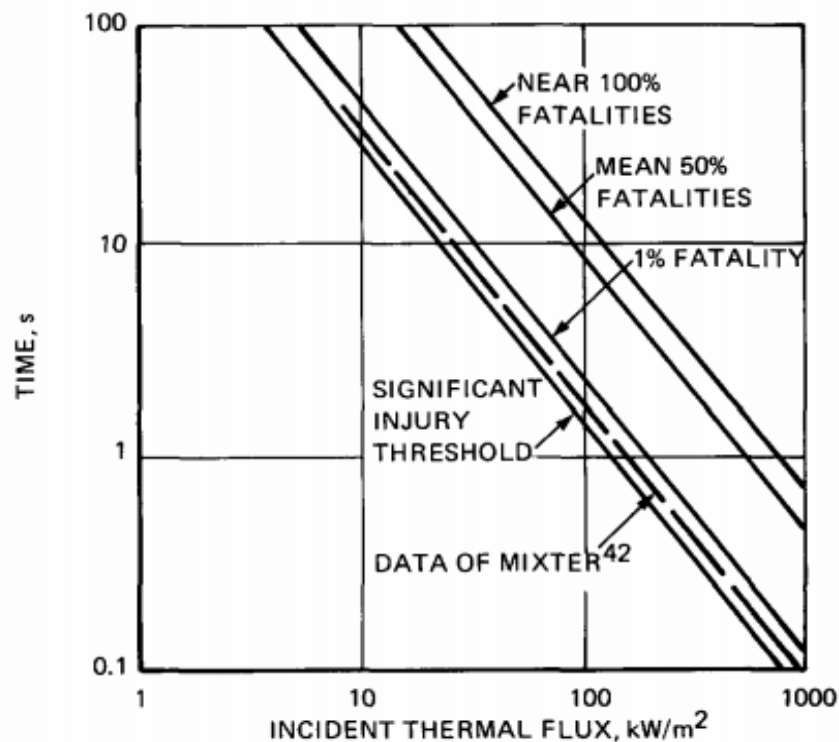
Το Διάγραμμα 3.10 δείχνει τον απαιτούμενο χρόνο για την πρόκληση πόνου ως συνάρτηση της προσπίπτουσας ροής θερμότητας. Όλα τα δεδομένα εμφανίζουν συμφωνία στον χρόνο που απαιτείται για μικρές ροές. Δεν εμφανίστηκε πόνος, ανεξάρτητα από την διάρκεια της έκθεσης για θερμικές ροές, μικρότερες από 1.7 kW/m^2 (η σταθερά του ήλιου είναι περίπου ίση με 1 kW/m^2 μία καλοκαιρινή μέρα).

Όταν η θερμοκρασία της επιφάνειας του δέρματος φτάσει τους 55° C , εμφανίζονται φυσαλίδες στο δέρμα. Οι Mehta et al [48] καθόρισαν πως η σοβαρότητα τους εγκαύματος εξαρτάται από την ενέργεια που έχει απορροφηθεί αφότου η θερμοκρασία έχει φτάσει τους 55° C . Εάν η ποσότητα της απορροφούμενης ενέργειας είναι 41.8 kJ/m^2 , μπορεί να εμφανιστεί πόνος ή ένα ήπιο έγκαυμα δευτέρου βαθμού. Για εκπομπή ίση ή μεγαλύτερη από 83.6 kJ/m^2 , μπορεί να εμφανιστεί μία φυσαλίδα ή ένα σοβαρό έγκαυμα δευτέρου βαθμού. Τέλος, μία εκπομπή ίση με 162.2 kJ/m^2 θα έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση ενός εγκαύματος τρίτου βαθμού και την προσωρινή ζημιά στον ιστό του δέρματος. Στο Διάγραμμα 3.11 εμφανίζεται ο χρόνος που απαιτείται για τον σχηματισμό φυσαλίδων στο δέρμα του ανθρώπου σε συνάρτηση με την προσκείμενη ροή θερμότητας. Οι διαφορές στα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί από την βιβλιογραφία αφορούν κυρίως την πηγή της θερμικής ακτινοβολίας.

Τα δεδομένα που δίνονται στα Διαγράμματα 3.10 και 3.11 είναι χρήσιμα για την εκτίμηση του χρόνου για την εμφάνιση του πόνου και του πόσο γρήγορα μπορούν να εμφανιστούν τα εγκαύματα στο ανθρώπινο δέρμα σε διάφορα επίπεδα έκθεσης σε ακτινοβολία. Αυτά τα δεδομένα, ωστόσο, δεν μπορούν να προσδιορίσουν τα επίπεδα ροής της θερμικής ακτινοβολίας στα οποία μπορούν να προκληθούν θάνατοι.

Η μόνη πηγή δεδομένων για μεγάλης κλίμακας θανάτους από θερμική ακτινοβολία αφορούν αναλύσεις από την πυρηνική ενέργεια. Δεδομένου ότι οι χρόνοι έκθεσης είναι συνήθως πολύ σύντομοι, η ερμηνεία αυτών των δεδομένων είναι υποκειμενική [16].

Το Διάγραμμα 3.12 αναλύει την συσχέτιση ανάμεσα στην ένταση της θερμικής ακτινοβολίας και στην εμφάνιση εγκαυμάτων από πυρηνικές εκρήξεις με διαφορετικές αποδόσεις. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης εμφανίζουν τα όρια εμφάνισης ζημιάς. Για διάφορες τιμές της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας τα ποσοστά της θνησιμότητας φαίνονται να είναι 1%, 50% ή ακόμα και 100%.



Διάγραμμα 3.12 Επίπεδα θνησιμότητας από την θερμική ακτινοβολία [16].

Η Ομοσπονδία των Προτύπων Ασφαλείας για Εγκαταστάσεις Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής όρισε το ανώτατο αποδεκτό όριο των 5 kW/m^2 για άμεση έκθεση των ανθρώπων σε θερμική ακτινοβολία. Σε αυτή την ροή, ο χρόνος έκθεσης του γυμνού δέρματος είναι ίσος με 13 s πριν την εμφάνιση πόνου, και ίσος με 40 s μέχρι την εμφάνιση εγκαύματος δευτέρου βαθμού. Αυτά είναι τα όρια εμφάνισης του τραυματισμού. Τα όρια για την εμφάνιση του θανάτου είναι δύσκολο να προσδιοριστούν. Αν υποθέσουμε πως η διάρκεια έκθεσης είναι ίδια, δηλαδή περίπου 40 s, από το Διάγραμμα 3.12 μπορεί να καθοριστεί το κατώτατο όριο



των 100 kW/m^2 για την εμφάνιση θνησιμότητας. Αυτό το όριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό της ζώνης κινδύνου για την εμφάνιση θνησιμότητας [16].

3.8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- ❖ Η ενέργεια της ακτινοβολίας από τις πυρκαγιές στερών, υγρών και αερίων καυσίμων είναι δυνατόν να είναι αρκετά υψηλή ώστε να απειλήσει την δομική ακεραιότητα των γειτονικών κτιρίων, την σωματική ακεραιότητα των πυροσβεστών, των φυτών, του προσωπικού αλλά και όλων των δυνητικά ευρισκόμενων ατόμων στα όρια μία εγκατάστασης. Για το λόγο αυτό κρίνεται αναγκαία η μοντελοποίηση της ενέργειας της ακτινοβολίας που παράγεται από αυτές τις πυρκαγιές. Ωστόσο, παρόλη την σημαντική μελέτη που έχει γίνει στον τομέα αυτό, τα περισσότερα αποτελέσματα αφορούν τις πυρκαγιές σε δεξαμενές υγρών καυσίμων.
- ❖ Η ανάλυση των πυρκαγιών εύφλεκτων καυσίμων είναι ανεξάρτητη από τον τύπο του καυσίμου. Η πιο γνωστή μέθοδος εκτίμησης της ροής ακτινοβολίας από πυρκαγιές σε δεξαμενές υγρών καυσίμων είναι το μαθηματικό μοντέλο της φλόγας στερεού καυσίμου. Σε αυτήν την περίπτωση, η φλόγα θεωρείται πως είναι ένας στερεός κατακόρυφος κύλινδρος που εκπέμπει θερμική ακτινοβολία από τις πλευρές του. Αυτό το μοντέλο είναι σχετικά απλό, αλλά απαιτεί εκτιμήσεις της διαμέτρου και του ύψους του κυλίνδρου και μία επιπλέον εκτίμηση της εκπεμπόμενης ισχύος. Για πυρκαγιές με σχετικά μικρές διαμέτρους χρησιμοποιούνται οι Εξισώσεις (3.2) και (3.3) για την εκτίμηση της εκπεμπόμενης ισχύος. Ωστόσο, για πυρκαγιές με μεγαλύτερες διαμέτρους έχουν πραγματοποιηθεί διάφορα πειράματα, ενώ θεωρείται πως η πυρκαγιά έχει ένα αυθαίρετο σχήμα περιμέτρου P και όχι σχήμα κυλίνδρου.
- ❖ Σε πυρκαγιές με διάμετρο μεγαλύτερη από 30 m έχει αναφερθεί πως η μέση εκπεμπόμενη ισχύς είναι μικρότερη από 31.5 kW/m^2 . Η τιμή αυτή προκύπτει τόσο από την μέθοδο των Shokri και Beyler [116] όσο και από την μέθοδο των Mudan



και Croce [33], με αποτέλεσμα να μπορεί να θεωρηθεί πως τα κτίρια μπορούν να χτιστούν ακριβώς δίπλα σε θέσεις που δυνητικά μπορούν να υπάρξουν μεγάλες πυρκαγιές λόγω του ότι η προβλεπόμενη ροή δεν υπερβαίνει τα 31.5 kW/m^2 ανεξάρτητα της απόστασής της από την πυρκαγιά. Για το λόγο αυτό, αναπτύχθηκε μία μεθοδολογία που μπορεί να είναι εφαρμόσιμη σε ολόκληρη την κλίμακα της πυρκαγιάς και σε αποστάσεις διαχωρισμού. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των μεθοδολογιών των Shokri και Beyler [116], των Mudan και Croce [33] χρησιμοποίησαν και αυτής που αναπτύχθηκε εμφάνιζαν ικανοποιητική συμφωνία για διαμέτρους δεξαμενών μικρότερες από 50 m.

- ❖ Τέλος, ο συντελεστής ορατότητας ανάμεσα σε μία πυρκαγιά και ένα στοιχείο εκτός της πυρκαγιάς, που είναι απαραίτητος για τον υπολογισμό της ροής της θερμικής ακτινοβολίας, εξαρτάται από το σχήμα της φλόγας, την σχετική απόσταση ανάμεσα στο στοιχείο και την πυρκαγιά και τον προσανατολισμό του στοιχείου.
- ❖ Όσον αφορά στις πυρκαγιές στερεών καυσίμων μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εμπειρική συσχέτιση της Εξίσωσης (3.22) για πυρκαγιές που περιλαμβάνουν κυρίως ξύλο και άλλα υλικά κυτταρίνης.
- ❖ Τα εύφλεκτα αέρια που αποθηκεύονται υπό πίεση δεν έχουν προβλέψιμη συμπεριφορά με αποτέλεσμα να είναι δύσκολη η μοντελοποίησή της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από πυρκαγιές αερίων καυσίμων. Η γενική μέθοδος που χρησιμοποιείται συνήθως σε αυτή την περίπτωση είναι το σημειακό μαθηματικό μοντέλο, το οποίο θεωρεί πως όλη η ενέργεια της ακτινοβολίας από την πυρκαγιά εκπέμπεται από ένα μόνο σημείο.
- ❖ Ο κύριος λόγος της δυσκολίας πρόβλεψης της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από πυρκαγιές στερεών και αερίων καυσίμων είναι η απουσία συγκεκριμένης γεωμετρίας της πηγής.
- ❖ Τα μοντέλα για τον προσδιορισμό της ακτινοβολίας από πυρκαγιές που έχουν αναφερθεί στην βιβλιογραφία είναι το μαθηματικό μοντέλο φλόγας στερεού καυσίμου και το σημειακό μαθηματικό μοντέλο. Και τα δύο μοντέλα δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα για την περίπτωση των υγρών καυσίμων, ωστόσο στην περίπτωση των αερίων καυσίμων χρησιμοποιείται το σημειακό μαθηματικό



μοντέλο. Ο προσδιορισμός της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από πυρκαγιές στερεών καυσίμων βασίζεται στις σχέσεις που ισχύουν για τα υγρά καύσιμα με κάποιες τροποποιήσεις που προέκυψαν από πειραματικές μετρήσεις.

- ❖ Το σημειακό μαθηματικό μοντέλο είναι πιο γενικό και κατάλληλο για εκτιμήσεις της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από πυρκαγιές σε μικρές αποστάσεις, ενώ το μαθηματικό μοντέλο φλόγας στερεού καυσίμου είναι πιο κατάλληλο για εκτιμήσεις της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από πυρκαγιές σε μεγάλες αποστάσεις. Επομένως, από την σύγκριση των δύο μοντέλων άγεται το συμπέρασμα πως δεν τίθεται το θέμα του καλύτερου μοντέλου, καθώς καθένα είναι κατάλληλο για την μελέτη υπό διαφορετικές συνθήκες.
- ❖ Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από μία πυρκαγιά προς τα περιβάλλοντα αντικείμενα είναι δυνατόν να εξασθενήσει από την απορρόφηση από τα συστατικά της ατμόσφαιρας, όπως είναι οι υδρατμοί και το διοξείδιο του άνθρακα, και από κάποιο μέλαν σώμα που είναι πιθανόν να βρίσκεται στο κοντινό περιβάλλον.
- ❖ Όταν ένας οργανισμός εκτεθεί στην θερμική ακτινοβολία είναι πιθανόν να πάθει εγκαύματα πρώτου, δευτέρου ή τρίτου βαθμού, ανάλογα με τον χρόνο έκθεσης και την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Τέλος, για διάφορες τιμές της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι πιθανόν να εμφανιστούν ορισμένα ποσοστά θνησιμότητας τα οποία εξαρτώνται άμεσα και από τον χρόνο έκθεσης.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

q'' : η ροή της θερμικής ακτινοβολίας από την πυρκαγιά σε ένα κοντινό αντικείμενο

F: ο συντελεστής ορατότητας ανάμεσα στον στόχο και την πυρκαγιά

τ : η ατμοσφαιρική μεταδοτικότητα

E_f : η εκπεμπόμενη ισχύς



e_f : η αποτελεσματική ακτινοβολία της φλόγας

k : ο συντελεστής απορρόφησης

D : το πλάτος της φλόγας

E_m : η μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύς της φλόγας

E_s : η εκπεμπόμενη ισχύς του καπνού

HRR: η συνολική ταχύτητα απελευθέρωσης θερμότητας μίας πυρκαγιάς

χ_r : το κλάσμα της ενέργειας που ακτινοβολείται στον περιβάλλοντα χώρο προς τη συνολική ταχύτητα απελευθέρωσης θερμότητας της πυρκαγιάς (HRR)

H : το ύψος του κυλίνδρου που αναπαριστά την πυρκαγιά

D : η διάμετρος του κυλίνδρου που αναπαριστά την πυρκαγιά

\dot{Q} : το συνολικό HRR του κυλίνδρου που αναπαριστά την πυρκαγιά

P : η περίμετρος της πυρκαγιάς

χ_{rmax} : η μέγιστη τιμή του κλάσματος της ενέργειας που ακτινοβολείται στον περιβάλλοντα χώρο προς τη συνολική ταχύτητα απελευθέρωσης θερμότητας της πυρκαγιάς (HRR)

q''_f : το ποσοστό απελευθέρωσης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας

A : η περιοχή της βάσης της πυρκαγιάς

H_{max} : το μέγιστο ύψος του κυλίνδρου που αναπαριστά την πυρκαγιά

θ_1 : η γωνία που σχηματίζεται από την καθέτο dA στην πυρκαγιά

θ_2 : η γωνία που σχηματίζεται από την καθέτο dA_2 στο στοιχείο λήψης

r : η απόσταση ανάμεσα στο στοιχείο της πυρκαγιάς και στο στοιχείο λήψης



F_H : ο οριζόντιος συντελεστής ορατότητας

F_V : ο κατακόρυφος συντελεστής ορατότητας

S : η απόσταση του παρατηρητή από τον άξονα/ακτίνα της φλόγας ή μία εμπειρική σταθερά (όπου γίνεται ανάλογη επισήμανση)

F_m : η μέγιστη τιμή του παράγοντα θέασης

β : η γωνία κλίσης από ένα οριζόντιο παρατηρητή

ϕ : $\sin^{-1} 1/S$

ν : ο προσανατολισμός του παρατηρητή που μεταβαλόταν από 0 μέχρι 180°

h : το ύψος ή η ακτίνα της φλόγας

D_f : η αποτελεσματική διάμετρος της φλόγας

a : μία εμπειρική σταθερά

b : μία εμπειρική σταθερά

\dot{m} : η ταχύτητα καύσης της μάζας σε μονάδες (kg/s)

\dot{m}'' : η ταχύτητα καύσης της μάζας σε μονάδες (kg/m²s)

ΔH_c : η θερμότητα καύσης

p'_w : η μερική πίεση των υδρατμών του νερού σε ατμόσφαιρες

p_w : η μερική πίεση των υδρατμών

RH : η σχετική υγρασία.

L : το μήκος της διαδρομής από την επιφάνεια της φλόγας προς τον παρατηρητή

T_s : η θερμοκρασία της επιφάνειας της πηγής

T_a : η περιβάλλουσα θερμοκρασία



α_w : η σταθερά απορρόφησης των υδρατμών

ϵ_w : η εκπομπή των υδρατμών του νερού

α_c : η σταθερά απορρόφησης του διοξειδίου του άνθρακα

ϵ_c : η εκπομπή του διοξειδίου του άνθρακα

T: η θερμοκρασία στον χρόνο t και σε απόσταση x κάτω από την επιφάνεια του δέρματος

$\alpha^2 = k/\rho c$: η θερμική διάχυση (m^2/s)

k : η θερμική αγωγιμότητα (W/mK)

ρ : η πυκνότητα (kg/m^3) και

c : η ειδική θερμότητα (J/kgK)

T_0 : η αρχική θερμοκρασία σε χρόνο μηδέν

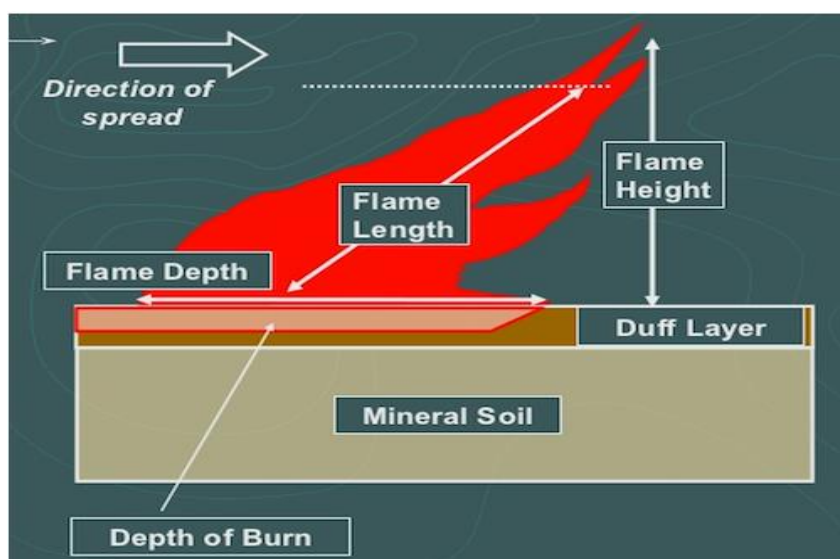
$erfc$: η συνάρτηση σφάλματος

t_p : ο απαιτούμενος χρόνος για την εμφάνιση του πόνου

4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ-ΤΟ ΜΗΚΟΣ ΚΑΙ ΤΟ ΥΨΟΣ ΤΗΣ ΦΛΟΓΑΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι όροι μήκος φλόγας (flame length) και ύψος φλόγας (flame height) διαφέρουν σημαντικά. Συγκεκριμένα, ο όρος ύψος της φλόγας (flame height) αφορά το κατακόρυφο μήκος από την βάση της φλόγας μέχρι την πρόσθια άκρη της φλόγας όταν η φλόγα αναπτύσσεται σε ένα επίπεδο με κλίση. Το ύψος της φλόγας (flame height) μπορεί να υπολογιστεί εάν είναι γνωστά η γωνία της φλόγας και το μήκος της φλόγας (flame length). Ο όρος μήκος της φλόγας (flame length) αναφέρεται στο μήκος ανάμεσα στην οπίσθια και την πρόσθια άκρη της φλόγας σύμφωνα με την κατεύθυνση της ροής της φλόγας. Ένας εναλλακτικός ορισμός του μήκους της φλόγας αναφέρεται στο μήκος από την κορυφή της φλόγας μέχρι το σημείο στη βάση της φλόγας που βρίσκεται ακριβώς στην μέση ανάμεσα στην πρόσθια και την οπίσθια άκρη της. Ωστόσο, ο συνήθης ορισμός που χρησιμοποιείται είναι ο πρώτος [50, 51]. Η ακριβής διαφορά ανάμεσα στους δύο παραπάνω ορισμούς φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

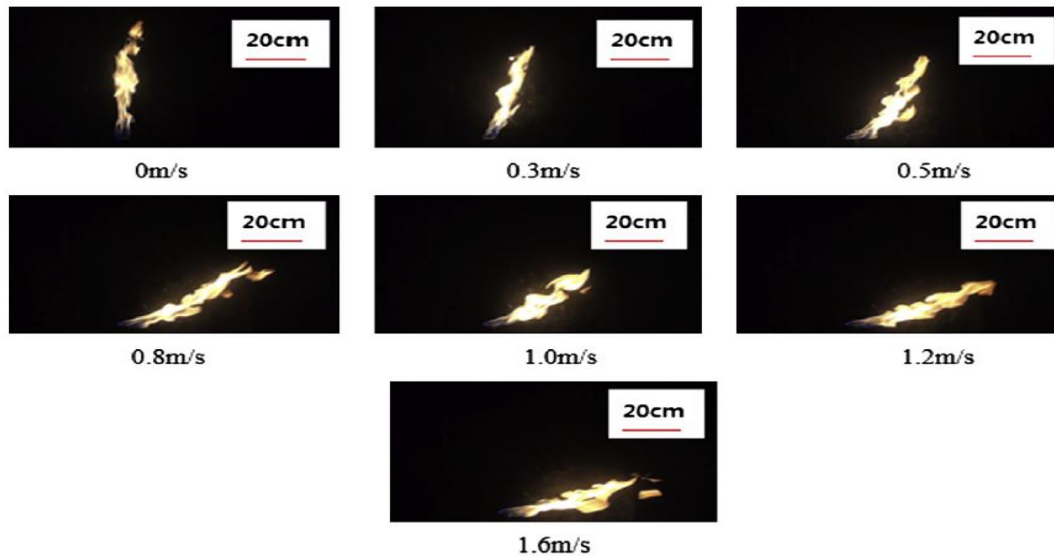


Εικόνα 4.1 Διαφορά του ύψους της φλόγας (flame height) από το μήκος της φλόγας (flame length) [52].



Το ύψος της φλόγας (flame height) και το μήκος της φλόγας (flame length) είναι πολύ σημαντικές παράμετροι για τον καθορισμό των ιδιοτήτων της φλόγας. Εάν γνωρίζουμε το ύψος της φλόγας (flame height) και την γωνία κλίσης της φλόγας (flame tilt angle) μπορούμε να υπολογίσουμε το μήκος της φλόγας (flame length) και αντίστροφα, άρα οι παράμετροι αυτοί συσχετίζονται. Σε ένα περιβάλλον με ήπιες συνθήκες όπου δεν εμφανίζεται άνεμος, το ύψος της φλόγας (flame height) ελέγχεται από την ταχύτητα ανάμειξης καυσίμου και οξυγόνου και εξαρτάται από κάποιες βασικές παραμέτρους, π.χ. τη ταχύτητα καύσης, τη γεωμετρία της επιφάνειας όπου βρίσκεται το καύσιμο, τη θερμότητα καύσης και τη στοιχειομετρική αναλογία. Με την μελέτη του ύψους της φλόγας ασχολήθηκε εκτενώς ο Thomas [53], αλλά και πολλοί άλλοι ερευνητές.

Έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές πειραματικές μελέτες και μοντελοποιήσεις προκειμένου να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά των φλογών διάχυσης (diffusion flames). Τα αποτελέσματα αυτών των μελετών που υπάρχουν στην βιβλιογραφία αποδεικνύουν πως δεν υπάρχουν επαρκή δεδομένα για τον συσχετισμό των ιδιοτήτων της καύσης και του ύψους της φλόγας. Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει η ανάλυση ορισμένων ερευνών που έχουν διεξαχθεί για τον προσδιορισμό του ύψους ή του μήκους της φλόγας. Η ανάλυση που θα ακολουθήσει θα εστιάσει σε δύο άξονες. Ο ένας αφορά τον προσδιορισμό του ύψους ή του μήκους της φλόγας απουσία πλευρικού ανέμου (cross wind) και ο άλλος αφορά τον προσδιορισμό του ύψους ή του μήκους της φλόγας παρουσία πλευρικού ανέμου (cross wind). Το κεφάλαιο αυτό συσχετίζεται άμεσα με το επόμενο κεφάλαιο στο οποίο θα γίνει ανάλυση της γωνίας κλίσης της φλόγας υπό την επίδραση πλευρικού ανέμου (cross wind) [54].



Εικόνα 4.2 Μεταβολή του σχήματος της φλόγας παρουσία πλευρικού ανέμου [55].

4.2 ΤΟ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΦΛΟΓΑΣ

Το μήκος της φλόγας επηρεάζεται σημαντικά από την παρουσία πλευρικού ανέμου. Επομένως, η ανάλυση που θα ακολουθήσει αφορά τις εξισώσεις υπολογισμού του μήκους της φλόγας τόσο παρουσία όσο και απουσία πλευρικού ανέμου.

4.2.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΠΛΕΥΡΙΚΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

Η εξίσωση του Thomas [53] για τον προσδιορισμό του λόγου L/D είναι η εξής:

$$\frac{L}{D} = 55 \left[\frac{\dot{m}''}{\rho_a \sqrt{gD}} \right]^{0.67} (u^*)^{-0.21} \quad (4.1)$$

και χρησιμοποιείται για φλόγες μεγαλύτερου μήκους.

Οι Atallah και Raj [56] μελέτησαν τις φλόγες μικρότερου μήκους και διεξήγαγαν τις παρακάτω εξισώσεις:



$$\frac{L}{D} = \left[\frac{\dot{m}''}{\rho_a \sqrt{gD}} \right]^{-0.19} (u^*)^{0.06}, u^* > 1 \quad (4.2)$$

$$\frac{L}{D} = \left[\frac{\dot{m}''}{\rho_a \sqrt{gD}} \right]^{-0.19}, u^* \leq 1 \quad (4.3)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις οι όροι:

$$u^* = \frac{u}{u_c} \quad (4.4)$$

$$u_c = \left[\frac{g \dot{m}'' D}{\rho_v} \right]^{1/3} \quad (4.5)$$

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων, όπως θα επισημανθεί και παρακάτω, εμφάνιζαν ικανοποιητική συμφωνία με την εξίσωση Thomas [53]. Οι εξισώσεις των Atallah και Raj [56] χρησιμοποιήθηκαν για φλόγες μικρότερου μήκους. Οι παραπάνω Εξισώσεις (4.1), (4.2) και (4.3) ορίστηκαν για φλόγες LNG, και όχι για φλόγες υγρών καυσίμων [3].

Οι Lois και Swithenbank [57] μελέτησαν το μήκος της φλόγας (flame length) και την γωνία κλίσης της (flame tilt angle) ως προς την μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με βάση φωτογραφίες που λήφθηκαν κατά την διεξαγωγή μίας πυρκαγιάς σε μία δεξαμενή. Για την διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας κατασκευάστηκε ένα τούνελ μέσα από το οποίο περνούσε ο άνεμος (wind tunnel). Η περιοχή στην οποία έγινε η πειραματική μελέτη είχε εμβαδόν ίσο με 2 x 3 m². Στην περιοχή αυτή τοποθετήθηκε μία κυκλική λεκάνη με διάμετρο ίση με 1 m που περιείχε το καύσιμο. Στο τούνελ της πειραματικής διαδικασίας τοποθετήθηκε ένα τμήμα από ειδικά διαμορφωμένο γυαλί που είχε αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες, προκειμένου να μπορεί να γίνει παρατήρηση της φλόγας σε όλη την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Ο άνεμος προσφερόταν στο τούνελ με την χρήση ενός ανεμιστήρα μεταβλητού βήματος. Η ταχύτητα του ανέμου στο τμήμα των πειραματικών παρατηρήσεων ρυθμιζόταν με την μεταβολή της γωνίας των λεπίδων του ανεμιστήρα. Η ανακυκλοφορία που εμφανιζόταν στην έξοδο του ανέμου από τον ανεμιστήρα αντιμετωπίστηκε με την χρήση διαφόρων διατάξεων, π.χ. ανεμιστήρες με δομή κηρήθρας (honeycomb structure). Τα καύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν για



την διεξαγωγή του πειράματος ήταν υγρό εξάνιο κι υγρή μεθανόλη [57]. Το μήκος της φλόγας (flame length) στην πυρκαγιά της δεξαμενής μεθανόλης έφτανε μόνο λίγα εκατοστά πάνω από το επίπεδο του καυσίμου.

Κατά την διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας των Lois και Swithenbank [57] λήφθηκε ένας μεγάλος αριθμός φωτογραφιών προκειμένου να παρατηρηθούν όλα τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα. Από τα δεδομένα των φωτογραφιών προέκυψε πως το κύριο τμήμα της φλόγας εμφάνισε μία μεταβολή του μήκους L_1 και χωριζόταν σε δύο τμήματα τα οποία είχαν κενό μεταξύ τους. Το μήκος του κάθε τμήματος ήταν L_2 , το οποίο προσέγγιζε την τιμή των 1.0 m. Τα δύο τμήματα είχαν το ίδιο μήκος τις περισσότερες φορές, ωστόσο κάποιες φορές το ένα τμήμα ήταν δυνατόν να είναι μεγαλύτερο από το άλλο. Ενίοτε δεν εμφανιζόταν ο διαχωρισμός της φλόγας και η μέτρηση του μήκους της φλόγας ήταν αρκετά ακριβής. Ωστόσο, αυτό αποτελούσε εξαίρεση για το φαινόμενο. Επομένως, ο ορισμός για το μήκος της φλόγας (flame length) που προέκυψε είναι ο ακόλουθος:

$$L=L_1+\frac{3}{4}L_2 \quad (4.6)$$

Ο ορισμός αυτός προέκυψε με βάση την υπόθεση πως κατά την μεγαλύτερη διάρκεια τα διαχωριζόμενα τμήματα της φλόγας ήταν ίσα με τα $\frac{3}{4}$ του L_2 , που ήταν το μήκος του μεγαλύτερου διαχωριζόμενου τμήματος.

Με βάση τον παραπάνω ορισμό, το αποτελεσματικό μήκος της φλόγας προέκυψε από τον τύπο:

$$L'=L_1+\frac{3}{4}L_2+L_3 \quad (4.7)$$

όπου,

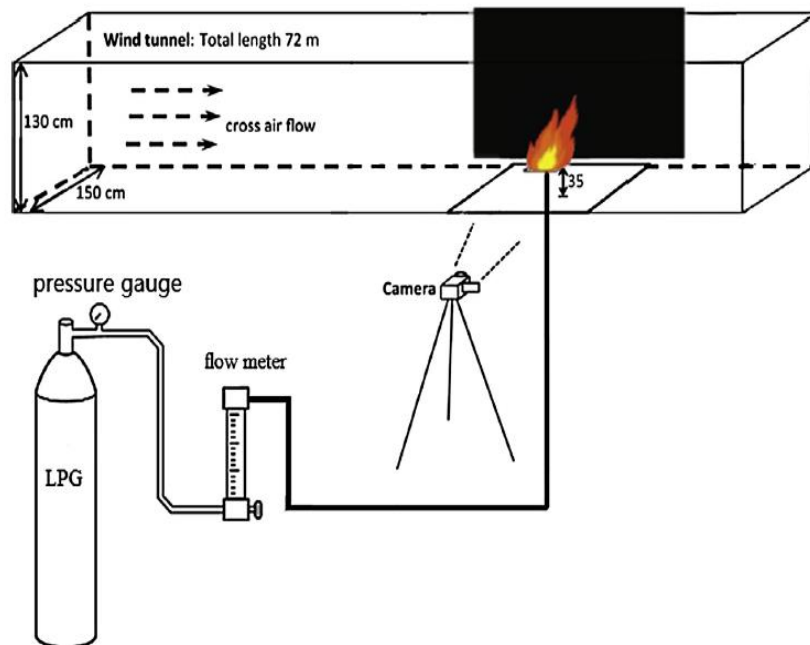
$$L_3=\frac{1}{8}L_2 \quad (4.8)$$

Η συνολική τιμή του L_3 δεν υπερβαίνει το 8% του συνολικού μήκους της φλόγας. Ο λόγος διαίρεσης της πυρκαγιάς σε τμήματα ενδεχομένως να οφείλεται στην παρουσία της δεξαμενής, της οποίας το ύψος μπορεί να ποικίλει σημαντικά. Αυτή

η υπόθεση προκύπτει από το γεγονός ότι κατά την μοντελοποίηση της πυρκαγιάς στο τμήμα που εμφανιζόταν η φλόγα, δεν παρατηρήθηκε η εμφάνιση διαχωριζόμενων τμημάτων της πυρκαγιάς. Το μήκος της φλόγας (flame length) σε κάθε ταχύτητα ανέμου θεωρήθηκε ίσο με την μέση τιμή που προέκυψε από τις φωτογραφίες που λήφθηκαν.

Όσον αφορά το μήκος της φλόγας (flame length) για μία δεξαμενή εξανίου με διάμετρο $D=1$ m σε συνθήκες άπνοιας βρέθηκε πως είναι ίσο με 3.04 m. Καθώς η ταχύτητα του πλευρικού ανέμου (cross wind velocity) αυξανόταν από 2.5 έως τα 7.8 m/s, δεν παρατηρήθηκε ιδιαίτερη μεταβολή του μήκους της φλόγας.

Τα πειραματικά αποτελέσματα των Lois και Swithenbank [57] εμφάνισαν ικανοποιητική συμφωνία με τα αντίστοιχα που προέκυψαν από την εξίσωση του Thomas (4.1) [53]. Τα αποτελέσματα της εξίσωσης των Atallah και Raj [56] δεν είχαν μεγάλη ακρίβεια.



Εικόνα 4.3 Η πειραματική διάταξη των F. Tang, L. Li, Q. Wang και Q. Shi [55].

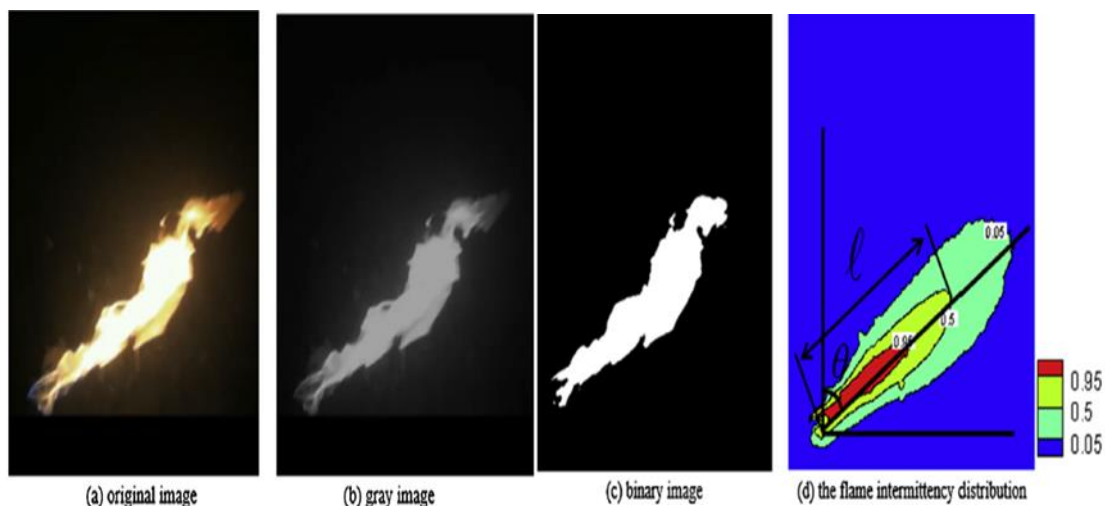
Μία επιπλέον πειραματική μελέτη με αντικείμενο το μήκος της φλόγας διεξήχθει από τους F. Tang, L. Li, Q. Wang και Q. Shi [55]. Οι μελετητές αυτοί χρησιμοποίησαν την πειραματική διάταξη της Εικόνας 4.3. Το σύστημα παροχής ανέμου της πειραματικής διάταξης προσέφερε άνεμο με σταθερή ταχύτητα στο εύρος των 0-3 m/s. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε ένα ανεμόμετρο για την καταγραφή της ταχύτητας των πλευρικών ανέμων (cross wind velocities). Ο τετράγωνος καυστήρας είχε σταθερές διαστάσεις και τοποθετήθηκε στο κέντρο της κεντρικής γραμμής του τούνελ, αλλά και κοντά στο πλευρικό τοίχιο της πειραματικής διάταξης. Το καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το LPG. Η ταχύτητα παροχής καυσίμου ελεγχόταν από τον μετρητή ροής του αερίου. Για την διεξαγωγή των πειραμάτων διαμορφώθηκαν διαφορετικές πειραματικές συνθήκες προκειμένου να μελετηθεί το μήκος μία φλόγας διάχυσης παρουσία πλευρικού ανέμου. Οι πειραματικές συνθήκες φαίνονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1 Πειραματικές συνθήκες του πειράματος των F. Tang, L. Li, Q. Wang και Q. Shi [55].

Δοκιμή	Θέση του καυστήρα	Ταχύτητες του πλαγίου ανέμου (m/s)						
1	Στο κέντρο της κεντρικής γραμμής του τούνελ	0	0.3	0.5	0.8	1.0	1.2	1.6
2	Κοντά στο τοίχιο του τούνελ	0	0.3	0.5	0.8	1.0	1.2	1.6
Δοκιμή	Θέση του καυστήρα	Συνολικό ποσό απελευθέρωσης θερμότητας (kW)						
1	Στο κέντρο της κεντρικής γραμμής του τούνελ	9	12	15	21			
2	Κοντά στο τοίχιο του τούνελ	9	12	15	21			

Για την καταγραφή του σχήματος της τυρβώδους φλόγας διάχυσης (diffusion flame) έγινε η χρήση μίας ψηφιακής κάμερας CCD. Ο τοίχος πίσω από την φλόγα καλύφθηκε με ένα μαύρο ύφασμα προκειμένου να αποφευχθεί η ανάκλαση. Με βάση την εικόνα της φλόγας προέκυψε η γκρι εικόνα (grey image) και στην συνέχεια η δυαδική εικόνα της φλόγας (binary image). Το μέσο μήκος της φλόγας (flame

length) υπό την επίδραση του ανέμου θεωρήθηκε ίσο με την απόσταση του σημείου από το οποίο ξεκινάει η φλόγα μέχρι το σημείο διασταύρωσής της με το περίγραμμά της, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.4. [55].



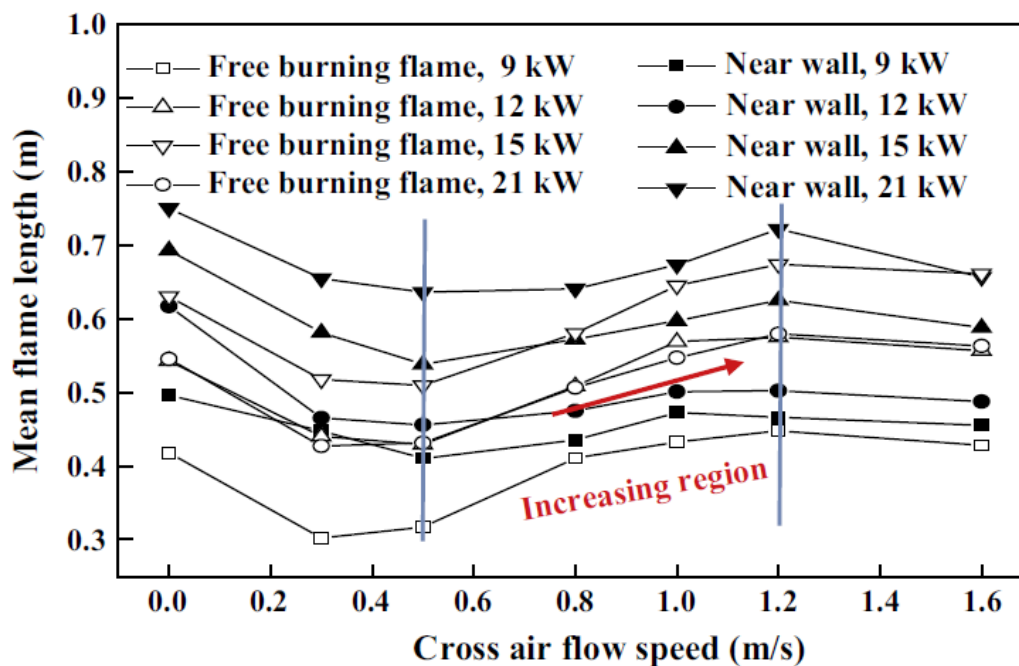
Εικόνα 4.4 Υπολογισμός του μέσου μήκους της φλόγας κατά την πειραματική μελέτη των F. Tang, L. Li, Q. Wang και Q. Shi [55].

Το σύνολο των παρατηρήσεων που προέκυψαν από την πειραματική μελέτη των F. Tang, L. Li, Q. Wang και Q. Shi [55] δίνονται στον Πίνακα 4.2. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε πως κατά την εισαγωγή του ανέμου στη πειραματική διάταξη, το μήκος της φλόγας κοντά στο τοίχιο (near wall flame) μεταβλήθηκε σημαντικά. Το μήκος της φλόγας (flame length) μεταβαλόταν σημαντικά τόσο για τις τυρβώδεις φλόγες κοντά στο τοίχιο όσο και για τις ελεύθερες τυρβώδεις φλόγες (free burning flames). Η μεταβολή του μήκους της φλόγας παρατηρήθηκε πως ήταν ίδια και για τα δύο είδη των φλογών.



Πίνακας 4.2 Το σύνολο των πειραματικών αποτελεσμάτων των F. Tang, L. Li, Q. Wang και Q. Shi [55] κατά την μελέτη του μήκους της φλόγας με αύξηση της ταχύτητας του πλαιγίου ανέμου.

Cross wind velocities (m/s)	Μήκος φλόγας-near wall flame	Μήκος φλόγας-free burning flame	Σύγκριση των μηκών των φλογών	Σύγκριση ταχυτήτων μεταβολής των μηκών των φλογών	Λόγος εμφάνισης αυτής της συμπεριφοράς
0-0.5	Μείωση	Μείωση	$L_{\text{near wall flame}} > L_{\text{free burning flame}}$	Ταχύτητα μεταβολής-near wall flame > Ρυθμός μεταβολής-free burning flame	Αύξηση στην απόδοση της καύσης
0.5-1.2	Αύξηση	Αύξηση	$L_{\text{near wall flame}} > L_{\text{free burning flame}}$	Ταχύτητα μεταβολής-free burning flame > Ρυθμός μεταβολής-near wall flame	Ανταγωνισμός ανάμεσα στην εξάπλωση των έφλεκτων αερίων και στην διατήρηση της καύσης.
1.2-1.6	Μείωση	Μείωση	Παρόμοιες τιμές	Παρόμοια τάση στην μεταβολή της ταχύτητας	Ο μεγάλος άνεμος προκαλεί μεγάλη δύναμη αδράνειας, μεγάλο ποσοστό απελευθέρωσης θερμότητας και μεγάλη πλευστότητα.
>1.6	Πιθανή εξαφάνιση	Πιθανή εξαφάνιση	Παρόμοιες τιμές		Πειραματική παρατήρηση



Διάγραμμα 4.1 Η μεταβολή του μέσου μήκους της φλόγας συναρτήσει της ροής του πλαγίου ανέμου σύμφωνα με την πειραματική μελέτη των F. Tang, L. Li, Q. Wang και Q. Shi [55].

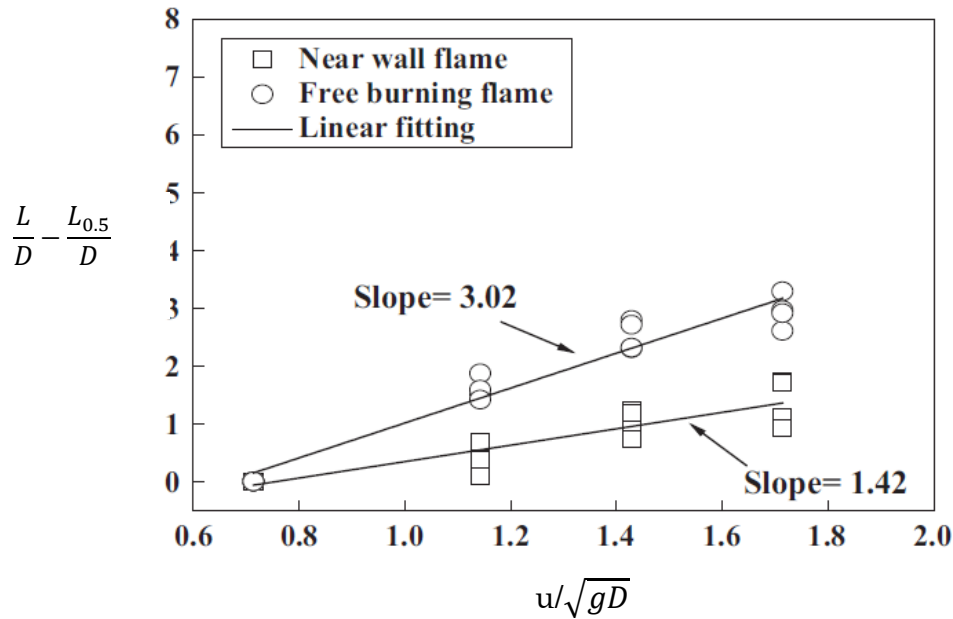
Το Διάγραμμα 4.1 παρουσιάζει την μεταβολή στο μέσο μήκος της φλόγας συναρτήσει της ροής του πλαγίου ανέμου. Από το διάγραμμα αυτό προέκυψε πως η μεταβολή του μέσου ύψους εμφάνιζε παρόμοια τάση και για τα δύο είδη των φλογών. Αρχικά, το μήκος της φλόγας μειωνόταν με την αύξηση της ροής του πλαγίου ανέμου (για χαμηλές ταχύτητες ανέμου). Η συμπεριφορά αυτή προέκυπε από το γεγονός ότι όταν η φλόγα υπόκειται σε έναν άνεμο χαμηλής ταχύτητας από 0 έως 0.5 m/s η απόδοση της καύσης αυξάνεται συγκριτικά με την αντίστοιχη απόδοση χωρίς την παρουσία ανέμου. Όταν ο πλάγιος άνεμος αυξανόταν (0.5-1.2 m/s) τότε και το μήκος της φλόγας έπαιρνε μεγαλύτερες τιμές. Αυτό οφειλόταν στο γεγονός ότι εμφανιζόταν ανταγωνισμός ανάμεσα στην εξάπλωση των εύφλεκτων αερίων και στην ανάγκη διατήρησης της καύσης. Η φλόγα ενδεχομένως να εξαφανιζόταν εάν ο πλάγιος άνεμος αυξανόταν (ταχύτητες μεγαλύτερες από 1.6 m/s), δεδομένου ότι το μήκος της φλόγας μειωνόταν με επιπλέον αύξηση της ταχύτητας του πλαγίου ανέμου (1.2-1.6 m/s). Από τα δεδομένα αυτά προκύπτει πως ο σχετικά μεγάλος πλευρικός



άνεμος προκαλεί μεγαλύτερη δύναμη αδράνειας, μεγαλύτερο ποσοστό απελευθέρωσης θερμότητας και μεγαλύτερη πλευστότητα.

Επιπλέον, όπως προκύπτει από το Διάγραμμα 4.1, το μέσο μήκος σε μία τυρβώδη φλόγα διάχυσης που λαμβάνει χώρα κοντά στο τοίχιο εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές από το αντίστοιχο μήκος μίας ελεύθερης τυρβώδους φλόγας. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στον περιορισμό της εισόδου του ανέμου από το πλευρικό τοίχιο.

Η μεταβολή του μήκους της φλόγας κοντά στο τοίχιο, καθώς μεταβαλλόταν η ταχύτητα του πλαγίου ανέμου, εμφάνιζε διαφορετική συμπεριφορά από την αντίστοιχη μεταβολή της ελεύθερης φλόγας. Συγκεκριμένα, κοντά στο τοίχιο το μήκος της φλόγας μειωνόταν ταχύτερα σε σύγκριση με το αντίστοιχο μήκος της ελεύθερης φλόγας, καθώς επιδρούσαν πλάγιοι άνεμοι χαμηλών ταχυτήτων (μικρότεροι ή ίσοι με 0.5 m/s). Επομένως, το αδιάστατο μήκος της φλόγας για μία φλόγα που αναπτύσσεται κοντά στο τοίχιο είναι πολύ ευαίσθητο στις μικρές ταχύτητες του πλευρικού ανέμου (cross wind velocities) λόγω των σημαντικών μεταβολών που λαμβάνουν χώρα με την εμφάνιση διαφορετικών ποσοστών απελευθέρωσης θερμότητας της πυρκαγιάς. Αυτό το φαινόμενο εμφανίζεται επειδή υπάρχει περίπλοκη αλληλεπίδραση ανάμεσα στον περιορισμό από τα πλευρικά τοιχώματα και τον ασθενή άνεμο [55].



Διάγραμμα 4.2 Το αδιάστατο μήκος της φλόγας (dimensionless length) ($L/D - L_{0.5}/D$) συναρτήσει του αριθμού Froude (u/\sqrt{gD}) υπό την επίδραση διαφορετικών τιμών της ταχύτητας του ανέμου στο εύρος των 0.5-1.2 m/s, σύμφωνα με την πειραματική μελέτη των F. Tang, L. Li, Q. Wang και Q. Shi [55].

Το Διάγραμμα 4.2 παρουσιάζει το αδιάστατο μήκος της φλόγας (dimensionless length) συναρτήσει του αριθμού Fr για ταχύτητες ανέμου στο εύρος των 0.5-1.2 m/s. Σύμφωνα με το Διάγραμμα 4.2, η κλίση της γραφικής παράστασης για την ελεύθερη φλόγα είναι περίπου δύο φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη κλίση για τη φλόγα που αναπτύσσεται κοντά στο τοίχιο. Με βάση τα παραπάνω, η ταχύτητα μεταβολής του αδιάστατου μήκους της ελεύθερης φλόγας είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη ταχύτητα για το κλάσμα της φλόγας που αναπτύσσεται κοντά στο τοίχιο, δεδομένου ότι εμφανίζονται οι δυνάμεις της αδράνειας από την πλάγια ροή του ανέμου και η αντίσταση από το πλευρικό τοίχιο.



4.2.2 ΑΠΟΥΣΙΑ ΠΛΕΥΡΙΚΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

Οι F. Tang, L. Li, Q. Wang και Q. Shi [55] μελέτησαν το μήκος της φλόγας τόσο παρουσία όσο και απουσία ανέμου. Για την μελέτη του μήκους της φλόγας απουσία πλευρικού ανέμου χρησιμοποίησαν την πειραματική διάταξη που περιγράφηκε αναλυτικά παραπάνω.

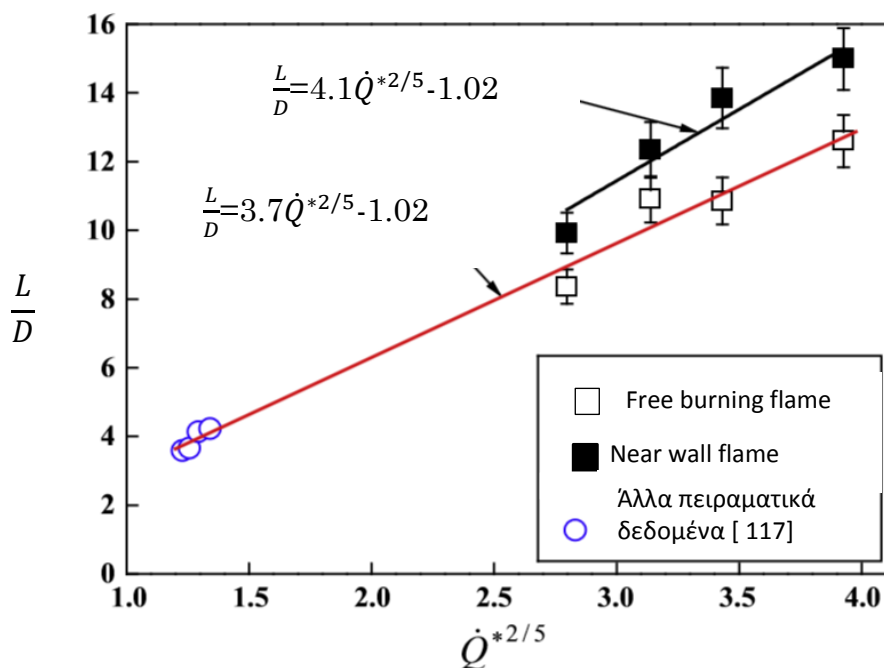
Τα πειραματικά δεδομένα που προέκυψαν αφορούσαν την μεταβολή στο αδιάστατο κλάσμα L/D για τυρβώδεις φλόγες διάχυσης όπου δεν επιδρούσε ο άνεμος, καθώς μεταβαλόταν το αδιάστατο ποσό απελευθέρωσης θερμότητας. Αρχικά, τα ύψη της φλόγας κοντά στο τοιχίο εμφάνιζαν σημαντικά μεγαλύτερες τιμές από τα αντίστοιχα ύψη της ελεύθερης φλόγας. Από τις μεταβολές στο αδιάστατο μήκος της φλόγας χωρίς την επίδραση του ανέμου της μελέτης των των F. Tang, L. Li, Q. Wang και Q. Shi [55], αλλά και άλλων ερευνητών, προέκυψαν οι εξής εξισώσεις:

- ❖ Ελεύθερη φλόγα (free burning flame):

$$\frac{L}{D}=3.7\dot{Q}^{*2/5}-1.02 \quad (4.9)$$

- ❖ Φλόγα κοντά στο τοιχίο (near wall flame):

$$\frac{L}{D}=4.1\dot{Q}^{*2/5}-1.02 \quad (4.10)$$



Διάγραμμα 4.3 Η μεταβολή του αδιάστατου ύψους (dimensionless height) της φλόγας που αναπτύσσεται κοντά στο τοίχιο και της ελεύθερης φλόγας απουσία ανέμου σύμφωνα με την πειραματική μελέτη των F. Tang, L. Li, Q. Wang και Q. Shi [55].

Από το Διάγραμμα 4.3 προκύπτει πως το αδιάστατο ύψος της φλόγας που αναπτύσσεται κοντά στο τοίχιο μεταβάλλεται ταχύτερα συναρτήσει του αδιάστατου ποσοστού απελευθέρωσης θερμότητας σε σύγκριση με το αντίστοιχο αδιάστατο ύψος για την ελεύθερη φλόγα.

4.3 ΤΟ ΥΨΟΣ ΤΗΣ ΦΛΟΓΑΣ

Το ύψος και το μήκος της φλόγας είναι έννοιες αλληλένδετες, άρα και το ύψος της φλόγας επηρεάζεται σημαντικά από την παρουσία πλευρικού ανέμου. Επομένως, θα ακολουθήσει η ανάλυση των εξισώσεων υπολογισμού του ύψους της φλόγας τόσο παρουσία όσο και απουσία πλευρικού ανέμου.

4.3.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΠΛΕΥΡΙΚΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

Η παρουσία του ανέμου επηρεάζει και το ορατό μήκος των φλογών. Η εξίσωση που αναπτύχθηκε από τον Thomas [58] για τις πυρκαγιές σε ξύλινες κούνιες υπό την επίδραση του ανέμου είναι η εξής:

$$\frac{H}{D} = 55 \left[\frac{\dot{m}''}{\rho_{\alpha} \sqrt{gD}} \right]^{0.67} [u^*]^{-0.21} \quad (4.11)$$

όπου,

u^* : η αδιάστατη τιμή της ταχύτητας του ανέμου που δίνεται από τις Εξισώσεις (4.4) και (4.5).

Ο Moorhouse [40] διεξήγαγε διάφορες δοκιμές μεγάλης κλίμακας σε πυρκαγιές σε δεξαμενές LNG. Τα δεδομένα των δοκιμών αυτών λήφθηκαν από φωτογραφίες και αναλύθηκαν προκειμένου να προκύψει το ακριβές μήκος της φλόγας. Η εξίσωση που προέκυψε από τον Moorhouse [40] είναι η ακόλουθη:

$$\frac{H}{D} = 6.2 \left[\frac{\dot{m}''}{\rho_{\alpha} \sqrt{gD}} \right]^{0.254} [u_{10}^*]^{-0.044} \quad (4.12)$$

όπου,

u_{10}^* : η αδιάστατη τιμή της ταχύτητας του ανέμου που ορίστηκε στο ύψος των 10 m. Στην Εξίσωση (4.11) θεωρήθηκε πως το u^* έχει τιμή ίση με την μονάδα, αν και η τιμή του είναι μικρότερη από ένα.

Τέλος, το ύψος της φλόγας (flame height) σύμφωνα με την κλασική δυναμική θεωρία των πυρκαγιών [23] δίνεται από την σχέση:

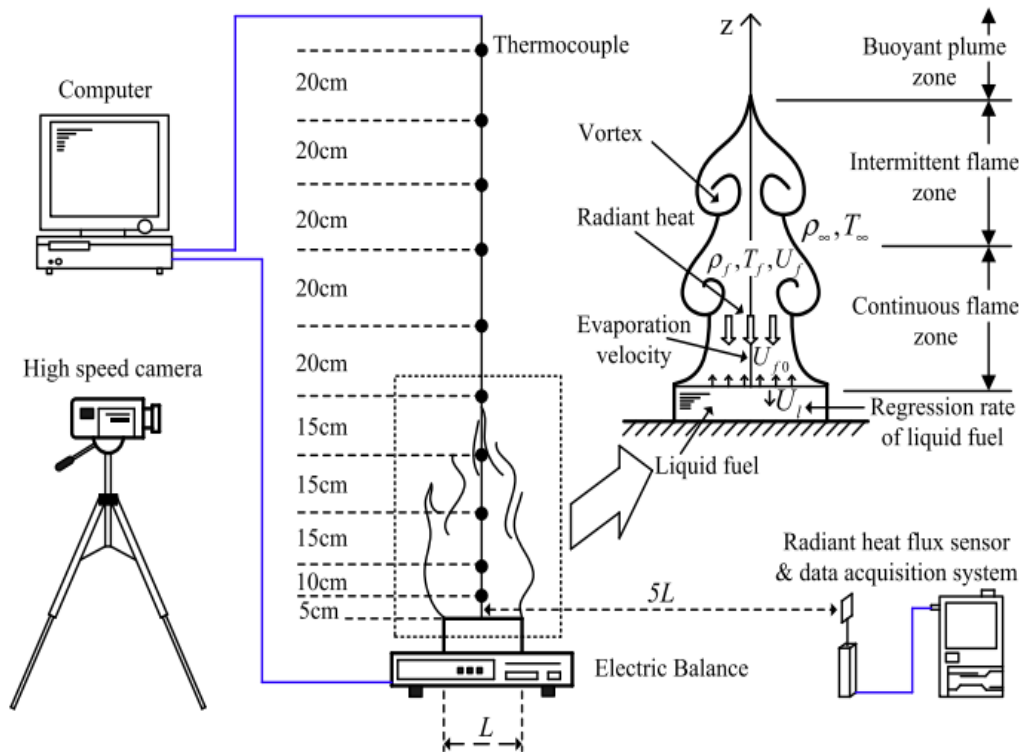
$$H/D = 3.7 \dot{Q}^{*2/5} - 1.02 \quad (4.13)$$

όπου το αδιάστατο ποσό απελευθέρωσης θερμότητας δίνεται από τον τύπο [23]:

$$\dot{Q}^* = \frac{\pi D^2 \dot{m}'' \Delta H_c}{4 \rho_{\infty} T_{\infty} c_p \sqrt{gD} D^2} \sim \dot{m}'' / p \sqrt{D} \quad (4.14)$$

Άρα η Εξίσωση (4.13) παίρνει την μορφή:

$$H/D \sim (\dot{m}'' / \rho \sqrt{D})^{2/5} - 1.02 \quad (4.15).$$



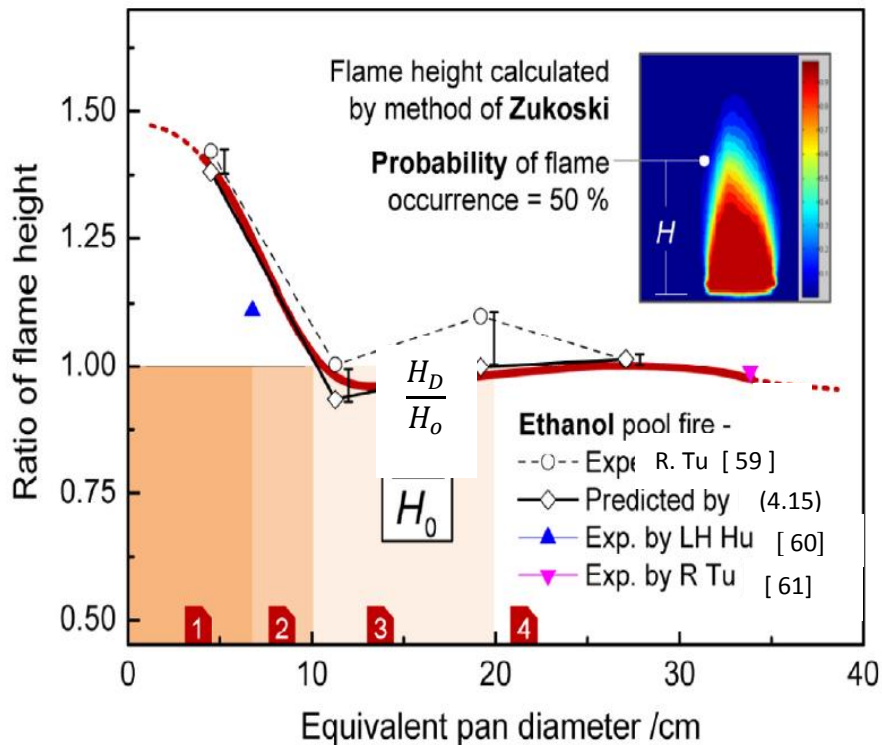
Εικόνα 4.5 Πειραματική διάταξη για την μελέτη της πυρκαγιάς σύμφωνα με την μελέτη των Ru et al [59].

Οι R. Tu et al [59] διεξήγαγαν μία πειραματική μελέτη για το ύψος της φλόγας με βάση την διάταξη που δίνεται στην Εικόνα 4.5. Τα πειράματα έλαβαν χώρα σε δωμάτια καύσης. Οι πόλεις στις οποίες διεξήχθησαν τα πειράματα ήταν η Lhasa και το Hefei. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν δεκαπέντε καυστήρες από ατσάλι σε διάφορες διαστάσεις μήκους, σταθερό πάχος και βάθος. Οι καυστήρες αυτοί τοποθετήθηκαν στο κέντρο των δωματίων καύσης. Το βάθος του υγρού καυσίμου σε κάθε καυστήρα ήταν ίσο με 3 cm. Η αιθανόλη και το n-επτάνιο χρησιμοποιήθηκαν ως καύσιμα, διότι οι φλόγες τους εμφανίζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά κατά τον σχηματισμό της αιθάλης.



Η επιλογή της τοποθεσίας δεν ήταν τυχαία, καθώς στην Lhasa και στο Hefei οι συνθήκες περιβάλλοντος είναι συγκεκριμένες και η μεταβολή στην πίεση του ανέμου είναι μικρότερη από 1 kPa. Επιπλέον, η διεξαγωγή των πειραμάτων έγινε σε σχεδόν παρόμοιες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας και στις δύο τοποθεσίες (Lhasa: 20° C και 50%, Hefei: 22° C και 60%).

Κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων λήφθηκαν δεδομένα για την απώλεια μάζας, την θερμοκρασία κατά μήκος του άξονα της πυρκαγιάς (axial temperature), τη ροή θερμότητας της ακτινοβολίας και την εικόνα της φλόγας. Ένα σύνολο από 10 θερμοστοιχεία με περίβλημα από ανοξείδωτο χάλυβα για μείωση της επίδρασης της θερμοκρασίας και διάμετρο 1 mm το καθένα τοποθετήθηκαν πάνω από την επιφάνεια του καυστήρα στην κεντρική γραμμή για να μετρηθεί η θερμοκρασία κατά μήκος του άξονα της πυρκαγιάς της δεξαμενής (pool fire). Το εύρος των μετρήσεων ήταν ανάμεσα στους 0 και 1,000° C με προσαιξήσεις των 0.5° C. Κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων οι μετρήσιμες τιμές της θερμοκρασίας αντιπροσώπευαν την θερμοκρασία του αερίου της φλόγας. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε ένας αισθητήρας για την ροή της ακτινοβολίας. Τα δεδομένα της ροής της ακτινοβολίας καταγράφηκαν από το σύστημα DaqPRO-5300. Για λεπτομερή καταγραφή των εικόνων της φλόγας χρησιμοποιήθηκε μία κάμερα με υψηλή ταχύτητα λήψης [59].



Διάγραμμα 4.4 Δεδομένα για τον λόγο H_D/H_0 συναρτήσει της διαμέτρου της πειραματικής λεκάνης στην οποία ήταν τοποθετημένο το καύσιμο. Τα δεδομένα για την δημιουργία του παραπάνω διαγράμματος περιλαμβάνουν τα πειραματικά δεδομένα του πειράματος των L. H. Hu et al [60], R. Tu et al [61, 59] και τα αποτελέσματα της Εξίσωσης (4.15)

Η Εξίσωση (4.15) μπορεί να προβλέψει την επίδραση της πίεσης του ανέμου στο ύψος της φλόγας με ικανοποιητική ακρίβεια, όπως προκύπτει και από το Διάγραμμα 4.4. Το ύψος της φλόγας (flame height) προσδιορίστηκε από μία ψηφιακή εικόνα με βάση τον ορισμό των Zukoski et al. [62]. Η γραφική παράσταση του λόγου H_D/H_0 συναρτήσει της διαμέτρου D της πειραματικής λεκάνης όπου ήταν τοποθετημένο το καύσιμο δίνεται από την κόκκινη συμπαγή γραμμή. Παρόμοια συμπεριφορά θα εμφάνιζε η επίδραση της πίεσης του ανέμου στην ταχύτητα καύσης και στο ύψος της φλόγας με αύξηση της διαμέτρου της πειραματικής λεκάνης [23] .



4.3.2 ΑΠΟΥΣΙΑ ΠΛΕΥΡΙΚΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

Εκτός από την Εξίσωση (4.11) που περιγράφει το ύψος της φλόγας (flame height) παρουσία ανέμου, ο Thomas [58] ανέπτυξε και διάφορες εξισώσεις για το μέσο ύψος σε τυρβώδεις φλόγες διάχυσης (turbulent diffusion flames) απουσία ανέμου με βάση πειραματικά δεδομένα. Οι πειραματικές μετρήσεις του Thomas [53] λήφθηκαν από τυρβώδεις φλόγες διάχυσης (diffusion flames) που προέκυψαν από πυρκαγιές σε ξύλινες κούνιες. Επομένως, η εξίσωση που προέκυψε για μία κυκλική πυρκαγιά είναι η εξής:

$$\frac{H}{D} = 42 \left[\frac{\dot{m}''}{\rho_{\alpha} \sqrt{gD}} \right]^{0.61} \quad (4.16)$$

όπου,

\dot{m}'' : η ταχύτητα καύσης ανά μονάδα επιφάνειας της δεξαμενής (σε $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)

ρ_{α} : η πυκνότητα του ανέμου του περιβάλλοντος

Ο Stewart [63] ανέπτυξε επίσης μία παρόμοια εξίσωση η οποία περιλαμβάνει τις ιδιότητες του καυσίμου:

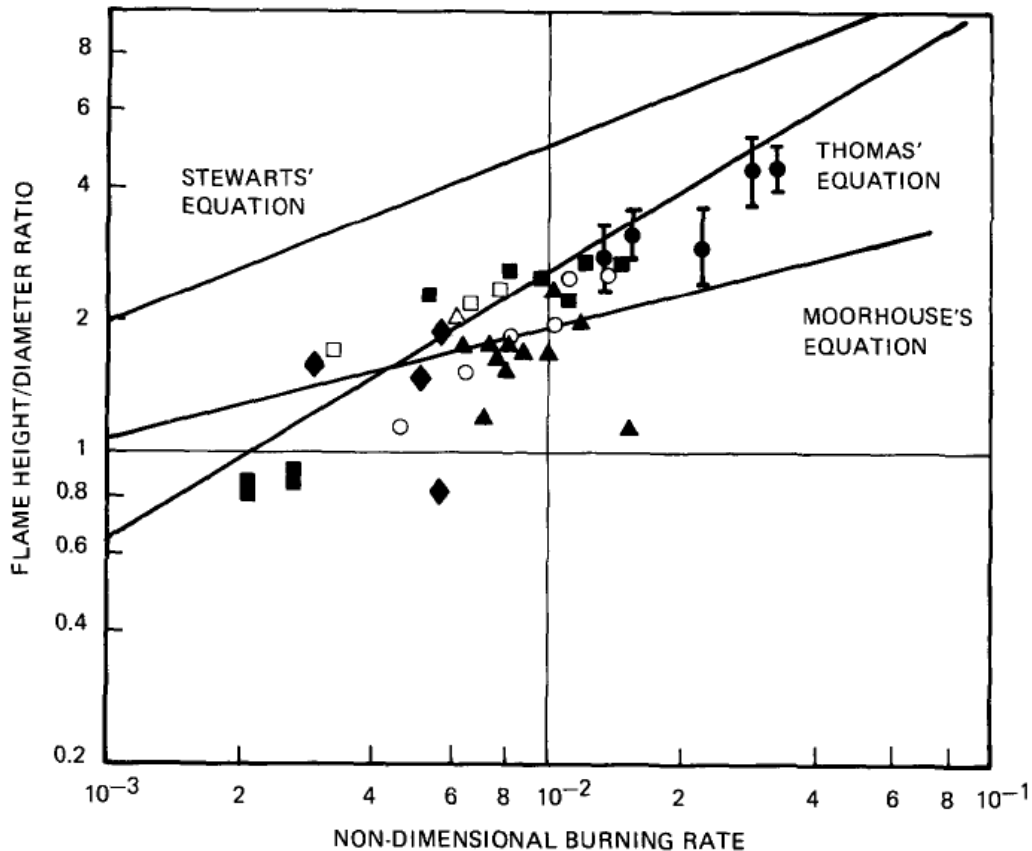
$$\frac{H}{D} = 14.73 \left[\frac{\omega(r + \frac{\omega}{T})}{(1-\omega)^5} \right] \left[\frac{\dot{m}''}{\rho_{\alpha} \sqrt{gD}} \right]^{0.4} \quad (4.17)$$

όπου,

ω : το αντίστροφο κλάσμα της ογκομετρικής εκτόνωσης λόγω της καύσης.

Για το υγρό μεθάνιο, η σχέση αυτή παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$\frac{H}{D} = 31.4 \left[\frac{\dot{m}''}{\rho_{\alpha} \sqrt{gD}} \right]^{0.4} \quad (4.18).$$



Διάγραμμα 4.5 Τα κλάσματα του ύψους της φλόγας (flame length) προς της διάμετρο της φλόγας συναρτήσει της αδιάστατης ταχύτητας καύσης.

- Πυρκαγιές σε δεξαμενές (pool fires) LNG σε νερό [64].
- Πυρκαγιές σε δεξαμενές (pool fires) LNG στο έδαφος [65].
- ▲ Πυρκαγιές σε δεξαμενές (pool fires) LNG στο έδαφος [40].
- Πυρκαγιές βενζίνης στο έδαφος [66].
- Πυρκαγιές κηροζίνης στο έδαφος [67].
- ◆ Πυρκαγιές βενζίνης, κηροζίνης και πετρελαίου [14].
- Πυρκαγιές LNG, LPG και κηροζίνης στο έδαφος [68].
- ▲ Πυρκαγιές ακετόνης [69].

Επιπλέον, στο διάγραμμα αυτό απεικονίζονται οι συσχετίσεις από τις εξισώσεις των Stewart (4.17) [63], Thomas (4.11) [58] και Moorhouse (4.12) [40].

Στο Διάγραμμα 4.5 παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα που προέκυψαν από διάφορες μελέτες και τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις εξισώσεις που αναλύθηκαν παραπάνω, τόσο παρουσία ανέμου όσο και απουσία ανέμου. Συγκεκριμένα οι εξισώσεις που μελετώνται είναι οι (4.11), (4.12)



και (4.17) [16]. Από το διάγραμμα αυτό προκύπτει πως η Εξίσωση (4.11) μπορεί να προσδιορίσει το ορατό ύψος της φλόγας με ικανοποιητική ακρίβεια. Η Εξίσωση (4.11) εμφανίζει συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα, σε αντίθεση με τις Εξισώσεις (4.12) και (4.17) που η ακρίβειά τους είναι περιορισμένη.

4.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- ❖ Κάθε εξίσωση για τον προσδιορισμό του μήκους της φλόγας παρουσία ανέμου έχει διαφορετικό πεδίο εφαρμογής. Παρόλα αυτά προέκυψε πως η Εξίσωση του Thomas (4.1) [53] δίνει τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα για τον προσδιορισμό του μήκους της φλόγας παρουσία ανέμου.
- ❖ Αντίστοιχα, καθεμία από τις Εξισώσεις (4.11), (4.12) και (4.13) που υπολογίζουν το πηλίκο H/D για κάθε φλόγα παρουσία ανέμου έχει διαφορετικά πεδία εφαρμογής. Ωστόσο, με βάση τα δεδομένα που αναλύθηκαν η εξίσωση του Thomas (4.11) [58] και της Κλασικής Δυναμικής Θεωρίας των Πυρκαγιών (4.15) [23] είναι οι πλέον αξιόπιστες για τον προσδιορισμό του ύψους της φλόγας.
- ❖ Οι εξισώσεις του Thomas [53, 58] για τον προσδιορισμό του ύψους της φλόγας και για τον προσδιορισμό του μήκους της φλόγας είναι ίδιες. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει την αλληλοεξάρτηση αυτών των δύο μεγεθών, όπως επισημάνθηκε και στην εισαγωγή του κεφαλαίου.
- ❖ Το σύνολο των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα πειράματα που αναλύθηκαν παραπάνω δίνονται στον παρακάτω πίνακα. Από τα δεδομένα αυτά προκύπτει πως το μήκος της φλόγας είναι σχεδόν ανεξάρτητο από το καύσιμο, καθώς όλες οι πειραματικές δοκιμές που αναλύθηκαν χρησιμοποίησαν διαφορετικά καύσιμα, ενώ η συμπεριφορά του μήκους της φλόγας ήταν παρόμοια σε όλα τα πειράματα. Ωστόσο, παρατηρήθηκε πως το μήκος της φλόγας επηρεάζεται άμεσα από την ταχύτητα του ανέμου. Συγκεκριμένα, όταν ο άνεμος έχει χαμηλές τιμές (0-0.5 m/s) το μήκος της φλόγας μειωνόταν με την αύξησή του. Όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπερνούσε τα 0.5 m/s το μήκος της φλόγας παρουσίαζε αύξηση με αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Αυτή η



συμπεριφορά παρατηρήθηκε μέχρι και τα 1.2 m/s. Για τιμές της ταχύτητας του ανέμου στο εύρος των 1.2-1.6 m/s παρατηρήθηκε μείωση του μήκους της φλόγας με αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Όταν η ταχύτητα του ανέμου γινόταν μεγαλύτερη από 1.6 m/s το μήκος της φλόγας μειωνόταν σημαντικά, ενώ θεωρήθηκε πως εάν η ταχύτητα εμφάνιζε πολύ μεγάλες τιμές (7.8 m/s) η φλόγα θα έσβηνε. Τέλος, παρατηρήθηκε πως το μήκος της φλόγας επηρεαζόταν από την παρουσία του πλευρικού τοιχίου του τούνελ. Συγκεκριμένα, η συμπεριφορά της φλόγας παρουσία του πλευρικού τοιχίου του τούνελ με αύξηση της ταχύτητας του ανέμου ήταν σύμφωνη με βάση όσα αναλύθηκαν παραπάνω. Ωστόσο, το μήκος της φλόγας στην περίπτωση αυτή εμφάνιζε μεγαλύτερες τιμές. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στον περιορισμό της εισόδου του ανέμου από το πλευρικό τοίχιο, άρα απαιτείται η ανάπτυξη της φλόγας σε ορισμένη απόσταση από το τοίχιο προκειμένου να διατηρηθεί η καύση. Επομένως, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως παρότι οι δύο πειραματικές μελέτες που αναπτύχθηκαν παραπάνω διεξάχθηκαν σε διαφορετικές χρονικές περιόδους (E. Lois και J. Swithenbank [57] το 1981 και των F. Tang, L. Li, Q. Wang και Q. Shi [55] το 2016) εμφάνισαν αξιόπιστα αποτελέσματα που συμφωνούσαν ικανοποιητικά μεταξύ τους.



Πίνακας 4.3 Σύγκριση πειραματικών δεδομένων του μήκους της φλόγας παρουσία ανέμου.

Καύσιμο	Τοποθεσία φλόγας	Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Μήκος φλόγας (m)	Συμπεριφορά του μήκους της φλόγας	Αναφορά
Μεθανόλη	Κέντρο του τούνελ	όλο το εύρος των ταχυτήτων	Λίγα εκατοστά		[57]
Εξάνιο	Κέντρο του τούνελ	2.5-7.8	Μικρή μεταβολή	Το κύριο τμήμα είχε μεταβολή μήκους και χωριζόταν σε δύο τμήματα με κενό μεταξύ τους.	[57]
LPG	Ελεύθερη περιοχή του τούνελ	0-0.5	0.3-0.6	Μείωση με αύξηση της ταχύτητας του ανέμου	[55]
LPG	Ελεύθερη περιοχή του τούνελ	0.5-1.2	0.3-0.7	Αύξηση με αύξηση της ταχύτητας του ανέμου	[9]
LPG	Ελεύθερη περιοχή του τούνελ	1.2-1.6	0.4-0.7	Μείωση με αύξηση της ταχύτητας του ανέμου	[55]
LPG	Ελεύθερη περιοχή του τούνελ	>1.6	Μικρές τιμές	Μικρή μεταβολή με αύξηση της ταχύτητας του ανέμου	[55]
LPG	Κοντά στο τοίχωμα του τούνελ	0-0.5	0.4-0.75	Μείωση με αύξηση της ταχύτητας του ανέμου	[55]
LPG	Κοντά στο τοίχωμα του τούνελ	0.5-1.2	0.4-0.75	Αύξηση με αύξηση της ταχύτητας του ανέμου	[55]
LPG	Κοντά στο τοίχωμα του τούνελ	1.2-1.6	0.45-0.75	Μείωση με αύξηση της ταχύτητας του ανέμου	[55]
LPG	Κοντά στο τοίχωμα του τούνελ	>1.6	Μικρές τιμές	Μικρή μεταβολή με αύξηση της ταχύτητας του ανέμου	[55]

- ❖ Τα πειραματικά δεδομένα που αναλύθηκαν για το ύψος της φλόγας είχαν στόχο τον προσδιορισμό της εξίσωσης υπολογισμού της φλόγας που είχε την μεγαλύτερη ακρίβεια. Ωστόσο, άγεται το συμπέρασμα πως οι επιδράσεις του



ανέμου στο ύψος της φλόγας είναι ανάλογες με αυτές που παρατηρήθηκαν για το μήκος της φλόγας, δεδομένου πως αυτά τα δύο μεγέθη αλληλοεξαρτώνται.

- ❖ Απουσία ανέμου, το μήκος της φλόγας επηρεάζεται σημαντικά από το αδιάστατο ποσό απελευθέρωσης θερμότητας. Συγκεκριμένα, το μήκος της φλόγας αυξάνεται με αύξηση του αδιάστατου ποσού απελευθέρωσης θερμότητας. Η συμπεριφορά αυτή εμφανίζεται τόσο σε φλόγες που αναπτύσσονται κοντά στο τοίχιο όσο και σε ελεύθερες φλόγες. Ωστόσο, οι φλόγες κοντά στο τοίχιο είχαν μεγαλύτερο μήκος σε αντίθεση με τις ελεύθερες φλόγες που εμφάνιζαν μικρότερες τιμές μήκους. Τέλος, η μεταβολή του μήκους της φλόγας με αύξηση του αδιάστατου ποσού απελευθέρωσης θερμότητας ήταν μεγαλύτερη για τις φλόγες που αναπτύσσονταν κοντά στο τοίχιο.
- ❖ Οι Εξισώσεις (4.16), (4.17) και (4.18) που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του μήκους της φλόγας απουσία ανέμου εμφάνισαν περιορισμένη ακρίβεια.
- ❖ Η συμπεριφορά του ύψους της φλόγας απουσία ανέμου αναμένεται να είναι ανάλογη με την συμπεριφορά του μήκους της φλόγας απουσία ανέμου.
- ❖ Το ύψος και το μήκος της φλόγας επηρεάζονται άμεσα από την παρουσία ανέμου. Επιπλέον, ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου είναι δυνατόν είτε να αυξηθούν οι διαστάσεις της φλόγας είτε να μειωθούν σημαντικά μέχρι την τελική κατάσβεσή της.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

L : το μήκος της φλόγας

D : η διάμετρος της φλόγας

\dot{m}'' : η ταχύτητα καύσης ανά μονάδα επιφάνειας της δεξαμενής

ρ_a : η πυκνότητα του ανέμου του περιβάλλοντος

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας

u^* : η αδιάστατη ταχύτητα του ανέμου



u : η ταχύτητα του πλαγίου ανέμου της φλόγας

u_c : η τιμή της ταχύτητας που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του u^* και δίνεται από την Εξίσωση (4.5)

L_1 : η μεταβολή του μήκους της φλόγας

L_2 : το μήκος κάθε τμήματος της φλόγας

L_3 : ένα ποσοστό της φλόγας

L' : το αποτελεσματικό μήκος της φλόγας

$L_{0.5}$: το μήκος της φλόγας για ταχύτητα πλαγίου ανέμου ίση με 0.5

\dot{Q}^* : το αδιάστατο ποσό απελευθέρωσης θερμότητας

H : το ύψος της φλόγας

u_{10}^* : η αδιάστατη τιμή της ταχύτητας του ανέμου που ορίστηκε στο ύψος των 10 m

ΔH_c : η μεταβολή της ενθαλπίας καύσης

ρ_∞ : η πυκνότητα του περιβάλλοντος

T_∞ : η θερμοκρασία του περιβάλλοντος

c_p : η ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα

ρ_v : η πυκνότητα του ατμού

p : η πίεση της ατμόσφαιρας

H_D : το ύψος της φλόγας σε συνθήκες μειωμένης πίεσης ή χαμηλής πίεσης

H_0 : το ύψος της φλόγας σε κανονικές συνθήκες

ω : το αντίστροφο κλάσμα της ογκομετρικής εκτόνωσης λόγω της καύσης

5. ΚΕΦΑΛΑΙΟ-Η ΓΩΝΙΑ ΚΛΙΣΗΣ ΤΗΣ ΦΛΟΓΑΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΠΛΕΥΡΙΚΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ταχύτητα καύσης, η εκπομπή της ακτινοβολίας από μία φλόγα, η θερμοκρασία της ακτινοβολίας, αλλά και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της φλόγας συμπεριλαμβανομένου του ύψους, του σχήματος και της γωνίας κλίσης της είναι οι κύριοι παράγοντες για τον καθορισμό της ροής της θερμικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τις πυρκαγιές των δεξαμενών. Μία πυρκαγιά σε μία δεξαμενή χαρακτηρίζεται από την δημιουργία μίας φλόγας διάχυσης με μεταβαλλόμενη κινητική σε όλη την έκτασή της. Επιπλέον, σε μία πυρκαγιά σε μία δεξαμενή λαμβάνουν χώρα διάφορες αναταράξεις και μηχανισμοί μεταφοράς, ενώ σημαντική κρίνεται και η επίδραση του ανέμου στην ανάπτυξη της πυρκαγιάς. Επομένως, το πεδίο των πυρκαγιών σε δεξαμενές υγρών καυσίμων δεν μπορεί να περιγραφεί πλήρως από τους θεμελιώδεις νόμους που ισχύουν και απαιτείται εκτεταμένη πειραματική έρευνα. Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μία μελέτη των ερευνών που έχουν διεξαχθεί για τις πυρκαγιές σε δεξαμενές υγρών καυσίμων. Η ανάλυση αυτή θα εστιάσει κυρίως στην επίδραση των διαφορετικών ταχυτήτων του πλευρικού ανέμου στην γωνία κλίσης της φλόγας (flame tilt angle) [22].

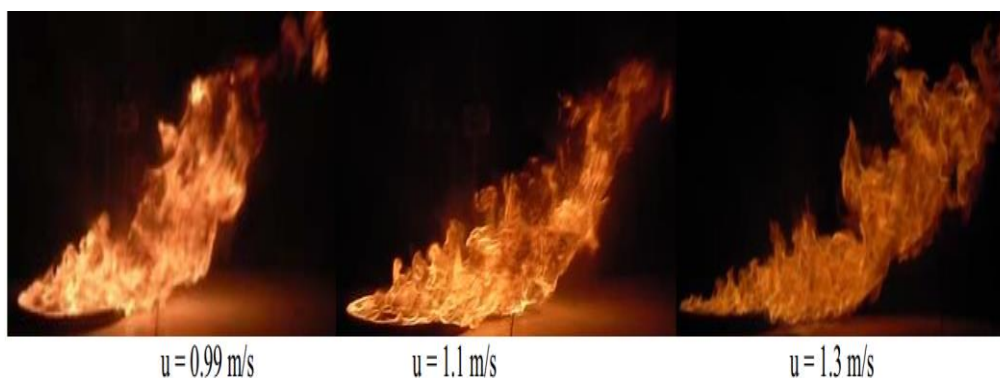


$u = 0 \text{ m/s}$ $u = 0.12 \text{ m/s}$ $u = 0.22 \text{ m/s}$ $u = 0.33 \text{ m/s}$ $u = 0.43 \text{ m/s}$ $u = 0.53 \text{ m/s}$ $u = 0.63 \text{ m/s}$

Εικόνα 5.1 Εικόνες από φλόγες που αναπτύσσονται υπό διαφορετικές τιμές της ταχύτητας του πλευρικού ανέμου [22].



Εικόνα 5.2 Εικόνες από φλόγες που αναπτύσσονται υπό διαφορετικές τιμές της ταχύτητας του πλευρικού ανέμου (συνέχεια) [22].



Εικόνα 5.3 Εικόνες από φλόγες που αναπτύσσονται υπό διαφορετικές τιμές της ταχύτητας του πλευρικού ανέμου (συνέχεια) [22].



Εικόνα 5.4 Εικόνες από φλόγες που αναπτύσσονται υπό διαφορετικές τιμές της ταχύτητας του πλευρικού ανέμου (συνέχεια) [22].



$u = 2.5 \text{ m/s}$

Εικόνα 5.5 Εικόνες από φλόγες που αναπτύσσονται υπό διαφορετικές τιμές της ταχύτητας του πλευρικού ανέμου (συνέχεια) [22].



$u = 4.71 \text{ m/s}$

Εικόνα 5.6 Εικόνες από φλόγες που αναπτύσσονται υπό διαφορετικές τιμές της ταχύτητας του πλευρικού ανέμου (συνέχεια) [22].

5.2 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΚΛΙΣΗΣ ΤΗΣ ΦΛΟΓΑΣ

Η ανάλυση στην υποενότητα αυτή θα εστιάσει σε δύο άξονες. Ο ένας άξονας αφορά τις πρόσφατες έρευνες που έχουν διεξαχθεί για την γωνία κλίσης της φλόγας και ο άλλος άξονας αφορά τις παλαιότερες έρευνες, προκειμένου να προκύψει ένα συμπέρασμα για την διαχρονική ισχύ των ερευνητικών αποτελεσμάτων.

Η γωνία κλίσης της φλόγας (flame tilt angle) θ , υπό την επίδραση του ανέμου αποτέλεσε αντικείμενο πολλών μελετών. Οι Walker, Sliercevick [70] και Emori και Saito [71] όρισαν εξισώσεις σαν την Εξίσωση (5.1) με την εκτέλεση πειραμάτων μικρής κλίμακας. Η έρευνά τους συσχέτισε την γωνία κλίσης της φλόγας με την ταχύτητα του ανέμου. Ωστόσο, τα αποτελέσματά των πειραμάτων τους δεν είναι



συγκρίσιμα με τα αντίστοιχα που αναμένονταν από πειράματα ευρείας κλίμακας. Η σταθερά C_f είναι η αδιάστατη σταθερά που ορίστηκε από τον Walker [70].

$$\frac{\tan \theta}{\cos \theta} = \frac{2C_f u_w^2}{\pi D \left(\frac{\rho_a - \rho_f}{\rho_a} \right) g} \quad (5.1)$$

Ο Munoz [72] θεώρησε πως υπάρχουν δύο σχέσεις που χρησιμοποιούνται για να υπολογιστεί η γωνία κλίσης της φλόγας. Η πρώτη σχέση συσχετίζει την γωνία κλίσης της φλόγας με την αδιάστατη ταχύτητα του ανέμου u^* :

$$\cos \theta = \alpha' (u^*)^{b'} \quad u^* \geq 1 \quad (5.2)$$

$$\cos \theta = 1 \quad u^* < 1 \quad (5.3)$$

Το κύριο μειονέκτημα της παραπάνω σχέσης είναι ότι για χαμηλή ταχύτητα ανέμου προκύπτει η γωνία κλίσης της φλόγας ίση με μηδέν.

Η δεύτερη σχέση του Munoz [72] συσχετίζει την γωνία κλίσης της φλόγας με τους αριθμούς Froude και Reynolds:

$$\frac{\tan \theta}{\cos \theta} = c' Fr^{d'} Re^{e'} \quad (5.4)$$

Αυτές οι συσχετίσεις επιτρέπουν τον καθορισμό της γωνίας κλίσης της φλόγας, ακόμα και υπό την επίδραση χαμηλών ταχυτήτων του ανέμου. Ωστόσο, καμία από τις παραπάνω συσχετίσεις δεν εμφανίζει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Ο J. A. Fay [73] αποτύπωσε την παρακάτω εμπειρική εξίσωση που περιλαμβάνει μόνο τον αριθμό Froude:

$$\sin \theta = \frac{Fr}{Fr + 0.19} \quad (5.5)$$

Ωστόσο, τα αποτελέσματα των πειραμάτων που διεξήχθησαν για να προκύψει η παραπάνω σχέση εμφάνιζαν μεγάλη διασπορά των μετρούμενων γωνιών της φλόγας. Επομένως, δεν υπάρχουν μετρήσιμα δεδομένα για μικρές τιμές της ταχύτητας του ανέμου.



Ο υπολογισμός της γωνίας κλίσης της φλόγας φαίνεται να απασχόλησε τους ερευνητές εδώ και χρόνια. Στην βιβλιογραφία έχουν αναφερθεί και παλαιότερες προσπάθειες για τον προσδιορισμό της γωνίας κλίσης της φλόγας.

Οι μελέτες των Walker και Sliepcevick [70], αλλά και των Pirkin και Sliepcevick [74] έδωσαν σχεδόν πανομοιότυπα αποτελέσματα, προβλέποντας πως η φλόγα θα είναι σχεδόν οριζόντια.

$$\frac{\tan \theta}{\cos \theta} = \frac{2C_f u_w^2}{\pi \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_a}\right) g D} \quad (5.6)$$

$$\tan \theta = \frac{2C_f u_w^2}{\pi \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_a}\right) g D} \quad (5.7)$$

Η σταθερά C_f υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$C_f \left(\frac{\rho_f}{\rho_a}\right)^{0.88} = 16.4 (\text{ReFr})^{-0.013} \quad (5.8)$$

Ωστόσο, η τιμή της σταθεράς C_f δεν μεταβάλλεται σημαντικά με την αύξηση του γινομένου ($\text{Re} \cdot \text{Fr}$), άρα:

$$C_f \left(\frac{\rho_f}{\rho_a}\right)^{0.88} = 10.0 \quad (5.9)$$

Επομένως, προκύπτει η Εξίσωση (5.10) που δίνει ακριβέστερα αποτελέσματα από τα αντίστοιχα των Εξισώσεων (5.6) και (5.7):

$$\frac{\tan \theta}{\cos \theta} = 3.3 \text{Re}^{0.07} \text{Fr}^{0.8} \left(\frac{\rho_f}{\rho_a}\right)^{-0.6} \quad (5.10)$$

Οι Pirkin και Sliepcevick [74] πρότειναν την χρήση της Εξίσωσης (5.11) για δεξαμενές με μεγάλη διάμετρο:

$$\tan \theta = \frac{0.24 \beta u_w^2}{D} \quad (5.11)$$

Με βάση τα πειραματικά τους αποτελέσματα οι Pirkin και Sliepcevick [74] κατέληξαν στο συμπέρασμα πως $\beta=0.6$, έτσι οι τιμές των γωνιών κλίσης της φλόγας



βρίσκονταν στο εύρος των 42° με 83° για ταχύτητες ανέμου από 2.5 έως 7.8 m/sec, ενώ προκύπτει η παρακάτω εξίσωση:

$$\tan \theta = 0.721 \left(\frac{u_w^2}{gD} \right)^{0.553} \quad (5.12)$$

Τα δεδομένα του Yumoto [75] για μία πυρκαγιά σε δεξαμενή εξανίου έδωσαν ένα εύρος τιμών για την γωνία κλίσης της φλόγας, το εύρος αυτό κυμαινόταν από 29° έως και 63° για τις τιμές ταχυτήτων του ανέμου που αναφέρθηκαν παραπάνω. Από τα αποτελέσματα της Εξίσωσης (5.13) προκύπτει πως η εξίσωση Yumoto [75] εφαρμόζεται κυρίως σε δεξαμενές με μεγάλες διαμέτρους. Έτσι, η εξίσωση του Yumoto [75] είναι η παρακάτω:

$$\tan \theta = \left(\frac{u_w^2}{gD} \right)^{0.38} \quad (5.13)$$

Η εξίσωση Thomas [53] αναφέρεται κυρίως σε φλόγες βενζίνης και προβλέπει πως η γωνία κλίσης της φλόγας κυμαίνεται από 40° έως 62° όταν η ταχύτητα του ανέμου παίρνει τιμές από 2.3 έως 7.8 m/sec. Η εξίσωση του Thomas [53] είναι η παρακάτω:

$$\cos \theta = 0.7 \frac{u_w}{\left(\frac{gD}{\rho_a} \right)^{1/3}}^{-0.49} \quad (5.14)$$

Η εξίσωση των Ataliah και Raj [56] προέκυψε για φλόγες από ξύλινες κούνιες. Από την εξίσωση αυτή προέκυψε πως η γωνία κλίσης της φλόγας γι' αυτές τις φλόγες παίρνει τιμές στο εύρος των 75° με 81° και εξαρτάται ελάχιστα από την ταχύτητα του ανέμου. Οι εξισώσεις των Ataliah και Raj [56] είναι οι παρακάτω:

$$\frac{\tan \theta}{\cos \theta} = 3.8 \left(\frac{u_w^2}{gD} \right)^{0.8} \quad (5.15)$$

$$\cos \theta = \frac{1}{\sqrt{u^*}} \text{ για } u^* > 1 \quad (5.16)$$

Με βάση όσα αναλύθηκαν παραπάνω, παρόλες τις έρευνες που έχουν γίνει στο πέρασμα των χρόνων δεν έχει προκύψει μία εξίσωση που να προσδιορίζει με ακρίβεια την γωνία κλίσης της φλόγας. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι οι



ταχύτητες καύσης και οι γωνίες κλίσης των φλογών για πυρκαγιές σε δεξαμενές εμφανίζουν μεγάλη αλληλεπίδραση και επηρεάζονται σημαντικά από την μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου, κυρίως στο εύρος των χαμηλών ταχυτήτων του ανέμου. Επομένως, κατά την εκτέλεση των διαφόρων ερευνών ενδεχομένως να μην έγιναν γνωστές όλες οι αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στις και στις ταχύτητες καύσης και τις γωνίες των φλογών. Επιπλέον, ο κυριότερος λόγος εμφάνισης αυτού του προβλήματος είναι οι μεγάλες προσαυξήσεις των ταχυτήτων του ανέμου που λάμβαναν χώρα κατά την εκτέλεση των πειραμάτων στις πυρκαγιές των δεξαμενών. Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε ιδιαίτερα στο εύρος των χαμηλών τιμών ταχυτήτων του ανέμου [22].

5.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΑΡΙΘΜΩΝ RI ΚΑΙ FR

Το πλουμίο (plume) της φλόγας αρχίζει να επιταχύνει προς τα πάνω όταν η δύναμη της άνωσης δρα πάνω σε αυτό. Η δύναμη της άνωσης προκύπτει λόγω της διαφοράς της πυκνότητας του πλουμίου από την πυκνότητα του φρέσκου αέρα (fresh air). Τα φλεγόμενα αέρια βρίσκονται σε όλη την έκταση της φωτεινής φλόγας. Επομένως, η γωνία κλίσης της φλόγας μπορεί να θεωρηθεί η γωνία μεταξύ της εφαπτομένης των φλεγόμενων αερίων και της κατακόρυφης διεύθυνσης. Η ταχύτητα του πλευρικού ανέμου θεωρείται η οριζόντια ταχύτητα του αέρα προς το πλουμίο της πυρκαγιάς.

Για ένα τμήμα του όγκου, dv , του πλουμίου προκύπτει πως η δύναμη της άνωσης είναι:

$$F_B \sim (\rho_a - \rho) g dv \quad (5.17)$$

Η οριζόντια δύναμη της αδράνειας δίνεται από τον τύπο:

$$F_I \sim \frac{\rho_a u_w^2 dv}{L} \quad (5.18)$$

Διαιρώντας τις εξισώσεις (5.17) και (5.18) προκύπτει η Εξίσωση (5.19):



$$\frac{F_I}{F_B} \sim \frac{\rho_\alpha u_w^2}{gD(\rho_\alpha - \rho)} \quad (5.19)$$

Το αντίστροφο της σχέσης (5.19) είναι ο ορισμός τους αριθμού Richardson Ri. Ο αριθμός Ri περιγράφει την σχέση ανάμεσα στη δύναμη της άνωσης και στην δύναμη της αδράνειας. Χρησιμοποιώντας το νόμο του ιδανικού αερίου υπό συνθήκες σταθερής πίεσης, ο αριθμός Ri^{-1} δίνεται από την εξίσωση:

$$Ri^{-1} = \frac{\rho_\alpha u_w^2}{gD(\rho_\alpha - \rho)} = \left(\frac{T_F}{T_F - T_\alpha} \right) \frac{u_w^2}{gD} \quad (5.20)$$

Εάν τα αέρια της φλόγας προσεγγίζουν υψηλές τιμές θερμοκρασίας, ο λόγος $T_F/(T_F - T_\alpha)$ προσεγγίζει μία σταθερή τιμή και δεν μεταβάλλεται σημαντικά με την μεταβολή της θερμοκρασίας του αερίου. Επομένως, θεωρώντας πως το T_F έχει μία σταθερή τιμή, δεν θα προκύψει μεγάλο σφάλμα για την τιμή του κλάσματος $T_F/(T_F - T_\alpha)$. Το T_F για φλόγες σε δεξαμενές υδρογονανθράκων, που λαμβάνουν χώρα σε συνθήκες περιβάλλοντος, εξαρτάται από την περίσσεια ανέμου, από την θερμότητα καύσης του καυσίμου, από το κλάσμα της ακτινοβολίας της θερμότητας και από την σταθερά καύσης κ.λ.π.. Το T_F σε αυτήν την περίπτωση δεν εξαρτάται από το m'' . Η υψηλότερη θερμοκρασία που έχει μετρηθεί για πυρκαγιές σε μεγάλες δεξαμενές καυσίμων αεροπορίας υπό την επίδραση πλαγίου ανέμου ήταν περίπου 1,400 K. Ωστόσο, για πυρκαγιές μεσαίου μεγέθους το T_F μπορεί να είναι λίγο μικρότερο λόγω της ελάττωσης του φαινομένου της επισκότισης από τον καπνό.

Συνδυάζοντας τις Εξισώσεις (5.1) και (5.20) προκύπτει η εξίσωση:

$$\frac{\tan \theta}{\cos \theta} = \frac{2C_f u_w^2}{\pi D \left(\frac{\rho_\alpha - \rho_f}{\rho_\alpha} \right) g} = \frac{2C_f}{\pi} Ri^{-1} \quad (5.21)$$

Η Εξίσωση (5.21) αποδεικνύει ότι ο όρος $\frac{\tan \theta}{\cos \theta}$ θα μπορούσε να συσχετιστεί γραμμικά με τον όρο Ri^{-1} . Ωστόσο, αυτό απαιτεί πειραματική επιβεβαίωση προκειμένου να γίνει και ο καθορισμός της σταθεράς C_f .



Ο αδιάστατος αριθμός Froude (Fr) για τον άνεμο αντιπροσωπεύει το κλάσμα της δύναμης της αδράνειας προς την δύναμη της βαρύτητας και μπορεί να εκφραστεί ως:

$$Fr = \frac{u_w^2}{gD} \quad (5.22)$$

Από τις Εξισώσεις (5.20) και (5.22) προκύπτει ότι ο αριθμός Fr για τον άνεμο είναι ένα ποσοστό του αριθμού Ri^{-1} . Επομένως, εάν η γωνία κλίσης της φλόγας μπορούσε να εκφραστεί σε ένα διάγραμμα συναρτήσεως του αριθμού Ri^{-1} , τότε θα μπορούσε να προκύψει και το αντίστοιχο διάγραμμα της γωνίας κλίσης της φλόγας συναρτήσεως του αριθμού Fr. Τα διαγράμματα αυτής της μορφής χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση των πειραματικών μελετών που θα γίνει παρακάτω [22].

5.4 ΕΡΕΥΝΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΓΩΝΙΑ ΚΛΙΣΗΣ ΤΗΣ ΦΛΟΓΑΣ

Στην υποενότητα αυτή θα αναπτυχθούν πειραματικές έρευνες για την γωνία κλίσης της φλόγας που αντλήθηκαν από την βιβλιογραφία. Οι πειραματικές έρευνες αυτές είχαν στόχο την μελέτη της γωνίας κλίσης της φλόγας παρουσία πλευρικού ανέμου και την συσχέτισή της με τις εξισώσεις υπολογισμού τους. Η πειραματική μελέτη των E. Lois και J. Swithenbank [57] συσχετίζει τις εξισώσεις υπολογισμού της γωνίας κλίσης των φλογών από τις παλαιότερες έρευνες, ενώ η πειραματική μελέτη των Ping Jiang και Shou-xiang Lu [22] μελετά τις εξισώσεις υπολογισμού της γωνίας κλίσης των φλογών από τις πρόσφατες έρευνες.

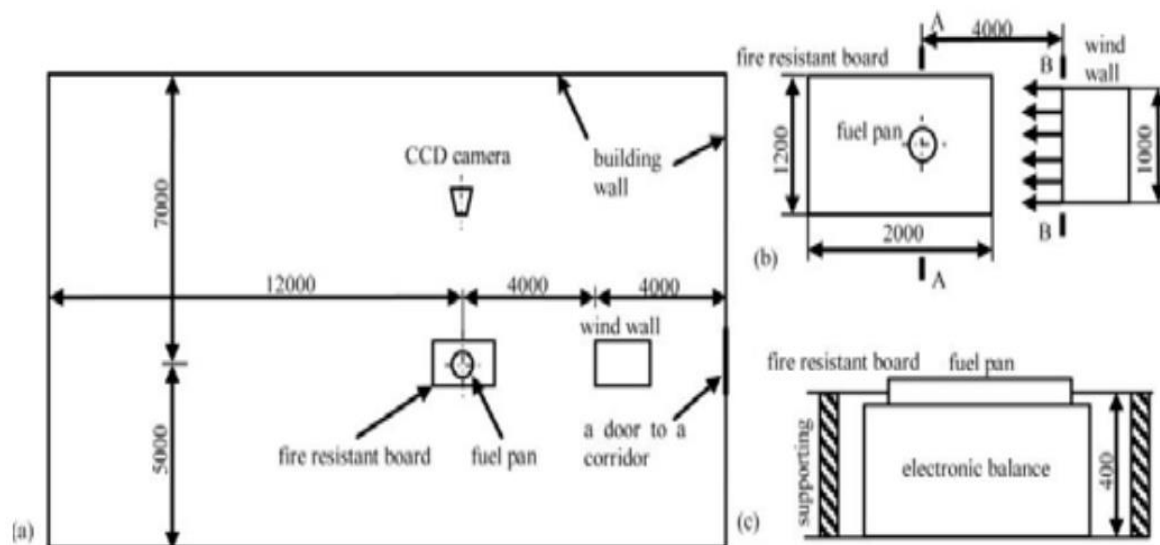
Αρχικά, οι E. Lois και J. Swithenbank [57] μελέτησαν την μεταβολή της γωνίας κλίσης της φλόγας ως προς την μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με βάση φωτογραφίες που λήφθηκαν κατά την διεξαγωγή μίας πυρκαγιάς σε μία δεξαμενή. Προκειμένου να μειωθεί η επίδραση της δεξαμενής πάνω στην φλόγα, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από την ανάλυση μίας πυρκαγιάς σε μία μεγάλη δεξαμενή (pool fire). Για την διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας κατασκευάστηκε ένα τούνελ μέσα από το οποίο περνούσε ο αέρας (wind tunnel) με



μήκος ίσο με 24.1 m. Η περιοχή στην οποία έγινε η πειραματική μελέτη είχε εμβαδόν ίσο με $2 \times 3 \text{ m}^2$. Στην περιοχή αυτή τοποθετήθηκε η κυκλική πειραματική λεκάνη με διάμετρο ίση με 1 m που περιείχε το καύσιμο. Το τούνελ της πειραματικής διαδικασίας ήταν κατασκευασμένο από τούβλα και είχε τοποθετηθεί και ένα τμήμα ειδικά διαμορφωμένο γυαλί που να αντέχει στις υψηλές θερμοκρασίες, προκειμένου να μπορεί να γίνει παρατήρηση της φλόγας σε όλη την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Ο αέρας προσφερόταν στο τούνελ με την χρήση ενός ανεμιστήρα μεταβλητού βήματος. Ο ανεμιστήρας προσέφερε ισχύ 50 HP σε πίεση 150 N/m^2 . Η ταχύτητα του αέρα στο τμήμα των πειραματικών παρατηρήσεων ρυθμιζόταν με την μεταβολή της γωνίας των λεπίδων του ανεμιστήρα. Κατά την έξοδο του αέρα από τον ανεμιστήρα παρατηρήθηκε η εμφάνιση της ανακυκλοφορίας. Ωστόσο, αυτό αντιμετωπίστηκε με την χρήση διαφόρων διατάξεων, π.χ. ανεμιστήρες με δομή κηρήθρας (honeycomb structure). Τα καύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή του πειράματος ήταν υγρό εξάνιο κι υγρή μεθανόλη [57].

Με βάση τις φωτογραφίες που λήφθηκαν κατά την πειραματική μελέτη των E. Lois και J. Swithenbank [57] προέκυψε πως η γωνία κλίσης της φλόγας είναι ίση με 10° , καθώς ο άνεμος είχε ταχύτητα ίση με 2.5 m/sec . Εάν η ταχύτητα του ανέμου αυξανόταν, η φλόγα μπορούσε να πάρει τελείως οριζόντια μορφή. Αυτό υποδεικνύει ότι ο αριθμός Froude της φλόγας ήταν πολύ μεγάλος.

Η μελέτη των E. Lois και J. Swithenbank [57] βασίστηκε στις εξισώσεις υπολογισμού της γωνίας κλίσης της φλόγας που αναπτύχθηκαν παραπάνω από έρευνες που έγιναν παλαιότερα. Επομένως, συγκρίνοντας τα πειραματικά αποτελέσματα με τα αποτελέσματα των εξισώσεων προέκυψε το συμπέρασμα πως μόνο οι (5.6) και (5.7) εμφανίζουν αντιπροσωπευτικές τιμές για τις γωνίες κλίσης των φλογών. Οι υπόλοιπες εξισώσεις εμφανίζουν υποεκτιμημένες τιμές [57].



Εικόνα 5.7 Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης των Ping Jiang και Shou-xiang Lu [22]. Τα (a) και (b) αποτελούν την κάτοψη και το (c) αποτελεί την πλάγια όψη της πειραματικής διάταξης.

Στην συνέχεια οι Ping Jiang και Shou-xiang Lu [22] χρησιμοποίησαν για την μελέτη τους καύσιμο αεροπορίας. Κατά την μελέτη αυτή υπολογίστηκαν οι γωνίες της φλόγας για μία πυρκαγιά που αναπτύχθηκε σε μία κυκλική δεξαμενή που περιείχε καύσιμο αεροπορίας. Η πειραματική διαδικασία έλαβε χώρα παρουσία ανέμου που προσφερόταν από ένα τεχνητό τείχος (wind wall system). Το ύψος και το πλάτος του τεχνητού τείχους ήταν 2m και 1m αντίστοιχα. Η σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης δίνεται στην Εικόνα 5.7. Το τεχνητό τείχος τοποθετήθηκε σε ένα μεγάλο χώρο με διαστάσεις μήκος x πλάτος x ύψος=20 m x 12 m x 20 m.

Το τεχνητό τείχος που χρησιμοποιήθηκε για την παροχή του ανέμου αποτελούταν από δύο ανεμιστήρες αξονικής ροής (1.5 kW ο καθένας, η συνολική πίεση του αέρα ήταν ίση με 191 kPa). Η δομή τους ήταν σε σχήμα κηρήθρας (honeycomb structure) για να επιτευχθεί η εξομάλυνση του αέρα. Επιπλέον, το τεχνητό τείχος είχε ένα εξωτερικό τοίχωμα και δύο ηλεκτροκινητήρες για την παραγωγή ισχύος για καθέναν από τους ανεμιστήρες. Η συχνότητα παραγωγής ισχύος από τους δύο ηλεκτροκινητήρες μπορούσε να ποικίλλει στο εύρος των 0 Hz έως 50 Hz, ενώ η ρυθμιζόμενη ακρίβεια της συχνότητας που εκπεμπόταν ήταν ίση με

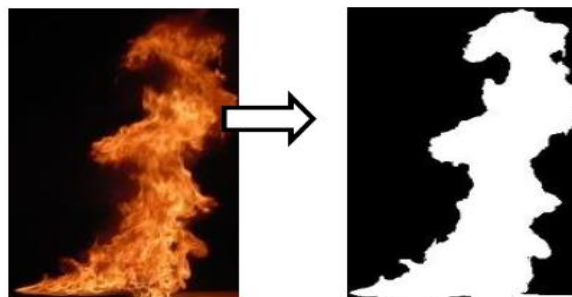
0.1 Hz. Η ταχύτητα των ανεμιστήρων σε στροφές ανά λεπτό βρισκόταν στο εύρος των 0 έως 1450 rpm (round per minute) και μπορούσε να μετρηθεί με βάση την συχνότητα των ηλεκτροκινητήρων. Ο αέρας έρεε από τα ανοίγματα B-B με κατεύθυνση ελαφρώς προς τα κάτω. Το άνοιγμα B-B είναι ήταν ορθογώνιο με διαστάσεις πλάτος x ύψος=1m x 2 m.

Οι οριζόντιες ταχύτητες του αέρα στην διατομή A-A μετρήθηκαν με την χρήση ενός ανεμόμετρου. Η τιμή της ταχύτητας του αέρα, u_w , θεωρήθηκε ίση με την μέση τιμή των ταχυτήτων που προέκυψαν από τις μετρήσεις. Η παρακάτω εξίσωση είναι η πιο ακριβής εξίσωση για τον υπολογισμό του u_w και ορίστηκε από μετρήσεις που έγιναν για το n.

$$u_w = 0.102n - 0.3880 \quad (5.23)$$

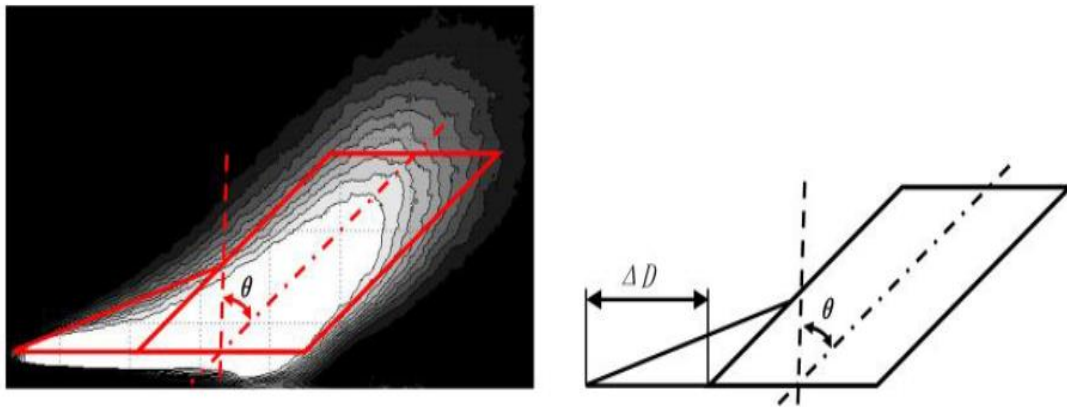
Η Εξίσωση (5.23) είναι εφαρμόσιμη για $n > 3.8$ Hz.

Οι ανεμιστήρες είχαν τεθεί σε λειτουργία πριν την ανάφλεξη της δεξαμενής για να φτάσουν σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης. Για όλες τις δοκιμές, η απόσταση ανάμεσα στο κέντρο της πειραματικής λεκάνης που τοποθετήθηκε το καύσιμο και στην τομή B-B ήταν ίση με 4 μέτρα. Στην Εικόνα 5.7 (c) φαίνεται πως ένας ανιχνευτής για την φλόγα τοποθετήθηκε στο κέντρο και πάνω από τον ηλεκτρονικό ζυγό που μετρούσε τη μάζα του καυσίμου στην πειραματική λεκάνη. Η ακρίβεια του ηλεκτρονικού ζυγού ήταν ίση με 0.1 g και το χρονικό διάστημα της δειγματοληψίας ήταν ίσο με 1 s. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε μία κάμερα CCD προς την κατεύθυνση του ανέμου για να καταγραφούν οι στιγμιαίες μεταβολές στις φλόγες.



Εικόνα 5.8 Διαδικασία δυαδοποίησης (binarization process) σε φωτεινές φλόγες [22].

Για την λήψη εικόνων σε μία οιονεί στατική κατάσταση χρησιμοποιήθηκε η συσκευή KMplayer. Η διάρκεια της λήψης των εικόνων ήταν 10 s. Κατά την διάρκεια αυτή λήφθηκαν 300 συνεχείς εικόνες για κάθε δοκιμή. Κάθε εικόνα επεξεργάστηκε με ένα δυαδικό πρόγραμμα (binarization program) προκειμένου να γίνει ασπρόμαυρη. Το δυαδικό πρόγραμμα βασίστηκε στις τιμές της γκριζας κλίμακας για κάθε εικονίδιο προκειμένου να προκύψει η δυαδική εικόνα (bizarization image) της φωτεινής φλόγας. Στην Εικόνα 5.8 παρουσιάζονται παραδείγματα από τις δυαδικές εικόνες της φλόγας.



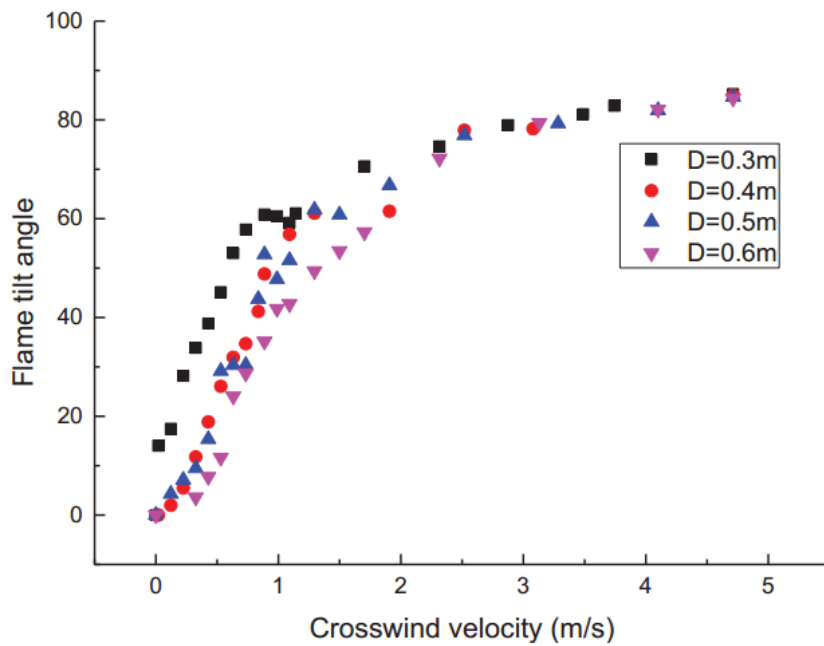
Εικόνα 5.9 Η εικόνα του ισοδιαλείποντος περιγράμματος (iso-intermittency contour) της φλόγας και της γωνίας κλίσης της φλόγας παρουσία της αντίστασης του αέρα κατά την πειραματική μελέτη των Ping Jiang και Shou-xiang Lu [22].

Από το σύνολο των 300 δυαδικών εικόνων προέκυψε το ισοδιαλείπον περίγραμμα (iso-intermittency contour), όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.9. Η γωνία που θα προσδιοριστεί παρακάτω, αναφέρεται στην γωνία του κύριου όγκου του πλουμίου [22].

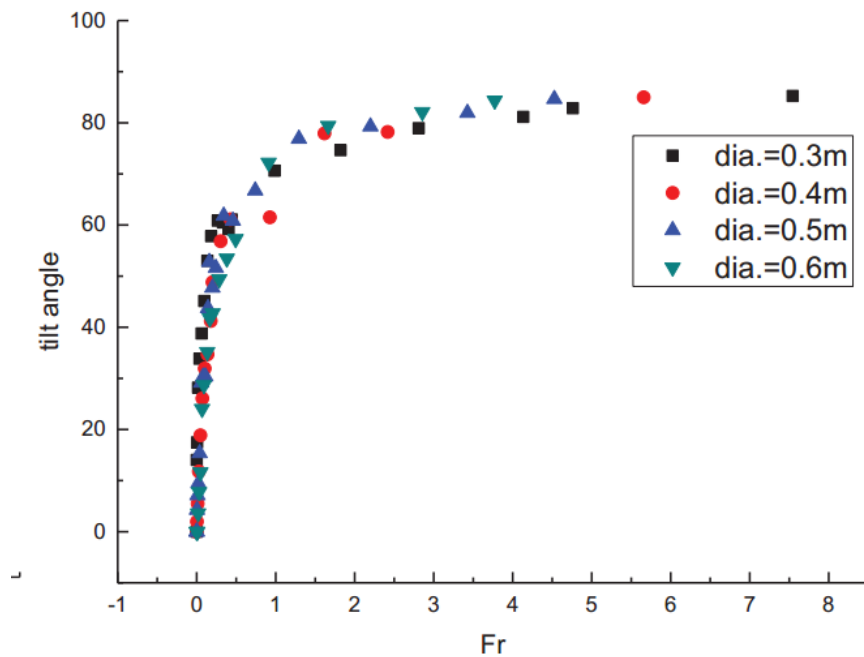
Πίνακας 5.1 Αποτελέσματα της μελέτης των Ping Jiang και Shou-xiang Lu [22] για την γωνία κλίσης της φλόγας υπό διάφορες τιμές της ταχύτητας του ανέμου και της διαμέτρου της πειραματικής λεκάνης όπου ήταν τοποθετημένο το καύσιμο.

D (m)	u (m/s)	Fr	θ (μοίρες)
0.3	0.33	0.04	33.8
0.4	0.53	0.07	29.1
0.5	0.53	0.06	26.1
0.6	0.53	0.05	11.6
0.3	1.1	0.40	59.2
0.4	1.3	0.43	61.1
0.5	1.9	0.74	66.7
0.6	1.5	0.38	53.5
0.3	4.7	7.55	85.2
0.4	4.7	5.66	85.0
0.5	4.7	4.53	84.6
0.6	4.7	3.78	84.4

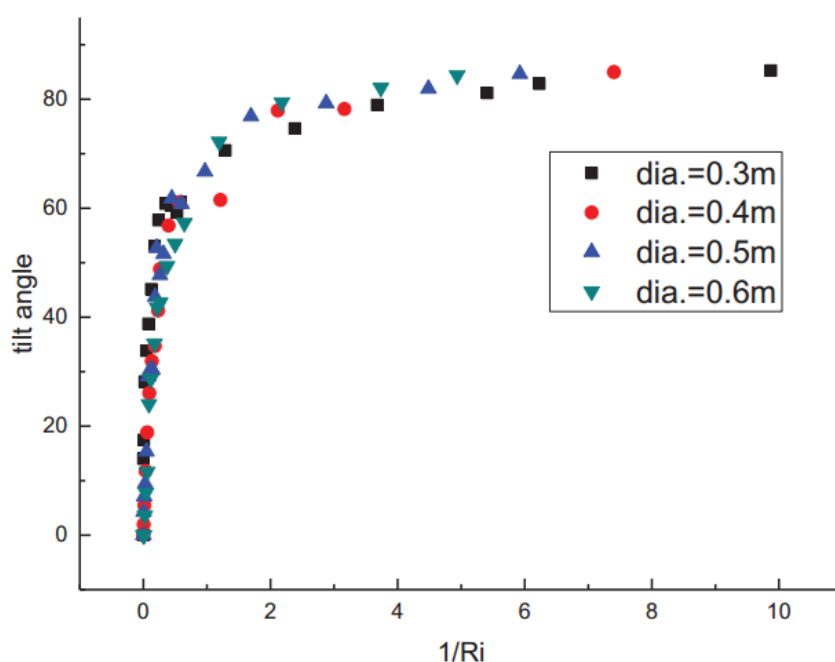
Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης των Ping Jiang και Shou-xiang Lu [22] για τις μεταβολές των γωνιών κλίσης της φλόγας συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου και της διαμέτρου της πειραματικής λεκάνης όπου ήταν τοποθετημένο το καύσιμο. Για διάφορες τιμές της διαμέτρου της πειραματικής λεκάνης και για χαμηλές ταχύτητες πλαγίου ανέμου παρατηρήθηκε σημαντική μείωση της γωνίας κλίσης της φλόγας, ενώ οι τιμές του αριθμού Fr δεν μεταβάλλονταν σημαντικά. Καθώς η ταχύτητα του ανέμου άρχισε να αυξάνεται και οι τιμές των διαμέτρων μεταβάλλονταν παρατηρήθηκε πως η γωνία κλίσης της φλόγας μεταβαλλόταν λιγότερο, ενώ ο αριθμός Fr παρουσίαζε έντονες διακυμάνσεις. Τέλος, για δεδομένη τιμή της ταχύτητας του ανέμου παρατηρήθηκε ελάχιστη μεταβολή της γωνίας κλίσης της φλόγας με αύξηση της διαμέτρου της πειραματικής λεκάνης. Συγκεκριμένα, η γωνία κλίσης της φλόγας μειωνόταν σταδιακά, καθώς αυξανόταν η διάμετρος της πειραματικής λεκάνης. Ο αριθμός Fr σε αυτήν την περίπτωση παρουσίαζε εμφανή μείωση, καθώς η διάμετρος της πειραματικής λεκάνης αυξανόταν. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται και στα παρακάτω διαγράμματα.



Διάγραμμα 5.1 Πειραματικά αποτελέσματα της μελέτης των Ping Jiang και Shou-xiang Lu [22] για τις γωνίες της φλόγας συναρτήσει των διαφορετικών ταχυτήτων του πλαγίου ανέμου.



Διάγραμμα 5.2 Πειραματικά αποτελέσματα της μελέτης των Ping Jiang και Shou-xiang Lu [22] για τις γωνίες της φλόγας συναρτήσει του αριθμού Fr.



Διάγραμμα 5.3 Πειραματικά αποτελέσματα της μελέτης των Ping Jiang και Shou-xiang Lu [22] για τις γωνίες της φλόγας συναρτήσει του Ri^{-1} .

Από τα πειραματικά δεδομένα της μελέτης των Ping Jiang και Shou-xiang Lu [22] που αναλύθηκαν παραπάνω, προκύπτει ότι τα Διαγράμματα (5.1), (5.2), και (5.3) προσεγγίζουν την λογαριθμική κατανομή. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι οι μεταβολές στις χαμηλές τιμές της ταχύτητας του ανέμου επιδρούσαν σημαντικά στην γωνία της φλόγας. Ωστόσο, οι μεταβολές στις διαμέτρους της πειραματικής λεκάνης όπου ήταν τοποθετημένο το καύσιμο είχαν μικρότερη επίδραση στις μεταβολές της γωνίας κλίσης της φλόγας. Συγκεκριμένα, η γωνία κλίσης της φλόγας αυξανόταν με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου και με την μείωση της διαμέτρου της πειραματική λεκάνης. Η διάμετρος της πειραματικής λεκάνης δεν επιδρούσε σημαντικά στην γωνία κλίσης της φλόγας για μεγάλες τιμές της ταχύτητας του πλεγίου ανέμου.

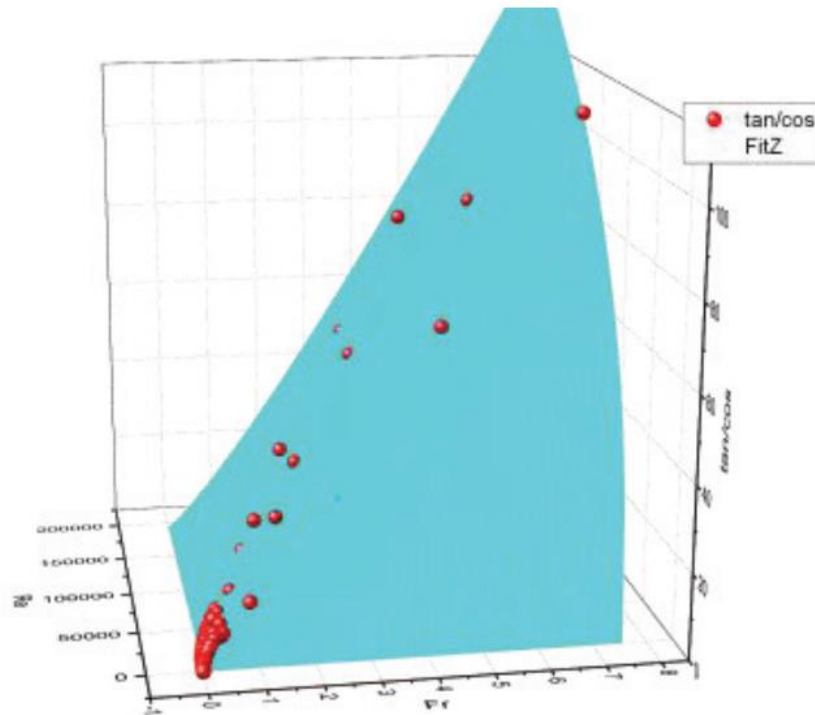
Με βάση τα παραπάνω κρίνεται αναγκαίο να μελετηθεί εκτενώς η μεταβολή της γωνίας κλίσης της φλόγας υπό διάφορες τιμές της ταχύτητας του πλευρικού



ανέμου. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης συνοψίζονται στον Πίνακα 5.2 και στο Διάγραμμα 5.4.

Πίνακας 5.2 Αποτελέσματα της πειραματική μελέτης των Ping Jiang και Shou-xiang Lu [22] για τη γωνία κλίσης της φλόγας υπό διάφορες τιμές ταχυτήτων του πλευρικού ανέμου.

Περιοχές	Γωνία κλίσης της φλόγας	Fr	Ri	Μορφές διαγραμμάτων	Αναφορά
Rapid increasing region	0°-55°	0-0.301	0-0.398	Σχεδόν γραμμική αύξηση της καμπύλης του διαγράμματος με απότομη κλίση	[22]
Transition region	55°-77°	0.301-1.685	0.398-2.227	Η καμπύλη σχηματίζει ένα τόξο	[22]
Incremental region	Αργή αύξηση	Αυξάνονται σταδιακά	Αυξάνονται σταδιακά	Η καμπύλη είναι σχεδόν σταθερή	[22]



Διάγραμμα 5.4 Διάγραμμα του λόγου $\tan\theta/\cos\theta$, του αριθμού Re και του αριθμού Fr που προέκυψαν από την μελέτη των Ping Jiang και Shou-xiang Lu [22].

Από το Διάγραμμα 5.4 προκύπτουν τρεις περιοχές για τη γωνία κλίσης της φλόγας καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του πλευρικού ανέμου. Η πρώτη περιοχή είναι η περιοχή ταχείας αύξησης (rapid increasing region) της γωνίας κλίσης της φλόγας. Σε αυτήν την περιοχή οι γωνίες κλίσης της φλόγας μεταβάλλονται από μηδέν έως 55° , ο αριθμός Fr παίρνει τιμές στο εύρος των 0-0.301 και ο αριθμός Re παίρνει τιμές στο εύρος 0-0.398. Η αύξηση των γωνιών κλίσης της φλόγας είναι σχεδόν γραμμική με αύξηση των αριθμών Froude ή Richardson. Οι αυξανόμενες καμπύλες των διαγραμμάτων είναι πολύ απότομες, γεγονός που αποδεικνύει ότι οι γωνίες κλίσης των φλογών είναι πολύ ευαίσθητες στην μεταβολή των αριθμών Froude και Richardson. Επομένως, η κλίση της καμπύλης του διαγράμματος είναι πολύ σημαντική για την ακριβή πρόβλεψη της γωνίας κλίσης της φλόγας.

Η δεύτερη περιοχή του διαγράμματος είναι η μεταβατική περιοχή (transition region) όπου οι γωνίες των φλογών μεταβάλλονται από 55° έως 77°, ο αριθμός Froude παίρνει τιμές στο εύρος των 0.301-1.685 και ο αριθμός Ri παίρνει τιμές στο εύρος των 0.398-2.227. Σε αυτήν την περιοχή οι καμπύλες σχηματίζουν ένα τόξο. Στην συνέχεια, οι τιμές των γωνιών κλίσης των φλογών αρχίζουν να αυξάνονται πολύ αργά με αύξηση των αριθμών Froude ή Richardson. Αυτή η τελευταία περιοχή είναι η τρίτη σταδιακή περιοχή (incremental region) [22].

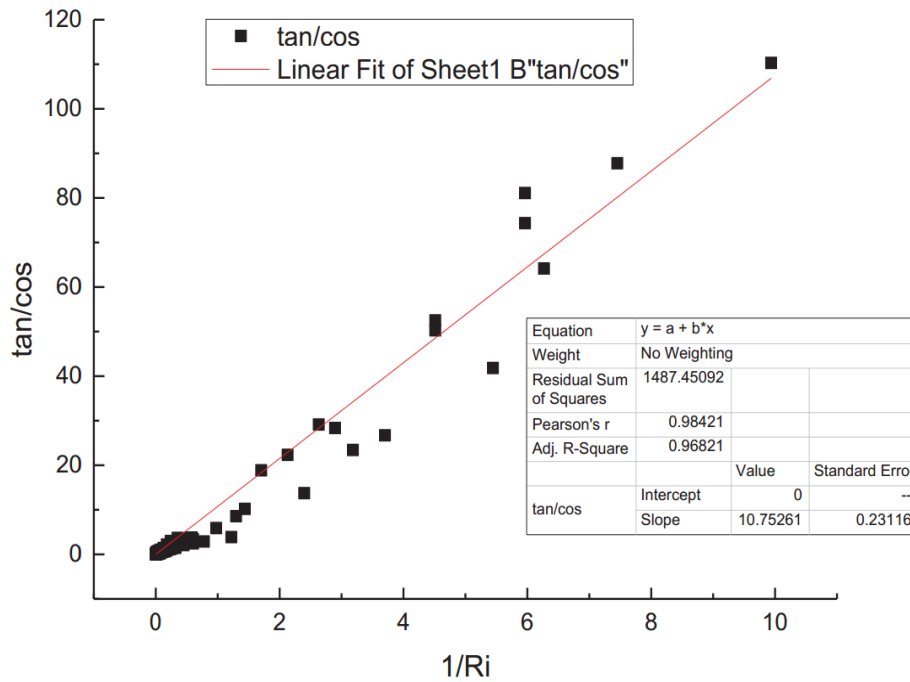
Επιπλέον, κατά την μελέτη των Ping Jiang και Shou-xiang Lu [22] προσδιορίστηκαν οι σταθερές κάποιων εξισώσεων την βιβλιογραφίας που αναφέθηκαν παραπάνω. Τέλος, μέσα από την μελέτη αυτήν προέκυψε ένα συμπέρασμα για την εξίσωση που περιγράφει καλύτερα την μεταβολή της γωνίας κλίσης της φλόγας παρουσία πλευρικού ανέμου.

- ❖ Η πρώτη συσχέτιση μελετήθηκε είναι αυτή του τύπου (5.4). Τα αποτελέσματα αυτής της συσχέτισης εμφανίζονται στα Διαγράμματα (5.5) και (5.6) και στον Πίνακα 5.3.

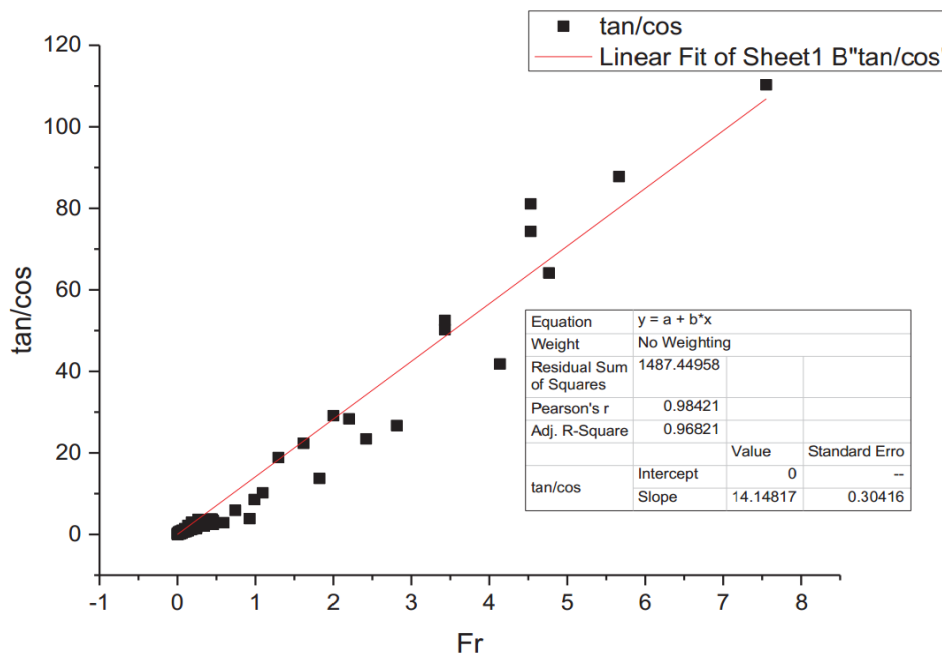
$$\frac{\tan \theta}{\cos \theta} = c' Fr^{d'} Re^{e'} = 0.1317 Fr^{1.15948} Re^{0.38181} \quad (5.24)$$

Πίνακας 5.3 Παράμετροι για την Εξίσωση (5.24) που προέκυψαν από διάφορες πειραματικές μελέτες [22].

Ερευνητής	c'	d'	e'	Αναφορά
Moorhouse	1.9	0.339	0.05	[40]
Johnson	0.7	0.428	0.109	[76]
Pritchard and Binding	0.666	0.333	0.117	[77]
Rew and Hulbert	3.13	0.431		[78]
Ping Jiang and Shou-xiang Lu	0.1317	1.15948	0.38181	[22]



Διάγραμμα 5.5 Γραφική παράσταση του λόγου $\tan\theta/\cos\theta$ συναρτήσει του $1/Ri$ [22].

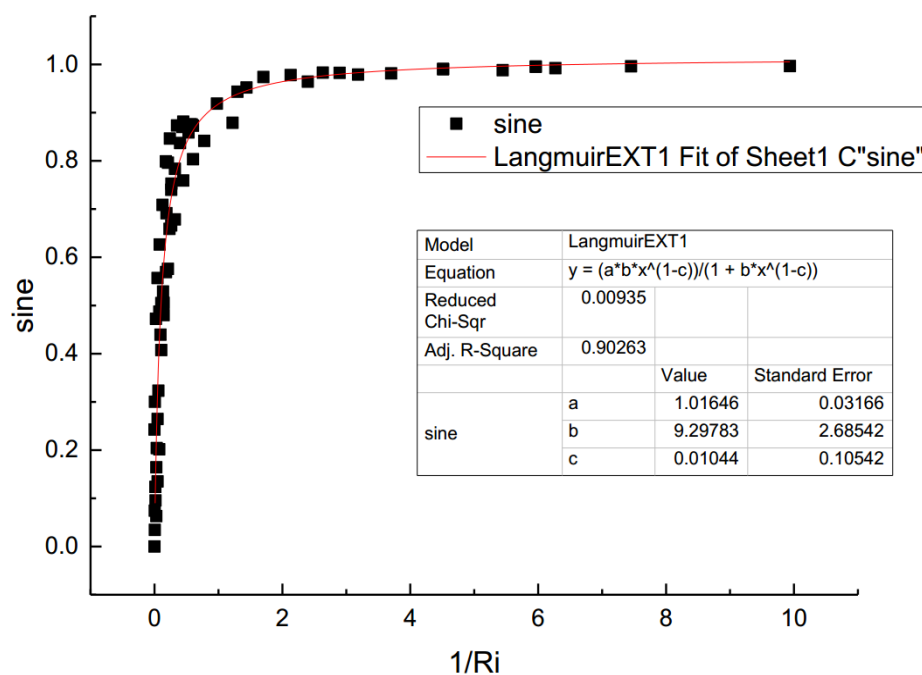


Διάγραμμα 5.6 Γραφική παράσταση του λόγου $\tan\theta/\cos\theta$ συναρτήσει του αριθμού Fr [22].

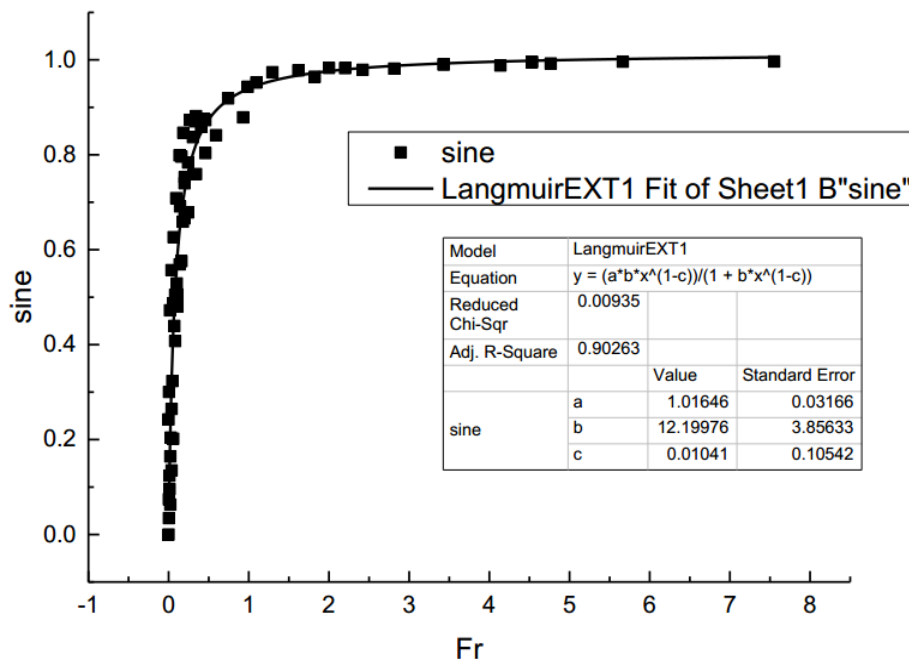
- ❖ Η δεύτερη συσχέτιση που μελετήθηκε από τους Ping Jiang και Shou-xiang Lu [22] είναι αυτή του τύπου (5.21). Τα αποτελέσματα αυτής της συσχέτισης εμφανίζονται στα Διαγράμματα (5.7) και (5.8).

$$\frac{\tan \theta}{\cos \theta} = \frac{2C_f}{\pi} Ri^{-1} = 10.7526 Ri^{-1} \quad (5.25)$$

Επομένως, η μέση τιμή της αδιάστατης σταθεράς C_f για την φλόγα είναι 16.89.



Διάγραμμα 5.7 Γραφική παράσταση του $\sin\theta$ συναρτήσει του $1/Ri$ [22].

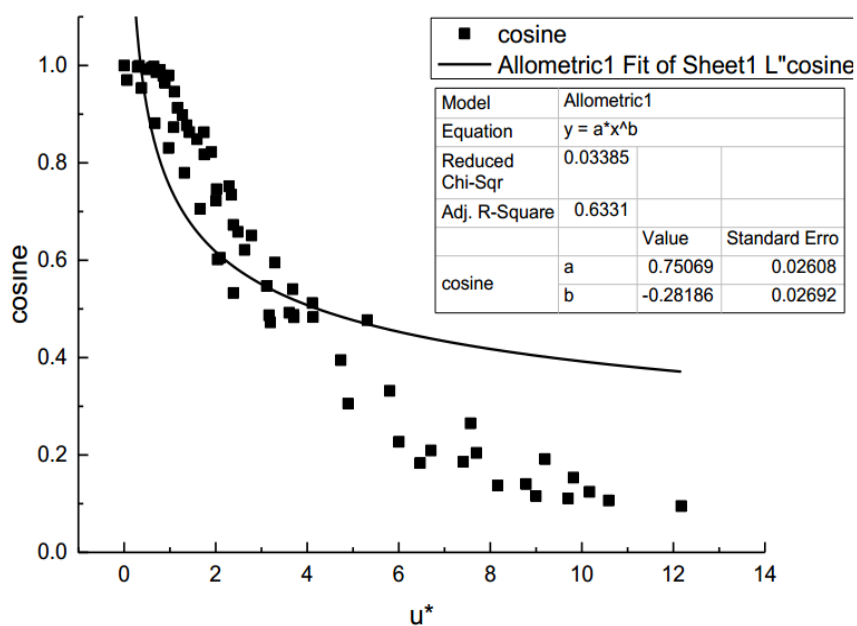


Διάγραμμα 5.8 Γραφική παράσταση του $\sin\theta$ συναρτήσει του αριθμού Fr [22].

- ❖ Η τρίτη συσχέτιση που προέκυψε από τα πειραματικά αποτελέσματα των Ping Jiang και Shou-xiang Lu [22] είναι η παρακάτω. Τα αποτελέσματα αυτής της συσχέτισης εμφανίζονται στο Διάγραμμα 5.9.

$$\sin \theta = \frac{9.45 \left(\frac{1}{Fr}\right)^{0.9896}}{1 + 9.3 \left(\frac{1}{Fr}\right)^{0.9896}} \quad (5.26)$$

$$\sin \theta = \frac{12.4 Fr^{0.9896}}{1 + 12.2 Fr^{0.9896}} \quad (5.27)$$



Διάγραμμα 5.9 Γραφική παράσταση του $\cos\theta$ συναρτήσει του u^* [22].

- ❖ Ο τέταρτος τύπος που συσχετίστηκε με τα πειραματικά δεδομένα ήταν ο τύπος (5.2):

$$\cos\theta = \alpha'(u^*)^{b'} = 0.75(u^*)^{-0.28} \quad (5.28)$$

Πίνακας 5.4 Παράμετροι για την Εξίσωση (5.28) που προέκυψαν από διάφορες πειραματικές μελέτες [22].

Ερευνητής	a'	b'	Πεδίο εφαρμογής	Αναφορά
M. Munoz	0.96	-0.26	Μεγάλες πυρκαγιές σε δεξαμενές βενζίνης και πετρελαίου	[72]
AGA	1	-0.50	Πυρκαγιές σε δεξαμενές LNG	[65]
Thomas	0.7	-0.49	Πυρκαγιές σε ξύλινες κούνιες	[79]
Moorhouse	0.86	-0.25	Κυλινδρικές φλόγες	[40]
Ping Jiang and Shou-xiang Lu	0.75069	-0.28186	Πυρκαγιές σε δεξαμενές με καύσιμα αεροπορίας	[22]

Σύμφωνα με το R^2 οι Εξισώσεις (5.24) και (5.25) εμφανίζουν την καλύτερη συσχέτιση με τα πειραματικά δεδομένα.

5.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Πίνακας 5.5 Σύγκριση των εξισώσεων της βιβλιογραφίας.

Ερευνητές	Εξίσωση	Πεδίο εφαρμογής	Έτος	Αναφορά
Walker, Sliepcevic και Emori, Saito	$\frac{\tan \theta}{\cos \theta} = \frac{2C_f u_w^2}{\pi D \left(\frac{\rho_a - \rho_f}{\rho_a} \right) g}$ (5.1)	Μικρής κλίμακας πυρκαγιές	2013	[70], [71]
Munoz	$\cos \theta = \alpha' (u^*)^{b'}$, $u^* \geq 1$ (5.2) $\cos \theta = 1$, $u^* < 1$ (5.3)	Υψηλές ταχύτητες ανέμου, χωρίς ικανοποιητικά αποτελέσματα	2011	[72]
Munoz	$\frac{\tan \theta}{\cos \theta} = c' Fr^{d'} Re^{e'}$ (5.4)	Χαμηλές ταχύτητες ανέμου, χωρίς ικανοποιητικά αποτελέσματα	2011	[72]
J. A. Fay	$\sin \theta = \frac{Fr}{Fr + 0.19}$ (5.5)	Μεγάλη διασπορά αποτελεσμάτων, χωρίς αποτελέσματα για μικρές ταχύτητες ανέμου	1998	[73]
Walker και Sliepcevic, Pipkin και Sliepcevic	$\frac{\tan \theta}{\cos \theta} = \frac{2C_f u^2}{\pi \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_a} \right) g D}$ (5.6) $\tan \theta = \frac{2C_f u^2}{\pi \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_a} \right) g D}$ (5.7)	Εμφανίζουν γενική ισχύ	1966 , 1964	[70], [74]
Pipkin και Sliepcevic	$\tan \theta = 0.721 \left(\frac{u^2}{gD} \right)^{0.553}$ (5.12)	Εμφανίζει γενική ισχύ	1964	[74]
Yumoto	$\tan \theta = \left(\frac{u^2}{gD} \right)^{0.38}$ (5.13)	Δεξαμενές με μεγάλες διαμέτρους	1971	[75]
Thomas	$\cos \theta = 0.7 \frac{u}{\left(\frac{gD}{\rho_a} \right)^{1/3}}$ (5.14)	Φλόγες σε πυρκαγιά βενζίνης	1965	[53]
Ataliah και Raj	$\frac{\tan \theta}{\cos \theta} = 3.8 \left(\frac{u^2}{gD} \right)^{0.8}$ (5.15) $\cos \theta = \frac{1}{\sqrt{u^*}}$, $u^* > 1$ (5.16)	Φλόγες σε πυρκαγιά από ξύλινες κούνιες	1974	[56]

Με βάση τα αποτελέσματα της παραπάνω έρευνας για τις εξισώσεις υπολογισμού της γωνίας κλίσης της φλόγας κατά την πάροδο των ετών άγεται το συμπέρασμα πως οι ερευνητές Walker, Sliepcevick [70], Pirkin [74] και διάφοροι συνεργάτες τους ασχολήθηκαν εκτενώς με τον υπολογισμό της ταχύτητας της φλόγας μέσα από εξισώσεις. Τα αποτελέσματα όλων των ερευνών με την αντίστοιχη χρονολογική σειρά συνοψίζονται στον Πίνακα 5.5. Οι εξισώσεις που εμφανίζουν εκτεταμένη ισχύ και περιγράφουν ικανοποιητικά την γωνία κλίσης της φλόγας συναρτήσει της μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου είναι οι (5.1), (5.4), (5.6) και (5.7). Οι εξισώσεις αυτές είναι παρόμοιες, γεγονός που αποδεικνύει πως οι μελέτες κατά την πάροδο των χρόνων κατέληξαν σε παρόμοια συμπεράσματα.

Πίνακας 5.6 Σύγκριση πειραματικών μελετών.

Ερευνητές	Καύσιμο	D (m)	u(m/s)	Fr	θ (μοίρες)	Έτος	Αναφορά
Ping Jiang και Shou-xiang Lu	Καύσιμο αεροπορίας	0.3-0.6	0.33-0.53	0.04-0.07	11.6-33.8	2016	[22]
Ping Jiang και Shou-xiang Lu	Καύσιμο αεροπορίας	0.3-0.6	1.1-1.9	0.38-0.74	53.5-66.7	2016	[22]
Ping Jiang και Shou-xiang Lu	Καύσιμο αεροπορίας	0.3-0.6	4.7	3.78-7.55	84.4-85.2	2016	[22]
E. Lois και J. Swithenbank	Μεθανόλη και εξάνιο	1	2.5	Υψηλές τιμές	80°	1981	[57]
E. Lois και J. Swithenbank	Μεθανόλη και εξάνιο	1	>2.5	Υψηλές τιμές	90°	1981	[57]

Επιπλέον, συγκρίνοντας τα πειραματικά αποτελέσματα των μελετών που αναπτύχθηκαν προέκυψε ένα γενικό συμπέρασμα για τις μεταβολές των γωνιών κλίσης της φλόγας συναρτήσει των μεταβολών της ταχύτητας του ανέμου. Η σύγκριση αυτή έγινε με βάση τα δεδομένα του Πίνακα 5.6. Από τα δεδομένα αυτά



προέκυψε ότι οι γωνίες κλίσης των φλογών δεν επηρεάζονται σημαντικά από το μέγεθος της πειραματικής λεκάνης στην οποία γίνεται η καύση. Η μεγαλύτερη επίδραση στις γωνίας των φλογών προκύπτει από την μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου. Η γωνία κλίσης της φλόγας αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου και με μείωση της διαμέτρου της πειραματικής λεκάνης. Για μικρές τιμές της ταχύτητας του ανέμου οι γωνίες κλίσης των φλογών εμφανίζουν μικρές τιμές. Ωστόσο, η ελάχιστη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου στο εύρος των χαμηλών τιμών των ταχυτήτων του ανέμου μπορεί να επιφέρει σημαντικές μεταβολές στην γωνία κλίσης της φλόγας. Για μεγαλύτερες τιμές της ταχύτητας του ανέμου προέκυψε πως η γωνία κλίσης της φλόγας αυξάνεται σημαντικά, ενώ η διάμετρος της πειραματικής λεκάνης δεν εμφανίζει σημαντική επίδραση. Συγκεκριμένα, εάν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί την τιμή των περίπου 5 m/s, τότε η γωνία κλίσης της φλόγας είναι περίπου 90° και η φλόγα είναι οριζόντια. Τα αποτελέσματα αυτά εμφανίστηκαν τόσο στην πειραματική μελέτη που χρησιμοποιήθηκε ως καύσιμο η μεθανόλη και το εξάνιο όσο και στην πειραματική μελέτη που χρησιμοποιήθηκε καύσιμο αεροπορίας. Επομένως, προέκυψε το γενικό συμπέρασμα πως η γωνία κλίσης της φλόγας είναι ανεξάρτητη από τον τύπο του καυσίμου, επηρεάζεται από την διάμετρο της πειραματικής λεκάνης όπου λαμβάνει χώρα η πυρκαγιά και εξαρτάται σημαντικά από την ταχύτητα του πλαγίου ανέμου.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

D: η διάμετρος της πειραματικής λεκάνης όπου τοποθετήθηκε το καύσιμο

θ : η γωνία κλίσης της φλόγας με την κατακόρυφη διεύθυνση

u_w : η ταχύτητα του πλαγίου ανέμου

n: η συχνότητα του ανεμιστήρα

g: η επιτάχυνση της βαρύτητας

C_f : σταθερά



ρ_a : η πυκνότητα του αέρα

T_a : η θερμοκρασία του αέρα

ρ_f : η πυκνότητα του αερίου της φλόγας

a' : σταθερά

b' : σταθερά

c' : σταθερά

d' : σταθερά

e' : σταθερά

Fr: ο αριθμός Froude

Re: ο αριθμός Reynolds

Ri: ο αριθμός Richardson

u^* : η αδιάστατη ταχύτητα του ανέμου, όπως ορίστηκε και στο Κεφάλαιο 4

β : σταθερά

F_B : η δύναμη της άνωσης

ρ : η πυκνότητα

d_v : τμήμα του όγκου

F_I : η δύναμη της αδράνειας

L: το χαρακτηριστικό μήκος

T_f : η θερμοκρασία του αερίου της φλόγας



6. ΚΕΦΑΛΑΙΟ-ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΠΝΟΥ ΣΕ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΥΓΡΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παραγωγή αιθάλης από το πλουμίο των πυρκαγιών είναι ιδιαίτερα περίπλοκο θέμα. Αυτό συμβαίνει διότι εξαρτάται από πολλές παραμέτρους όπως είναι ο διαφορετικός σχηματισμός αιθάλης στο χώρο και οι διεργασίες οξειδωσης, η επίδραση των τυρβωδών διακυμάνσεων της φλόγας, της θερμοκρασίας και της χημικής δομής των καυσίμων. Παρόλα αυτά έχουν γίνει σημαντικά βήματα για τον προσδιορισμό αυτών των παραμέτρων με στόχο την απλοποίηση της ανάλυσης. Οι διάφορες μελέτες παρέχουν γενικευμένες σχέσεις για τα κύρια σωματίδια των αερίων και της αιθάλης. Έχει παρατηρηθεί πως η αιθάλη στις περιοχές του πλουμίου πάνω από την φωτιά (περιοχή με περίσσεια αέρα) διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του καυσίμου αλλά είναι σχετικά ανεξάρτητη από την θέση της στο πλουμίο, ενώ πάνω από ένα συγκεκριμένο χρόνο παραμονής στην φλόγα η απόδοσή της φτάνει μία ασυμπτωτική τιμή και στην συνέχεια εξαρτάται μόνο από τα επίπεδα ανάμιξης. Στην περιοχή κοντά στη λεκάνη του υγρού καυσίμου (περιοχή με περίσσεια καυσίμου), υπάρχουν ισχυρές συσχετίσεις ανάμεσα στα κλάσματα όγκου της αιθάλης και την θερμοκρασία. Στην περιοχή αυτή η αιθάλη είναι σημαντικά περιορισμένη σε μία στενή περιοχή του μίγματος με αποτέλεσμα υπάρχουν στρώματα αιθάλης με σχεδόν σταθερή θερμοκρασία. Επιπλέον, παρόλη την δυσκολία συσχετισμού των αποδόσεων της αιθάλης με το κλάσμα του μίγματος, έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες για την πρόβλεψη των αποδόσεων της αιθάλης με την χρήση κινητικών μοντέλων. Το πιο πρόσφατο μοντέλο, για παράδειγμα, αποτελείται από πολλά βήματα και περιλαμβάνει την πυρήνωση (nucleation), την πήξη (coagulation) και διαδικασίες αύξησης της επιφάνειας με την χρήση διαφόρων αναπαραστάσεων φλογών προκειμένου να γίνει ο προσδιορισμός της επίδρασης των μεταβολών της κατάστασης του μίγματος σε καθένα από αυτά τα στάδια (για αρκετούς υδρογονάνθρακες). Αυτή η προσέγγιση ξεπερνά τους περιορισμούς που



παρουσιάζονται κατά τον προσδιορισμό της απόδοσης της αιθάλης με την χρήση του κλάσματος του μίγματος, αλλά παραμένουν ορισμένα προσεγγιστικά προβλήματα λόγω των τυρβωδών αλληλεπιδράσεων. Για παράδειγμα, υπολογισμοί της ακτινοβολίας βασίζονται τυπικά στις μέσες ιδιότητες της αιθάλης, με αποτέλεσμα οι φασματικές εντάσεις να εμφανίζουν τιμές μεγαλύτερες κατά 40-100 % από τις εκτιμώμενες τιμές που προκύπτουν από τις μέσες ιδιότητες της αιθάλης [83].

Η ανάλυση που θα γίνει στο κεφάλαιο αυτό θα βασιστεί στον προσδιορισμό των βασικών χαρακτηριστικών της αιθάλης και των αποδόσεων του καπνού, αλλά και στην κατανόηση του μηχανισμού παραγωγής της αιθάλης που παράγεται από την καύση διαφόρων καυσίμων προκειμένου να προκύψουν βασικά συμπεράσματα για την παραγωγή καπνού σε δεξαμενές υγρών καυσίμων.

6.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΠΝΟΥ ΣΕ ΜΕΓΑΛΕΣ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ

Πρώτα από όλα είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί με ακρίβεια το περιεχόμενο του προσδιορισμού <<μεγάλες>> πυρκαγιές. Οι όροι <<μεγάλες>> και <<μικρές>> πυρκαγιές εισήχθησαν αρχικά προκειμένου να γίνει μία διάκριση ανάμεσα στις πυρκαγιές που κυριαρχεί η ακτινοβολία και στις πυρκαγιές που κυριαρχεί η συναγωγή ως μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας αντίστοιχα. Ωστόσο, ο όρος <<μεγάλες πυρκαγιές σε δεξαμενές>> έχει και ένα άλλο νόημα στην βιβλιογραφία, καθώς αναφέρεται στις πυρκαγιές που προκύπτουν από πηγές με πολύ μεγάλο μέγεθος, για παράδειγμα πυρκαγιές που προκαλούνται σε δεξαμενές αποθήκευσης υγρών καυσίμων με διάμετρο ενδεχομένως ίση με 10-100 m. Πιο συγκεκριμένα, αυτές οι πυρκαγιές θεωρούνται όσες έχουν οπτικά μεγάλο πάχος, δηλαδή συχνά προκύπτουν από μία δεξαμενή με διάμετρο 3 m ή και μεγαλύτερη [83].

Τέτοιου είδους <<μεγάλες>> πυρκαγιές σε δεξαμενές, σε αντιδιαστολή με τις γενικές πυρκαγιές σε δεξαμενές, έχουν γίνει αντικείμενο μελετών για πολλά χρόνια. Ωστόσο, η κατανόηση των διαφορετικών διεργασιών που εμπλέκονται δεν έχει ακόμα φτάσει σε ικανοποιητικό επίπεδο. Οι κύριες προσπάθειες που έχουν γίνει



μέχρι σήμερα μπορούν να χωριστούν σε πειραματικές και μοντελοποίησης, και οι δύο κατηγορίες είναι βασικές για την περαιτέρω πρόοδο του πεδίου [83].

Αρχικά, λαμβάνοντας υπόψιν τις θεμελιώδεις αρχές της ροής των ρευστών σε πυρκαγιές μεγάλης κλίμακας, προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι αριθμοί Froude ($Fr=V/\sqrt{gD}$) τείνουν να φτάσουν σε πολύ χαμηλές τιμές, δεδομένου ότι η φλόγα θα αποκτήσει περίπου σταθερές ταχύτητες, ενώ η διάμετρος της φλόγας, D , συνεχίσει να αυξάνεται. Επιπλέον, ένα βασικό χαρακτηριστικό των μεγάλων πυρκαγιών σε δεξαμενές είναι μια σχετικά χαμηλή αρχική ταχύτητα του εξατμιζόμενου καυσίμου, καθώς αφήνει την επιφάνεια του καυσίμου. Αυτή η χαμηλή ταχύτητα, σε συνδυασμό με τις επιπτώσεις της πλευστότητας και του χαμηλού αριθμού Reynolds, εμφανίζει έναν αριθμό θεωρητικών και πειραματικών δυσκολιών. Αυτές οι δυσκολίες είναι εγγενείς με την συμπεριφορά της πυρκαγιάς, καθώς καθορίζουν την αλληλεπίδραση μεταξύ του καυσίμου και του οξειδωτικού, την παραγωγή της αιθάλης και την ανατροφοδότηση θερμότητας στο καύσιμο.

Η κατανόηση της συμπεριφορά της πυρκαγιάς στο εγγύς πεδίο της είναι ιδιαίτερα ουσιώδης. Ο βασικός μηχανισμός παράσυρσης στο εγγύς πεδίο τη πυρκαγιάς είναι η κατακόρυφη παράσυρση. Τα φαινομενολογικά μοντέλα παράσυρσης βασίζονται σε μεγάλης κλίμακας δυναμικές δίνες, και απαιτούνται ως βασικά για την μελέτη της κλιμάκωσης των δεδομένων στο εγγύς πεδίο της φλόγας. Με βάση τα παραπάνω, λοιπόν, προκύπτει πως η μοντελοποίηση είναι ιδιαίτερα σημαντική σε αυτό το πεδίο, γι'αυτό το λόγο απαιτείται η συνεχής ανάπτυξη των μοντέλων LES (LES models, Large Eddy Simulation models), τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω. Τέλος, το φαινόμενο του παλμού (pulsation phenomenon) στο πλουμίο της φωτιάς συνδέεται στενά με τα φαινόμενα που εμφανίζονται στο εγγύς πεδίο της φωτιάς. Συγκεκριμένα, η αστάθεια του φαινομένου του παλμού (pulsation phenomenon) οδηγεί σε περιοδική ταλάντωση, λόγω της μεταβαλλόμενης πυκνότητας στην περιοχή όπου η ροή διακόπτεται πάνω από την πηγή του καυσίμου. Ωστόσο, ο Joulaïn [84] σχολίασε πως ο μηχανισμός που εμπλέκεται στην αστάθεια δεν έχει γίνει ακόμα απολύτως κατανοητός, και τόνισε τον σημαντικό ρόλο που μπορούν να έχουν οι μετρήσεις της Ροομετρίας Απεικόνισης Σωματιδίων (PIV, Particle Imaging Velocimetry) σε πυρκαγιές μεγάλης κλίμακας για την κατανόηση των



φαινομένων που λαμβάνουν χώρα. Τα πειραματικά αποτελέσματα και τα αποτελέσματα των μοντελοποιήσεων έχουν αποδείξει πως υπάρχει ιδιαίτερη επιτάχυνση των φαινομένων της πυρκαγιάς κατά μήκος του άξονα του πλουμίου και εντός της διαμέτρου της φλόγας. Ο σχηματισμός της δακτυλοειδούς δομής της δίνης εμφανίζεται σε κάποιο ύψος γύρω από την διάμετρο της φλόγας, δηλαδή σε ένα σημείο όπου η ταχύτητα της ροής της φλόγας γίνεται ίση με μηδέν [83].

Σε πρόσφατη έρευνα για τις μεγάλες πυρκαγιές δεξαμενών [85] εντοπίστηκε μία αύξηση της παραγωγής της αιθάλης, η οποία θεωρήθηκε ο κύριος παράγοντας καθορισμού της συμπεριφοράς των πυρκαγιών μεγάλης κλίμακας. Στις πυρκαγιές αυτές, η αιθάλη παράγεται σε μεγάλες ποσότητες σε χαμηλότερο σημείο στο πλουμίο της καύσης. Σε αντίθεση με τις μικρότερες πυρκαγιές, όπου αναπτύσσεται σχεδόν τέλεια καύση και η αιθάλη παράγεται μόνο από την άκρη της φλόγας, καθώς η διάμετρος της φλόγας αυξάνεται. Επομένως, στις πυρκαγιές μεγάλης κλίμακας απαιτείται η διαίρεση της περιοχής του πυρήνα της πυρκαγιάς σε δύο περιοχές:

1. Η φωτεινή ζώνη της φλόγας που βρίσκεται ακριβώς πάνω από την επιφάνεια της δεξαμενής, και
2. Τα ανώτερα τμήματα του πλουμίου, όπου ο καπνός σκιάζει τις φλόγες.

Οι αποδόσεις της αιθάλης έχει παρατηρηθεί πως αυξάνονται με αύξηση της διαμέτρου της φλόγας, φτάνοντας σε σχεδόν σταθερές τιμές (0,15 κλάσμα μάζας) για διαμέτρους φλογών πάνω από 2-3 m. Παρόλες τις εκτεταμένες μελέτες για την μοντελοποίηση της αιθάλης, χρειάζονται ακόμα πολλές προσπάθειες για τον αξιόπιστο χαρακτηρισμό των αποδόσεων του καπνού σε πυρκαγιές μεγάλης κλίμακας [83].

6.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ ΣΕ ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ

Για πολλά χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα για τις πυρκαγιές σε δεξαμενές. Αυτά διαφέρουν από τα πολύ απλά μοντέλα για συγκεκριμένες διεργασίες, μέχρι και τις πολύ σύνθετες προσομοιώσεις με πολλά υπομοντέλα που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη διαφορετικών πτυχών της συμπεριφοράς της



πυρκαγιάς. Η επιλογή του μοντέλου για μία συγκεκριμένη εκδοχή εξαρτάται από την εκδοχή, τα εξαγόμενα αποτελέσματα που απαιτούνται και την επιθυμητή ακρίβεια της πρόβλεψης. Τα τρέχοντα μοντέλα έχουν προσαρμοστεί καλά σε αποτελέσματα ευρείας κλίμακας συμπεριλαμβανομένων των χαρακτηριστικών του πλουμίου, της διασποράς των προϊόντων καύσης και της μεταφοράς θερμότητας στα γειτονικά αντικείμενα (αυτό χρησιμοποιείται συχνά ως απαιτούμενο αποτέλεσμα για την ανάλυση ρίσκου), κ.λ.π.

Παρόλες τις προόδους που έχουν γίνει στην τεχνολογία των ηλεκτρονικών υπολογιστών τα τελευταία χρόνια, απαιτείται ένας συμβιβασμός ανάμεσα στην επιθυμητή πολυπλοκότητα (ανάλυση του μοντέλου, αριθμός των υπομοντέλων, κ.λ.π.) και στον υπολογιστικό χρόνο που απαιτείται για τις προσομοιώσεις. Τα σύγχρονα μοντέλα περιορίζονται ακόμα από την έλλειψη της λεπτομερούς γνώσης των διαδικασιών που συμβαίνουν μέσα στις φλόγες μίας πυρκαγιάς, δηλαδή του σχηματισμού της αιθάλης, και της χημείας/ακτινοβολίας των τυρβωδών αλληλεπιδράσεων. Ωστόσο, τα σύγχρονα μοντέλα είναι ικανά να προσομοιώσουν τις πυρκαγιές σε δεξαμενές με επαρκή ακρίβεια ώστε να παρέχουν χρήσιμα αποτελέσματα. Παρακάτω γίνεται αναφορά σε μοντέλα που έχουν δημιουργηθεί για την πρόβλεψη σχηματισμού αιθάλης από πυρκαγιές δεξαμενών [83].

Τα μοντέλα LES (LES models, Large Eddy Simulation models) δίνουν την δυνατότητα για ρεαλιστική απεικόνιση των πυρκαγιών λαμβάνοντας υπόψιν την λεπτομερή συμπεριφορά του πλουμίου της πυρκαγιάς. Συγκεκριμένα, η μεταβατική φύση των μοντέλων LES δίνει την δυνατότητα για την λεπτομερή μοντελοποίηση των φαινομένων της παράσυρσης. Η μοντελοποίηση της παράσυρσης είναι εξαρτώμενη του χρόνου και θεωρείται πολύ σημαντική για τις διαφορετικές εκδοχές των πυρκαγιών, καθώς ο χρόνος είναι εξαιρετικά περιορισμένος και οι συνθήκες αλλάζουν σημαντικά. Ωστόσο, η μοντελοποίηση LES, όπως και οι περισσότερες μοντελοποιήσεις, δεν λαμβάνει υπόψιν τις λεπτομέρειες της πυρκαγιάς, καθώς χρησιμοποιεί μία μέση τιμή. Αν και η μοντελοποίηση LES φαίνεται να είναι μία υποσχόμενη τεχνική, υπάρχουν ακόμα πολλοί περιορισμοί για την ακριβή εφαρμογή της σε μεγάλες πυρκαγιές δεξαμενών.



Οι μέθοδοι State-of-the-art (State-of-the-art methods) αναβαθμίστηκαν από την ομάδα CSAFE στο Utah [86], στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση των πυρκαγιών σε δεξαμενές με την χρήση πολλών παραλλήλων ηλεκτρονικών υπολογιστών. Ως πρότυπη πυρκαγιά χρησιμοποιήθηκε μία πυρκαγιά σε μία δεξαμενή επτανίου ύψους 20 m, υποδεικνύοντας την χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών υψηλής απόδοσης για την ενσωμάτωση φαινομένων ευρείας κλίμακας. Επιπλέον, οι κινητικές μέθοδοι Monte Carlo (Kinetic Monte Carlo methods) συνδιάστηκαν με την Μοριακή Δυναμική (Molecular Dynamics) για να υπολογιστεί η χημική ανάπτυξη της δομής της αιθάλης. Στα πλαίσια των μεθόδων State-of-the-art, η προσομοίωση LES συνδυάστηκε με την μέθοδο ILDM (Intrinsic Lower Dimensional Manifolds) για να μειωθούν οι βαθμοί ελευθερίας του συστήματος και να μελετηθεί ο λεπτομερής μηχανισμός σχηματισμού αιθάλης. Τα αρχικά δεδομένα του κλάσματος όγκου της αιθάλης έδειξαν ότι η αιθάλη σχηματίζεται καθόλη την έκταση της φλόγας και σε ζώνες μετά τη φλόγα, όπως άλλωστε παρατηρείται και στις πραγματικές πυρκαγιές σε δεξαμενές. Επιπλέον, μελετήθηκε και η ευαισθησία της μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία στο μηχανισμό παραγωγής αιθάλης στις πυρκαγιές μεγάλης κλίμακας. Οι προσομοιώσεις αναπαρήγαγαν πολλά χαρακτηριστικά των πυρκαγιών μεγάλης κλίμακας έτσι φαίνεται να λαμβάνουν παγκόσμια χαρακτηριστικά για τις πυρκαγιές μεγάλης κλίμακας σε δεξαμενές. Παρά την πολυπλοκότητα των προσομοιώσεων και το τεράστιο υπολογιστικό κόστος, εξακολουθούν να υπάρχουν πολλά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία και την παραγωγή σωματιδίων που δεν μπορούν να αναπαραχθούν. Ωστόσο, συνεχίζεται η εκτεταμένη έρευνα για την μοντελοποίηση των πυρκαγιών σε δεξαμενές [83].

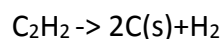


6.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΙΘΑΛΗΣ

6.4.1 ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ / ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΗΣ ΑΙΘΑΛΗΣ

Η ακριβής πρόβλεψη του σχηματισμού της αιθάλης σε στρωτές και τυβώδεις φλόγες είναι δύσκολη. Ωστόσο, ιδιαίτερα για τις φλόγες διάχυσης, παρουσιάζεται μεγάλο ενδιαφέρον, καθώς οι εφαρμογές τους έχουν μεγάλο εύρος. Συγκεκριμένα, ο όρος φλόγες διάχυσης, όπως αναλύθηκε και στο κεφάλαιο 1, αναφέρεται σε φωτεινές φλόγες με σημαντική εκπομπή αιθάλης, η οποία σχηματίζει στρώματα καπνού όταν η φλόγα εφάπτεται σε επιφάνειες που αναπτύσσονται χαμηλές θερμοκρασίες. Αντιθέτως, οι προανεμιγμένες φλόγες είναι σχετικά καθαρές και δίνουν εντονότερη καύση σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Ο όρος φλόγα διάχυσης είναι ταυτόσημος με τον όρο μη προανεμιγμένη φλόγα [87].

Ο σχηματισμός της αιθάλης συνοδεύεται από συστήματα πολυαρωματικών και πολυακετυλενικών δακτυλίων. Τα αρχικά σωματίδια της αιθάλης, ενδεχομένως να είναι υγρά ή και όχι, ενώ εμφανίζουν πολύ γρήγορη ανάπτυξη μάζας μέσω ακτινοβολίας και/ή αντιδράσεων ιόντων. Ο σχηματισμός των αρχικών σωματιδίων της αιθάλης κατά τη διεργασία σχηματισμού της είναι ελάχιστα κατανοητός, παρόλα αυτά υπάρχουν ορισμένες αποδείξεις ότι το ακετυλένιο (C_2H_2) επηρεάζει σημαντικά την γρήγορη ανάπτυξη της αρχικής φάσης. Μελέτες σε μίγματα υδρογονανθράκων έχουν δείξει ότι η αποτελεσματική θερμοκρασία ενεργοποίησης (E/R) έχει συσχετιστεί με την διαδικασία πρόωρου σχηματισμού της αιθάλης, που είναι μικρότερη από αυτή που συσχετίζεται με την πυρόλυση των καυσίμων και παίρνει τιμές στο εύρος 15,000-25,000 K για διαφορετικές πιέσεις. Παρακάτω γίνεται η υπόθεση πως οι ενεργοί πυρήνες που σχηματίζονται από τα προϊόντα της πυρόλυσης προκύπτουν από την διάσπαση του καυσίμου. Επιπλέον, τα αρχικά σωματίδια γι' αυτήν την διεργασία είναι σωματίδια ακετυλενίου. Αυτές οι υποθέσεις είναι αποδεκτές ως μία πρώτη προσέγγιση για την τοποθεσία στη δομή της φλόγας όπου σχηματίζονται οι πυρήνες της αιθάλης. Έτσι, προκύπτει:





Στην προκειμένη περίπτωση, ωστόσο, το ακετυλένιο προκύπτει ως προϊόν από την διεργασία διάσπασης του καυσίμου και όχι ως αντιδρόν της διεργασίας αυτής. Ο συμβολισμός C(s) δεν είναι σωστός, καθώς η αιθάλη που σχηματίζεται αρχικά περιέχει σημαντικές ποσότητες υδρογόνου. Ωστόσο, έχει υιοθετηθεί αυτός ο συμβολισμός, καθώς δεν υπάρχει ένας γενικά αποδεκτός συμβολισμός [88].

ΔΥΣΚΟΛΙΕΣ ΣΤΟΝ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟ ΤΟΥ ΣΤΑΘΕΡΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΠΥΡΗΝΩΝ

Ο καθορισμός του κατάλληλου σταθερού ρυθμού της αντίδρασης για το στάδιο της πυρήνωσης (nucleation step) της αιθάλης εμφανίζει δυσκολίες. Αρχικά, πρέπει να προσδιοριστεί με ακρίβεια η σχετικά υψηλή ενέργεια ενεργοποίησης της διεργασίας που σχετίζεται με τον σχηματισμό των αρχικών σωματιδίων της αιθάλης. Στην συνέχεια, οι διαθέσιμες μετρήσεις υποδεικνύουν ότι η τάση για αντίδραση των νέων σωματιδίων, που μόλις σχηματίστηκαν, είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την τάση για αντίδραση των παλαιότερων σωματιδίων της αρχικής επιφάνειας (the reactive of the initial surface). Συγκεκριμένα, τα νέα σωματίδια εμφανίζουν μεγαλύτερη τάση για αντίδραση ακόμα και κατά μία τάξη μεγέθους. Για το λόγο αυτό, μπορούν να εξαχθούν εξισώσεις για την περιγραφή της γήρανσης των σωματιδίων της αιθάλης (the aging of soot particles) ή την εξάντληση των ενεργών τους θέσεων. Ωστόσο, αυτό αυξάνει την πολυπλοκότητα και την αβεβαιότητα του μοντέλου και, κατά συνέπεια, προτιμάται μία διαφορετική προσέγγιση. Έτσι, γίνεται η υπόθεση πως ο αρχικός σχηματισμός των σωματιδίων της αιθάλης κυριαρχείται από το σχηματισμό των νέων σωματιδίων και την αύξηση της επιφάνειάς τους. Στην συνέχεια, υιοθετείται μία απλή διαδικασία υπολογισμού της ηλικίας των σωματιδίων κατά την διαδικασία ανάπτυξης της επιφάνειας. Επιπλέον, οι μετρήσεις αποδεικνύουν ότι η αύξηση της αρχικής επιφάνειας μπορεί σε κάθε περίπτωση να αφορά την τοπική συγκέντρωση του ακετυλενίου. Το μοντέλο διαμορφώνεται έτσι ώστε να αντανακλά στην πειραματική παρατήρηση κατά την οποία λιγότερο από 10% της συνολικής μάζας της αιθάλης σχηματίζεται με τον σχηματισμό των νέων σωματιδίων. Ωστόσο, πρέπει να τονιστεί πως το στάδιο πυρήνωσης της αντίδρασης είναι ζωτικής σημασίας καθώς καθορίζει την αρχική επιφάνεια (ή τις ενεργές θέσεις)



που διατίθεται για την ανάπτυξη των σωματιδίων και την πυκνότητα της αρχικής αιθάλης. Το στάδιο πυρήνωσης της αντίδρασης μπορεί να υπολογιστεί με την παραδοχή ότι τα σωματίδια σχηματίζονται με ένα ελάχιστο μέγεθος. Έχει υποτεθεί ότι αυτό το ελάχιστο μέγεθος αντιστοιχεί σε 100 άτομα άνθρακα, δίνοντας ένα μέγεθος σωματιδίου περίπου 1.24 nm. Τα τελικά αποτελέσματα είναι ανεξάρτητα από το υποτιθέμενο μέγεθος των νέων σωματιδίων, εφόσον αυτό παραμένει στο εύρος 1-10 nm [88].

ΣΤΑΔΙΟ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΠΥΡΗΝΩΝ

Η τιμή της θερμοκρασίας ενεργοποίησης που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τόσο τον σχηματισμό των αρχικών σωματιδίων όσο και την ανάπτυξη της αρχικής επιφάνειάς τους είναι περίπου 21,100 K. Η τιμή αυτή είναι κοντά στην συνολική θερμοκρασία ενεργοποίησης που δίνεται για τη διαδικασία σχηματισμού αιθάλης. Έτσι, ο σταθερός ρυθμός σχηματισμού πυρήνων μπορεί στην προκειμένη περίπτωση να γραφτεί ως,

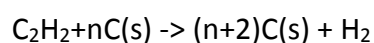
$$R_1 = k_1(T) [C_2H_2] \text{ [kmol/m}^3\text{/s]} \quad (6.1)$$

$$k_1(T) = 0.1 * 10^5 * e^{-21,100/T} \text{ [1/s]} \quad (6.2)$$

Ο εκθετικός παράγοντας προσδιορίστηκε από την καύση της φλόγας του C_2H_4 με ένα οξειδωτικό ρεύμα αποτελούμενο από 22% O_2 και 78% N_2 (δείκτης οξυγόνου 0.22) [88].

ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΑΙΘΑΛΗΣ

Για την επόμενη αντίδραση που είναι υπεύθυνη για τον σχηματισμό της αιθάλης γίνεται η υπόθεση ότι η επιφανειακή ανάπτυξη της αιθάλης οφείλεται στην προσρόφηση του C_2H_2 στην επιφάνεια των σωματιδίων. Αυτό μπορεί να περιγραφεί από την σχέση:



Οι Harris και Weiner [89], με βάση εκτεταμένες μετρήσεις, παρατήρησαν ότι η ανάπτυξη της μάζας της αιθάλης είναι πρώτης τάξεως ως προς την συγκέντρωση



του ακετυλενίου. Υιοθετώντας αυτήν την προσέγγιση, η μοντελοποίηση του σταδίου ανάπτυξης της επιφάνειας της αιθάλης δίνει ρυθμό αντίδρασης που περιγράφεται από την Εξίσωση (6.3).

$$R_2 = k_2(T) * f(S) * [C_2H_2] \quad (6.3)$$

όπου οι μοριακές συγκεντρώσεις, για παράδειγμα, $[C_2H_2]$, δίνονται σε μονάδες kmol/m^3 μίγματος. S είναι η συνολική επιφάνεια της αιθάλης σε μονάδες m^2/m^3 μίγματος. Η συνολική επιφάνεια της αιθάλης μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση:

$$S = \pi * (d_p^2) * (\rho N) = \pi * \left(\frac{6}{\pi} * \frac{1}{\rho_{C(s)}} * \frac{Y_{C(s)}}{N} \right)^{2/3} * (\rho N) \quad (6.4)$$

και η διάμετρος των σωματιδίων της αιθάλης από την σχέση:

$$d_p = \left(\frac{6}{\pi} * \frac{1}{\rho_{C(s)}} * \frac{Y_{C(s)}}{N} \right)^{1/3} \quad (6.5)$$

Από τους υπολογισμούς προέκυψε πως η υπόθεση ότι η ανάπτυξη της συνολικής επιφάνειας της αιθάλης εμφανίζει γραμμική εξάρτηση από την επιφάνεια των σωματιδίων της αιθάλης δεν αντιπροσωπεύει με ακρίβεια τις αλλαγές των συνθηκών σε όλη την έκταση της φλόγας. Το αποτέλεσμα μίας τέτοιας προσέγγισης θα είναι υπερβολικό συγκριτικά με την πραγματική επιρροή της επιφάνειας των σωματιδίων της αιθάλης επί της διαδικασίας σχηματισμού της. Αυτό έρχεται σε συμφωνία με πρόσφατες μελέτες μόνο για τις προανεμιγμένες φλόγες. Έτσι παραμένει αναγκαίο να ληφθεί υπόψιν, με κάποιον προσεγγιστικό τρόπο, η μείωση της τάσης για αντίδραση των σωματιδίων της αιθάλης λόγω της επίδρασης της γήρανσής τους σε όλη την έκταση της φλόγας. Επομένως, γίνεται η απλή υπόθεση ότι ο αριθμός των ενεργών θέσεων που υπάρχουν σε τοπικό επίπεδο στη φλόγα είναι ανάλογος προς την τετραγωνική ρίζα του συνολικού εμβαδού της επιφανείας που διατίθενται σε τοπικό επίπεδο στη φλόγα. Αυτό μειώνει επαρκώς την εξάρτηση από την επιφάνεια και δημιουργεί την ακόλουθη έκφραση του ρυθμού:

$$R_2 = k_2(T) * [C_2H_2] * \sqrt{\pi * \left(\frac{6 * M_{C(s)}}{\pi * \rho_{C(s)}} \right)^{1/3} * [C(s)]^{1/3} * [\rho N]^{1/3}} \quad (6.6)$$



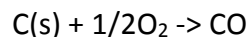
όπου $[C(s)]$ είναι $[\rho_{C(s)}/M_{C(s)}]$, N [σωματίδια/kg μείγματος], Y_k το κλάσμα μάζας των ειδών k , και M η μοριακή μάζα του στοιχείου σε kg/kmol, για παράδειγμα, $M_{C(s)} = 12.011$.

Στην συνέχεια, πρέπει να προσδιοριστεί η σταθερά ρυθμού $k_2(T)$. Για την ενέργεια ενεργοποίησης έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μετρήσεις από τις οποίες έχει προσδιοριστεί μία τιμή θερμοκρασίας ενεργοποίησης (E/R) περίπου ίση με 12,100 K. Έχει γίνει μεγάλος αριθμός υπολογισμών με την χρήση αυτής της τιμής, από όπου προέκυψε πως η τιμή αυτή μπορεί να περιγράψει το στάδιο ανάπτυξης της επιφάνειας της αιθάλης με ικανοποιητική ακρίβεια. Όσον αφορά την τιμή του εκθετικού παράγοντα, καθορίστηκε ίση με $0.6 \cdot 10^4$, δίνοντας την τελική τιμή της σταθεράς k_2 για το στάδιο της πυρήνωσης (nucleation step) από τον τύπο:

$$k_2(T) = 0.6 \cdot 10^4 \cdot e^{-12,100/T} \text{ [m}^{3/2}/\text{m αιθάλης/s]} \quad (6.7)$$

ΣΤΑΔΙΟ ΟΞΕΙΔΩΣΗΣ ΤΗΣ ΑΙΘΑΛΗΣ

Το στάδιο της οξείδωσης της αιθάλης βασίζεται στην μελέτη των Lee et al. [90]. Η επιλογή αυτή έγινε επειδή έχει δειχθεί πως η μελέτη αυτή περιέγραψε επαρκώς την οξείδωση της αιθάλης σε φλόγες C_2H_4 -αέρα. Ωστόσο, υπάρχουν σημαντικές αμφιβολίες και γίνονται μελέτες για την δημιουργία μίας πιο λεπτομερούς περιγραφής της οξείδωσης της αιθάλης. Αρχικά, θεωρήθηκε ότι στερεός άνθρακας οξειδώνεται για να σχηματίσει αποκλειστικά μονοξείδιο του άνθρακα σε τυπικές θερμοκρασίες της φλόγας.



Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι κατά τη γεωμετρία αντιρροής (counterflow geometry) η οξείδωση της αιθάλης σχηματίζεται μόνο σε μία πολύ στενή περιοχή κοντά στο μέτωπο της φλόγας. Κατά συνέπεια, οι υποθέσεις που έγιναν δεν επηρεάζουν σημαντικά το στάδιο της οξείδωσης. Αυτή η παρατήρηση αποτελεί ένα θετικό χαρακτηριστικό για την γεωμετρία αντιρροής, διότι επιτρέπει την αναλυτική μελέτη για τη διαμόρφωση του συνολικού μηχανισμού της αντίδρασης οξείδωσης. Κατά συνέπεια, η οξείδωση της αιθάλης περιγράφεται με επαρκή



ακρίβεια από τις ακόλουθες αντιδράσεις, όπου έχει διατηρηθεί η εξάρτηση από την τοπική επιφάνεια (S).

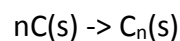
$$R_3 = k_3(T) * S * [O_2] \text{ [kmol/m}^3\text{/s]} \quad (6.8)$$

$$k_3(T) = 0.1 * 10^5 * T^{1/2} * e^{-19.680/T} \text{ [m}^3\text{/m}^2 \text{ αιθάλης/s]} \quad (6.9)$$

Η τιμή αυτού του σταθερού ρυθμού είναι περίπου οκτώ φορές μεγαλύτερη από την τιμή που προτάθηκε από τους Lee, Thring και Beer [90], αλλά βρίσκεται σε συμφωνία με την εκτίμηση από τους Garo et al. [91], οι οποίοι διαπίστωσαν την δράση της ρίζας OH ως οξειδωτικό [88].

ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗ ΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΤΗΣ ΑΙΘΑΛΗΣ

Το στάδιο δημιουργίας των πυρήνων της αιθάλης που περιγράφηκε παραπάνω περιλαμβάνει την αύξηση του ρυθμού της αντίδρασης με αποτέλεσμα την αύξηση της πυκνότητας των σωματιδίων. Ωστόσο, θεωρείται ότι συμβαίνει μείωση της πυκνότητας των σωματιδίων λόγω της συσσωμάτωσής τους. Αυτό το βήμα μοντελοποιείται με την χρήση της μεθόδου του κανονικού τετραγώνου (normal square dependence) που έχει χρησιμοποιηθεί από πολλούς ερευνητές, για παράδειγμα:



$$R_4 = -2 * C_a * d_p^{1/2} * \left(\frac{6 * \kappa * T}{\rho_{C(s)}} \right) * (\rho N)^2 \quad (6.10)$$

Οι ολοκληρωμένες εξισώσεις με το ρυθμό της αντίδρασης μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$R_4 = \frac{2}{C_{min}} * N_A * R_1 - k_4(T) * [C(s)]^{1/6} * [\rho N]^{11/6} \quad (6.11)$$

$$k_4(T) = 2 * C_a \left(\frac{6 * M_{C(s)}}{\pi * \rho_{C(s)}} \right)^{1/6} * \left(\frac{6 * \kappa * T}{\rho_{C(s)}} \right)^{1/2} \quad (6.12)$$

Στην παραπάνω εξίσωση το N_A είναι ο αριθμό Avogadro ($6.022 * 10^{26}$ σωματίδια/kmol), C_{min} είναι ο αριθμός των ατόμων άνθρακα στο νέο σωματίδιο αιθάλης (100), κ είναι η σταθερά Boltzmann ($1,38 * 10^{-23}$ J/K), $\rho_{C(s)}$ είναι η πυκνότητα της αιθάλης (2000 kg/m^3), και C_a είναι η σταθερά του ρυθμού συσσωμάτωσης, στην

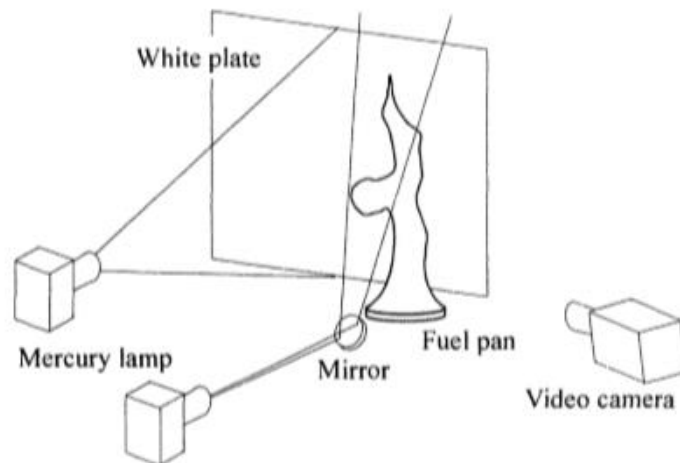


οποία αποδίδεται η τιμή 9.0. Η τιμή αυτή είναι υψηλότερη από αυτή που χρησιμοποιείται από άλλους ερευνητές, που έχουν χρησιμοποιήσει την τιμή 3.

Οι τέσσερις ρυθμοί της αντίδρασης που περιγράφονται παραπάνω κλείνουν το σύστημα για το σχηματισμό/καταστροφή της μάζας της αιθάλης και την πυκνότητα των σωματιδίων της. Μια συνέπεια των παραπάνω είναι ότι η οξείδωση της αιθάλης επιφέρει μείωση του κλάσματος μάζας της αιθάλης και της διαμέτρου των σωματιδίων της, αλλά δεν επιδρά άμεσα στην πυκνότητα των σωματιδίων της. Στην πραγματικότητα, αυτή η απλή περιγραφή είναι φυσικά αμφίβολη. Θεωρείται, ωστόσο, αρκετά ακριβής στα πλαίσια της ανάλυσης που έγινε, καθώς οι παραπάνω εκφράσεις δεν εμφανίζουν ισχυρή συσχέτιση με την πυκνότητα των σωματιδίων της αιθάλης [88].

6.4.2 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ ΣΕ ΦΛΟΓΕΣ

Παραπάνω έγινε μία προσπάθεια για την ανάπτυξη της κινητικής της αντίδρασης παραγωγής αιθάλης σε φλόγες διάχυσης (diffusion flames). Στο συγκεκριμένο τμήμα της μελέτης θα αναλυθεί η επίδραση της αστάθειας σε φλόγες (flickering flames) κατά το σχηματισμό της αιθάλης. Οι ασταθείς φλόγες ενδεχομένως να εμφανιστούν κατά την διάρκεια μίας φλόγας διάχυσης και έχουν ιδιαίτερα μεγάλη επίδραση στην συμπεριφορά μίας πυρκαγιάς, γι' αυτό το λόγο κρίνεται αναγκαίο να μελετηθεί η περιοδική εμφάνισή τους σε πυρκαγιές που εκδηλώνονται σε μεγάλες δεξαμενές. Αν και η κατάσταση αυτή παρατηρείται στις φλόγες μόνο για ένα σύντομο χρονικό διάστημα, φαίνεται να επιδρά σημαντικά στον σχηματισμό της αιθάλης και στις διεργασίες παραγωγής του καπνού. Ωστόσο, έχουν γίνει πολύ περιορισμένες μελέτες για την επίδραση της αστάθειας της φλόγας στην παραγωγή καπνού [92].

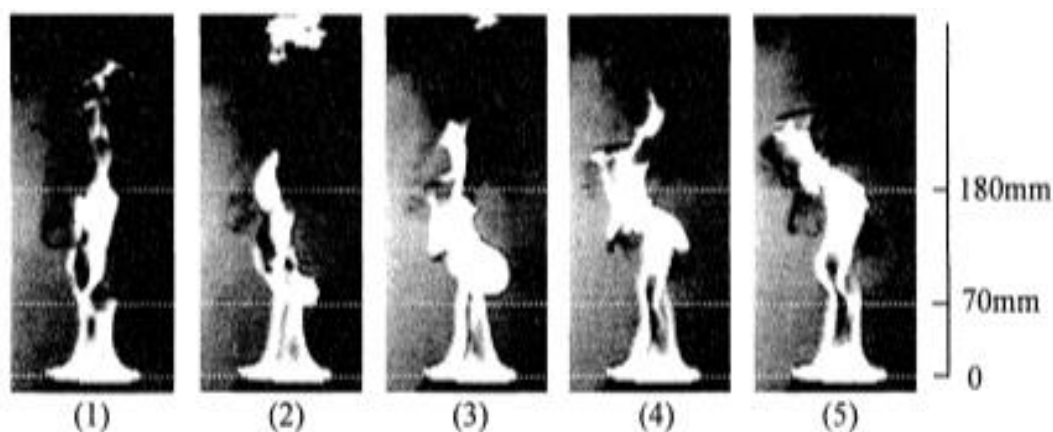


Εικόνα 6.1 Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης των R. Dobashi et al [92].

Οι R. Dobashi et al [92] χρησιμοποίησαν την πειραματική διάταξη που σχηματικά φαίνεται στην Εικόνα 6.1 για να μελετήσουν το φαινόμενο της αστάθειας σε φλόγες. Η πειραματική λεκάνη μέσα στην οποία τοποθετήθηκε το καύσιμο ήταν κατασκευασμένη από ανοξείδωτο ατσάλι με διάμετρο 90 mm και βάθος 15 mm. Το τουλουόλιο χρησιμοποιήθηκε ως καύσιμο, λόγω της ιδιότητάς του να παράγει υψηλό ποσοστό αιθάλης. Στην πειραματική λεκάνη τοποθετήθηκε νερό μέχρι το επίπεδο των 3 mm κάτω από την άκρη του χείλους της. Στην συνέχεια το καύσιμο χύθηκε πάνω από το νερό μέχρι την ακμή του χείλους. Για την παρατήρηση του καπνού, χρησιμοποιήθηκε μία λευκή πλάκα που φωτίστηκε από μία λάμπα υδραργύρου, η οποία ήταν τοποθετημένη πίσω από την πειραματική λεκάνη. Επιπλέον, έγινε η χρήση μίας βιντεοκάμερας υψηλής ταχύτητας για να γίνει η καταγραφή της συμπεριφοράς της φλόγας.

Για την εξέταση του πεδίου ροής, εισήχθησαν ιχνηθετημένα σωματίδια στον ατμοσφαιρικό αέρα και φωτίστηκαν από το φως του λαμπτήρα υδραργύρου. Γι' αυτή την παρατήρηση, χρησιμοποιήθηκε μία βιντεοκάμερα με κανονική ταχύτητα. Οι ιχνηθετημένες πορείες των σωματιδίων κατά τη διάρκεια του χρόνου έκθεσης (16,7 ms) καταγράφηκαν στην εικόνα. Η κατεύθυνση της ιχνηθετημένης πορείας

υποδεικνύει την κατεύθυνση ροής και το μήκος της υποδεικνύει την ταχύτητα της ροής. Τα σωματίδια του ιχνηθέτη ήταν SiO_2 με διάμετρο 30 μm . Η δύναμη της θερμοφόρησης⁵ (thermophoretic force) θα μπορούσε να επιδρά σημαντικά στα μικρά σωματίδια που βρίσκονται κοντά στην περιοχή καύσης όπου υπάρχει μια απότομη μεταβολή της θερμοκρασίας. Με βάση τα μετρήσιμα δεδομένα της θερμοφόρησης, η επαγόμενη ταχύτητα από την δύναμη θερμοφόρησης εκτιμάται να είναι μικρότερη από 2 mm/s. Ως εκ τούτου, η δύναμη της θερμοφόρησης δεν μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στη μέτρηση του πεδίου ροής [92].



Εικόνα 6.2 Μία σειρά εικόνων από το σύνολο των πλουμίων της πυρκαγιάς από την πειραματική μελέτη των των R. Dobashi et al [92]. Χρονικό διάστημα: 32 ms.

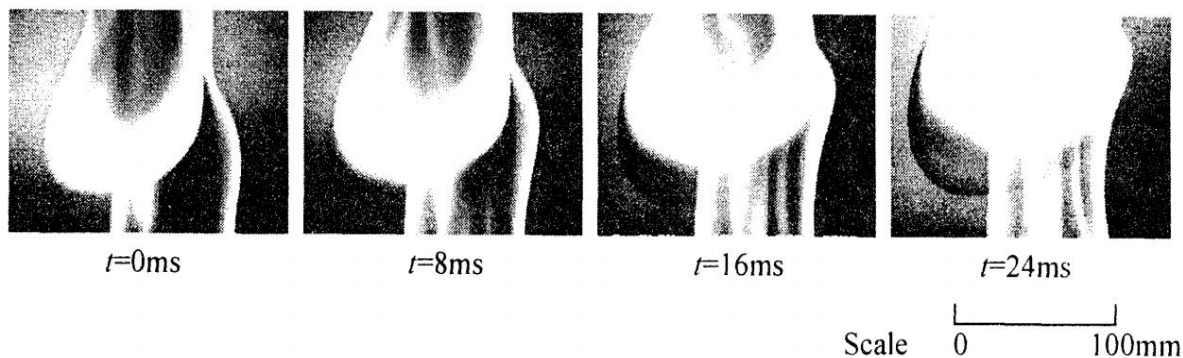
Η Εικόνα 6.2 δείχνει μια σειρά από πέντε εικόνες φωτιάς που λήφθηκαν σε διάστημα 32 ms. Στην ανιούσα διαδρομή της φλόγας από την επιφάνεια του υγρού

⁵ Θερμοφόρηση (ή θερμοδιάχυση, ή φαινόμενο Soret) είναι ένα φαινόμενο που παρατηρείται σε μίγματα κινητών σωματιδίων όπου διαφορετικοί τύποι σωματιδίων εμφανίζουν διαφορετικές αποκρίσεις στη δύναμη μίας θερμοκρασιακής κλίσης. Ο όρος θερμοφόρηση ισχύει συχνότερα για μίγματα αεροζόλ, αλλά μπορεί επίσης συχνά να αναφέρεται στο φαινόμενο σε όλες τις φάσεις της ύλης [115].



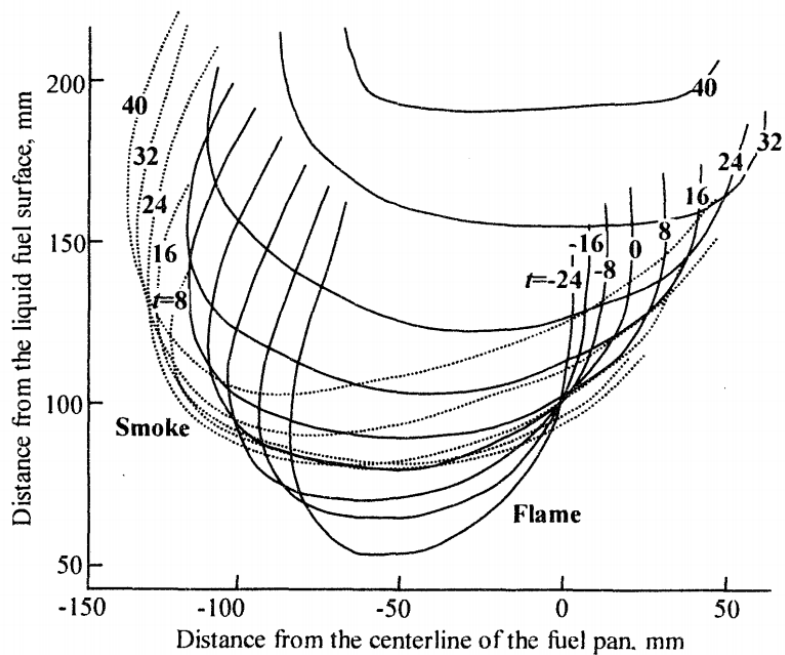
έως ένα σημείο περίπου 60 mm πάνω από αυτό, το σχήμα της φλόγας δεν άλλαξε σημαντικά. Στο σημείο περίπου των 60 mm πάνω από την επιφάνεια του υγρού, το σχήμα φλόγας άλλαξε περιοδικά και αναδύθηκε μία φλόγα με μορφή μανιταριού (mushroom-like flame) (Εικόνα 6.2 (2)). Το μέγεθος της φλόγας με μορφή μανιταριού μειώθηκε, καθώς κινήθηκε προς τα πάνω (Εικόνα 6.2 (3), (4)). Όταν έφθασε σε ύψος περίπου 180 mm επάνω από την επιφάνεια του υγρού, μικρά κομμάτια φλόγας βγήκαν από την κύρια φλόγα (Εικόνα 6.2 (5), (1)). Τα μικρά αυτά κομμάτια κινήθηκαν προς τα πάνω και στη συνέχεια εξαφανίστηκαν. Με βάση αυτές τις παρατηρήσεις, μπορούμε να διαιρέσουμε την φλόγα σε τρεις περιοχές. Η πρώτη περιοχή είναι μεταξύ επιφάνειας του υγρού και ενός σημείου περίπου 60 mm πάνω από αυτήν. Η δεύτερη είναι μεταξύ των 60 mm και των 180 mm πάνω από την επιφάνεια του υγρού. Η τρίτη είναι η περιοχή που περιλαμβάνει ύψη μεγαλύτερα από 180 mm πάνω από την επιφάνεια του υγρού. Αυτές οι περιοχές μπορούν να ονομαστούν η επίμονη περιοχή (persistent region), η διακοπτόμενη περιοχή (intermittent region) και η περιοχή του πλουμίου (plume region).

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.2 εμφανίζεται καπνός κυρίως στην περιοχή του πλουμίου (plume region) και στην διακοπτόμενη περιοχή (intermittent region). Οι περισσότερες μελέτες που έχουν γίνει σχετικά με την παραγωγή του καπνού δεν έχουν επικεντρωθεί στην παραγωγή καπνού στην διακοπτόμενη περιοχή (intermittent region). Για πυρκαγιές μεγάλης κλίμακας η ακτινοβολία από την διακοπτόμενη περιοχή (intermittent region) επηρεάζεται στενά από την παραγωγή καπνού στην περιοχή αυτή. Επομένως, η παραγωγή του καπνού στην διακοπτόμενη περιοχή (intermittent region) είναι σημαντική για την κατανόηση των ιδιοτήτων της ακτινοβολίας που παράγεται από πυρκαγιές μεγάλης κλίμακας σε δεξαμενές.

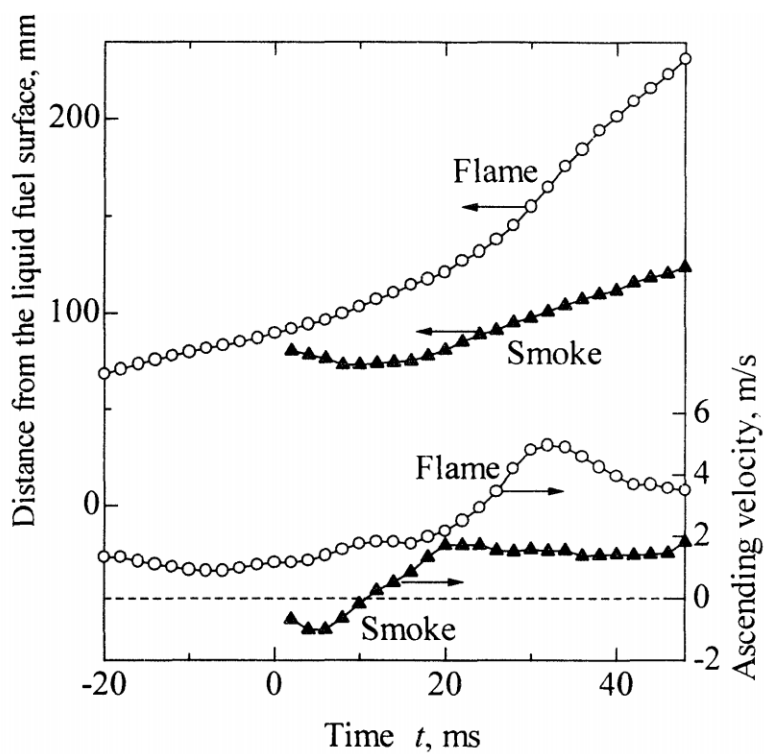


Εικόνα 6.3 Μια σειρά των εικόνων που αντιπροσωπεύουν τη συμπεριφορά μίας φλόγας με σχήμα μανιταριού από την πειραματική μελέτη των R. Dobashi et al [92].

Η Εικόνα 6.3 δείχνει μια σειρά από διευρυμένες εικόνες της διακοπτόμενης περιοχής (intermittent region) της φλόγας σε διάστημα 8 ms. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι εικόνες της φλόγας μεταξύ 50 mm και 170 mm πάνω από την επιφάνεια του υγρού. Στην πρώτη εικόνα (Εικόνα 6.3, $t=0\text{ ms}$) μπορεί να φανεί μία φλόγα με μορφή μανιταριού (mushroom-like flame), ενώ δεν παρατηρείται ο καπνός. Στη δεύτερη εικόνα (Εικόνα 6.3, $t=8\text{ ms}$) η φλόγα με μορφή μανιταριού κινείται προς τα πάνω και ο καπνός εμφανίζεται περίπου στην θέση όπου η φλόγα βρισκόταν στην πρώτη εικόνα. Στην τρίτη εικόνα (Εικόνα 6.3, $t=16\text{ ms}$) η φλόγα συνεχίζει να κινείται προς τα πάνω και ο παραγόμενος καπνός γίνεται πιο πυκνός. Στην τέταρτη εικόνα (Εικόνα 6.3, $t=24\text{ ms}$) τόσο η φλόγα όσο και ο καπνός κινούνται προς τα πάνω. Ο καπνός κινείται πιο αργά από τη φλόγα. Τα περιγράμματα της φλόγας και του καπνού ιχνηθετήθηκαν κάθε 2 ms για να εξεταστεί η συμπεριφορά της φλόγας και του καπνού.



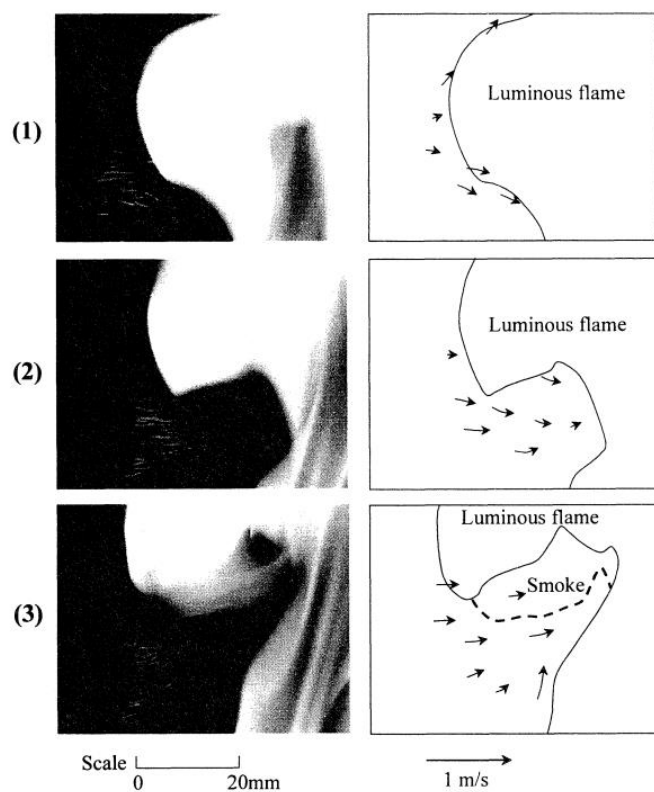
Διάγραμμα 6.1 Περιοδικά ίχνη των περιγραμμάτων της φλόγας και του καπνού από την πειραματική μελέτη των R. Dobashi et al [92].



Διάγραμμα 6.2 Διάγραμμα θέσης-χρόνου της φλόγας και του καπνού από την πειραματική μελέτη των R. Dobashi et al [92].



Το Διάγραμμα 6.1 απεικονίζει τις ιχνηθετημένες γραμμές για τον καπνό και το καύσιμο σε διάφορες θέσεις πάνω από την επιφάνεια του καυσίμου στο εύρος της διακοπτόμενης περιοχής (intermittent region) συναρτήσει της απόστασης από την κεντρική γραμμή της πειραματικής λεκάνης που περιέχει το καύσιμο. Το Διάγραμμα 6.2 απεικονίζει τις ιχνηθετημένες γραμμές για τον καπνό και το καύσιμο σε διάφορες θέσεις πάνω από την επιφάνεια του καυσίμου στο εύρος της διακοπτόμενης περιοχής (intermittent region) συναρτήσει του χρόνου. Οι αύξουσες ταχύτητες της φλόγας και του καπνού υπολογίστηκαν και καταγράφηκαν στο Διάγραμμα 6.2. Από το διάγραμμα αυτό προκύπτει ότι η ανιούσα ταχύτητα της φλόγας μειώνεται από 1.3 m/s (στο $t=-18$ ms) σε 0.9 m/s (στο $t=-8$ ms) και τότε εμφανίζεται καπνός. Μετά την εμφάνιση του καπνού, η ανιούσα ταχύτητα της φλόγας αρχίζει να αυξάνεται και φτάνει μέχρι την τιμή των 5 m/s στα $t=32$ ms. Ο παραγόμενος καπνός μετακινείται αρχικά προς τα κάτω ($t=2-10$ ms), καθώς έχει αρνητική ταχύτητα και στην συνέχεια προς τα πάνω. Η ανιούσα ταχύτητα του καπνού φτάνει την τιμή των 1.7 m/s στα $t=20$ ms και μετά παραμένει σχεδόν σταθερή σε αυτήν την τιμή (1.7 m/s) [92].



Εικόνα 6.4 Μία σειρά από εικόνες των ιχνηθετημένων διαδρομών από τα ιχνηθετημένα σωματίδια από την πειραματική μελέτη των R. Dobashi et al [92]. Χρονικό διάστημα: 16.7 ms, Χρόνος έκθεσης: 16.7 ms.

Με βάση τα παραπάνω, το ποσοστό παραγωγής του καπνού στην διακοπτόμενη περιοχή (intermittent region) βρέθηκε πως συσχετίζεται άμεσα με την κίνηση της φλόγας, δηλαδή το ποσοστό παραγωγής του καπνού επηρεάζεται από τις ιδιότητες της φλόγας. Η λεπτομερής εξέταση του πεδίου ροής κοντά στην φλόγα έγινε από ιχνηθετημένα σωματίδια, τα οποία εισήχθησαν στον ατμοσφαιρικό αέρα. Η Εικόνα 6.4 δείχνει τις διαδρομές που ακολούθησαν τα ιχνηθετημένα σωματίδια. Το διάνυσμα της ταχύτητας ροής του πλουμίου μετρήθηκε από την ιχνηθετημένη διαδρομή η οποία επίσης υποδεικνύεται στην Εικόνα 6.4 (στην δεξιά πλευρά της εικόνας) ως ένα βέλος. Στην Εικόνα 6.4 φαίνονται εικόνες από την πλάγια όψη της φλόγας που έχει την μορφή μανιταριού (mushroom-like flame). Η κεντρική γραμμή της πειραματικής λεκάνης μέσα στην οποία ήταν τοποθετημένο το καύσιμο βρίσκεται στα περίπου 10 mm δεξιά από την δεξιά άκρη των εικόνων της Εικόνας 6.4. Όταν ένα



τμήμα της φλόγας προεξείχε (Εικόνα 6.4 (1)), η ροή του πλουμίου μετακινόταν κατά 0.2-0.3 m/s σχεδόν οριζόντια (και με κλίση ελάχιστα προς τα κάτω) και κάτω από το προεξέχον τμήμα. Στη συνέχεια, καθώς το τμήμα της φλόγας που προεξείχε έπαιρνε την μορφή μανιταριού, η ροή του πλουμίου μετακινόταν κατά 0.2-0.3 m/s σχεδόν οριζόντια και κάτω από την φλόγα με μορφή μανιταριού (mushroom-like flame), αλλά και ελαφρώς προς τα πάνω στην περιοχή κοντά στην κεντρική γραμμή (Εικόνα 6.4 (2), (3)). Ωστόσο, ακόμα και όταν η φλόγα με τη μορφή μανιταριού (mushroom-like flame) αυξανόταν γρήγορα (Εικόνα 6.4 (3)), η ροή του πλουμίου κάτω από την φλόγα μετακινόταν οριζόντια και η κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας ροής του ήταν μικρότερη από 0.1 m/s.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, προκύπτει η ακόλουθη ειδική κατάσταση για τις ασταθείς φλόγες: η ροή του πλουμίου γίνεται σε χαμηλή ταχύτητα 0.2-0.3 m/s και σχεδόν οριζόντια, ακόμα και εάν παράγεται ανιούσα ροή μεγαλύτερη από 1 m/s για το πλουμίο στο κεντρικό τμήμα της φλόγας. Με βάση αυτές τις συνθήκες, τα σωματίδια της αιθάλης παραμένουν στην περιοχή παραγωγής της αιθάλης. Η περιοχή παραγωγής της αιθάλης ενδεχομένως να είναι η πλευρά του καυσίμου στο μέτωπο της φλόγας (fuel-side of the flame front). Επομένως, τα σωματίδια της αιθάλης παραμένουν στην περιοχή αυτή για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, επειδή η ροή του αερίου στην περιοχή αυτή κινείται σχεδόν παράλληλα με το μέτωπο της φλόγας και με σχετικά χαμηλή ταχύτητα. Η κατάσταση αυτή ενισχύει το σχηματισμό της αιθάλης.

Αφότου σχηματιστεί η αιθάλη προκύπτει η παραγωγή καπνού μέσα από την φλόγα (από την περιοχή οξειδωσής της). Η αιθάλη συχνά οξειδώνεται και δεν διαφεύγει μέσα από τη φλόγα. Ωστόσο, πρέπει να γίνει κατανοητός ο μηχανισμός διαφυγής της αιθάλης, γιατί σχετίζεται με τον μηχανισμό παραγωγής καπνού. Στην περίπτωση που αναπτύχθηκε παραπάνω, ο καπνός άρχισε να εμφανίζεται όταν η φλόγα με μορφή μανιταριού άρχισε να αναπτύσσεται γρήγορα. Η ανιούσα ταχύτητα της φλόγας ήταν περίπου 5 m/s, ενώ η κατακόρυφη συνιστώσα της ροής του πλουμίου κοντά στην φλόγα ήταν μικρότερη από 0,1 m/s. Αυτό το αποτέλεσμα υποδεικνύει ότι η ταχεία ανοδική κίνηση της φλόγας δεν προκύπτει από την ανιούσα



ροή του πλουμίου. Δεδομένου ότι μία φλόγα διάχυσης (diffusion flame) δεν μπορεί να κινηθεί με τόσο μεγάλη ταχύτητα χωρίς την εμφάνιση συναγωγής, προκύπτει πως η φλόγα θα σβήσει. Επομένως, η διαδικασία κατάσβεσης της φλόγας θα μπορούσε να προκληθεί λόγω της ταχείας ανιούσας κίνησής της. Επιπλέον, η απώλεια θερμότητας ακτινοβολίας από τον ενισχυμένο σχηματισμό της αιθάλης ενδεχομένως να προκαλέσει την απόσβεση της φλόγας. Αν φλόγα σβήσει, η αιθάλη μπορεί εύκολα να διαφύγει από αυτήν [92].

Η δύναμη της θερμοφόρησης (thermophoretic force) επηρεάζει την κίνηση των σωματιδίων στο πεδίο των μεταβολών της θερμοκρασίας. Σε περιοχές κοντά στη φλόγα όπου υπάρχει μια απότομη μεταβολή της θερμοκρασίας, η δύναμη της θερμοφόρησης (thermophoretic force) μπορεί να επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την διαδικασία παραγωγής καπνού. Η δύναμη θερμοφόρησης για τα σωματίδια του καπνού μπορεί να εκτιμηθεί με βάση τις μετρήσεις της ταχύτητας θερμοφόρησης (thermophoretic velocity) σε συνθήκες μικροβαρύτητας. Σε πειράματα υπό συνθήκες μικροβαρύτητας, τα σωματίδια του πεδίου κινούνται προς περιοχές χαμηλότερων θερμοκρασιών με σχεδόν σταθερή ταχύτητα. Σε αυτήν την ταχύτητα, η δύναμη της θερμοφόρησης και η οπισθέλκουσα είναι ίσες. Η ταχύτητα αυτή ονομάζεται ταχύτητα θερμοφόρησης (thermophoretic velocity).

Με βάση την ανάλυση του Waldmann [93], η δύναμη θερμοφόρησης είναι ανάλογη με τον όρο $\nabla T/T$. Η δύναμη θερμοφόρησης F_T μπορεί να εκφραστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$F_T = -C_T(Kn)v \frac{\nabla T}{T_m} \quad (6.13)$$

όπου C_T είναι μια σταθερά, η οποία εξαρτάται από τις ιδιότητες του σωματιδίου και είναι συνάρτηση του αριθμού Knusen Kn (ο λόγος της μέσης ελεύθερης διαδρομής του περιβάλλοντος αερίου σε ακτίνα σωματιδίων), v είναι το δυναμικό ιξώδες του περιβάλλοντος αερίου, ∇T είναι η κλίση της θερμοκρασίας και T_m είναι η μέση θερμοκρασία στο χώρο γύρω από το σωματίδιο. Η δύναμη θερμοφόρησης ισούται με την οπισθέλκουσα δύναμη όταν η ταχύτητα είναι ίση με την ταχύτητα θερμοφόρησης U_T . Η οπισθέλκουσα δύναμη μπορεί να εκφραστεί από το νόμο του



Stokes, επειδή η διαφορά ταχύτητας μεταξύ του σωματιδίου και του περιβάλλοντος αερίου είναι μικρή και ο αριθμός Reynolds γύρω από το σωματίδιο είναι πολύ μικρός,

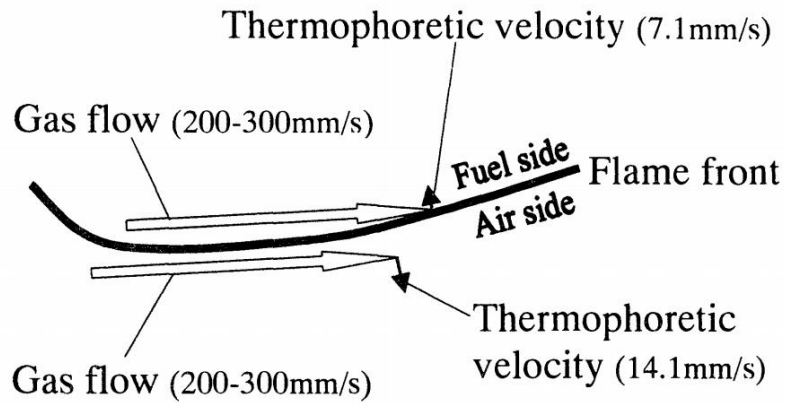
$$F_T = 6\pi\mu r U_T \quad (6.14)$$

όπου μ είναι το ιξώδες του περιβάλλοντος αερίου και r είναι η ακτίνα του σωματιδίου. Επομένως, η ταχύτητα της θερμοφόρησης U_T δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση,

$$U_T = -C_T(Kn) \frac{\nabla T}{6\pi\rho_g r T_m} \quad (6.15)$$

όπου ρ_g είναι η πυκνότητα του περιβάλλοντος αερίου. Τα δεδομένα των πειραματικών μετρήσεων των ταχυτήτων θερμοφόρησης υπό συνθήκες μικροβαρύτητας για σωματίδια άνθρακα με διάμετρο 5 μm και 15 μm δίνονται στον παρακάτω πίνακα. Οι τιμές του C_T γι' αυτά τα σωματίδια έχουν υπολογιστεί και επίσης παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Η διάμετρος των σωματιδίων του καπνού θεωρείται πως είναι περίπου ίση με 80 nm. Η θερμοκρασία κοντά στην περιοχή καύσης θεωρείται ίση με 1,300 K. Η μεταβολή της θερμοκρασίας κοντά στην περιοχή καύσης μπορεί να θεωρηθεί ίση με 200 K/mm στην πλευρά του καυσίμου και ίση με 400 K/mm στην περιοχή του αέρα. Η ταχύτητα θερμοφόρησης των σωματιδίων άνθρακα με διάμετρο ίση με 80 nm εκτιμάται σε αυτές τις συνθήκες με στόχο να γίνει μία πρόβλεψη της επίδρασης του φαινομένου της θερμοφόρησης (thermophoretic phenomenon) στα σωματίδια της αιθάλης και του καπνού. Για την εκτίμηση της τιμής του C_T των σωματιδίων του άνθρακα απαιτείται η τιμή του $Kn=26$, ωστόσο η τιμή αυτή δεν έχει μετρηθεί πειραματικά. Η τιμή του C_T μπορεί να εκτιμηθεί κατά προσέγγιση με την χρήση της παρακάτω εμπειρικής σχέσης,

$$C_T^{1.5} * Kn = 8.0 * 10^{-12} \text{ (kg/s)}^{1/2} \quad (6.16)$$



Εικόνα 6.5 Σύγκριση ανάμεσα στην ταχύτητα ροής του πλουμίου και στην ταχύτητα θερμοφόρησης σύμφωνα με την πειραματική μελέτη των R. Dobashi et al [92].

Πίνακας 6.1 Μετρούμενες και εκτιμώμενες ταχύτητες θερμοφόρησης σύμφωνα με την πειραματική μελέτη των R. Dobashi et al [92].

Material	Particle radius r , μm	Temperature gradient ∇T , K/mm	Mean temperature T_m , K	Gas density ρ_g , kg/m ³	Measured thermophoretic velocity U_T , mm/s	Estimated thermophoretic velocity U_T , mm/s	Constant C_T , kg/s	Knudsen number Kn , -	$C_T^{1.5} \times Kn$, (kg/s) ³	Remarks
Carbon	5	40	310	1.10	- 0.8		6.4×10^{-7}	0.017	8.8×10^{-12}	Measured in micro-g experiment
Carbon	15	40	310	1.10	- 0.5		1.2×10^{-6}	0.0057	7.5×10^{-12}	Measured in micro-g experiment
Carbon	0.02	200	1300	0.26		- 7.1	4.5×10^{-9}	26	8×10^{-12}	Smoke particle in the fuel side
Carbon	0.02	400	1300	0.26		- 14.1	4.5×10^{-9}	26	8×10^{-12}	Smoke particle in the air side
SiO ₂	1.35	40	310	1.10	- 1.15		2.5×10^{-7}	0.063	7.8×10^{-12}	Measured in micro-g experiment
SiO ₂	5	40	310	1.10	- 0.69		5.5×10^{-7}	0.017	7.0×10^{-12}	Measured in micro-g experiment
SiO ₂	15	40	310	1.10	- 0.53		1.3×10^{-6}	0.0057	8.2×10^{-12}	Measured in micro-g experiment
SiO ₂	15	200	1300	0.26		- 0.78	3.7×10^{-7}	0.035	8×10^{-12}	Tracer particle in the fuel side
SiO ₂	15	400	1300	0.26		- 1.6	3.7×10^{-7}	0.035	8×10^{-12}	Tracer particle in the fuel side



Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, η ταχύτητα θερμοφόρησης του σωματιδίου του άνθρακα με διάμετρο ίση με 80 nm εκτιμάται να είναι -7.1 mm/s για την πλευρά του καυσίμου και -14.1 mm/s για την πλευρά του αερίου (Πίνακας 6.1). Η σύγκριση ανάμεσα στην εκτιμώμενη ταχύτητα θερμοφόρησης και στην ταχύτητα της ροής του πλουμίου φαίνεται στην Εικόνα 6.7. Η ταχύτητα θερμοφόρησης υποδεικνύεται πως είναι προς την ψυχρή πλευρά, ως εκ τούτου, η δύναμη θερμοφόρησης δυσκολεύει το σωματίδιο της αιθάλης να περάσει διαμέσου της φλόγας όταν αυτό βρίσκεται στην περιοχή του καυσίμου, ενώ το οδηγεί να διασπαστεί σε μικρά κομμάτια όταν βρίσκεται στην πλευρά του αέρα. Η Εικόνα 6.7 δείχνει ότι η δύναμη θερμοφόρησης έχει μεγάλη επίδραση στην πορεία του σωματιδίου της αιθάλης όταν το καυσαέριο ρέει σχεδόν κάθετα προς το μέτωπο της φλόγας. Αυτή η επίδραση ενδεχομένως να μειώσει τον χρόνο παραμονής στην περιοχή παραγωγής της αιθάλης και να βοηθήσει την παραγωγή καπνού.

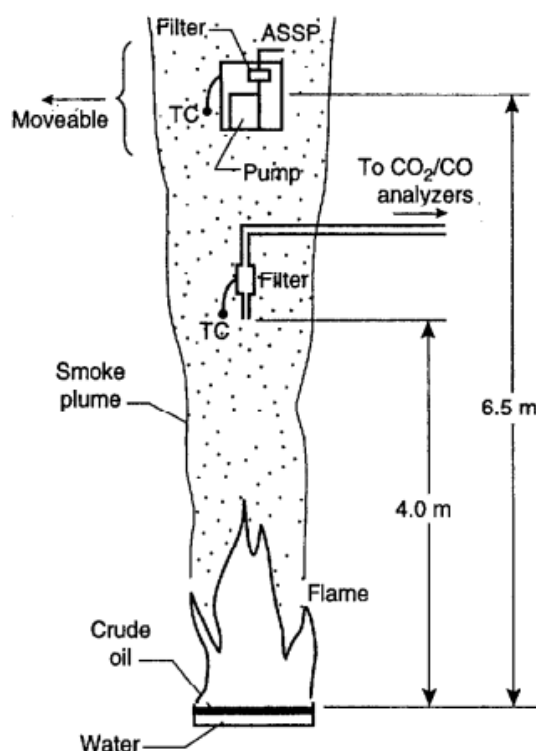
Η ταχύτητα θερμοφόρησης για τα ιχνηθετημένα σωματίδια εκτιμήθηκε πως είναι ίση με -0.78 mm/s στην πλευρά του καυσίμου και -1.6 mm/s στην περιοχή του αέρα (Πίνακας 6.1). Επομένως, η επίδραση της δύναμης θερμοφόρησης στα ιχνηθετημένα σωματίδια δεν φαίνεται να είναι σημαντική [92].

6.5 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΠΝΟΥ ΑΠΟ ΥΓΡΑ ΚΑΥΣΙΜΑ

Τα περισσότερα δημοσιευμένα δεδομένα για την παραγωγή καπνού από τα προϊόντα πετρελαίου και από το αργό πετρέλαιο είχαν βασιστεί σε μικρής κλίμακας δοκιμές. Συγκεκριμένα, οι διάμετροι των πειραματικών λεκάνων που περιείχαν το καύσιμο είχαν τιμές μικρότερες από 0,5 m. Παρακάτω παρουσιάζονται εκτεταμένα τα δεδομένα για την ποσοτικοποίηση των αποδόσεων του καπνού και την επίδραση της διαμέτρου της πειραματικής λεκάνης στο μέγεθος της κύριας σφαίρας του καπνού κατά την καύση του αργού πετρελαίου.

6.5.1 Η ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΚΑΠΝΟΥ

Τα πειράματα για την συλλογή δεδομένων για την απόδοση καπνού καπνού και το μέγεθος των πρωτογενών σφαιρών της αιθάλης διεξήχθησαν σε μία εγκατάσταση που έλαβε χώρα μία πυρκαγιά μεγάλης κλίμακας στο Ινστιτούτο Έρευνας Πυρκαγιάς στην Ιαπωνία (Fire Research Institute in Japan). Τα παρακάτω δεδομένα προέκυψαν από την μελέτη των G. W. Mulholland et al [94].



Εικόνα 6.6 Σχηματικό διάγραμμα του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε για την δειγματοληψία του καπνού για μία πυρκαγιά σε δεξαμενή αργού πετρελαίου με διάμετρο 1m κατά την πειραματική μελέτη των G. W. Mulholland et al [94].

Η Εικόνα 6.6 αποτελεί μία σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε κατά την πειραματική μελέτη των G. W. Mulholland et al [94]. Για την καύση χρησιμοποιήθηκε ένα μίγμα από δύο είδη αργού πετρελαίου. Συγκεκριμένα, το δείγμα περιείχε 80% αργό πετρέλαιο από το Abu Dhabi (murban crude oil) και 20% αργό πετρέλαιο από την Αραβία (Arabian crude oil). Οι



πειραματικές λεκάνες με τα δείγματα του αργού πετρελαίου τοποθετήθηκαν στο κέντρο της πειραματικής διάταξης, η οποία περιλάμβανε μία ανοικτή τετραγωνική περιοχή διαστάσεων 24x24 m και οροφή ύψους 20 m. Οι πειραματικές λεκάνες που χρησιμοποιήθηκαν για την καύση του αργού πετρελαίου ήταν μία κυκλική με διάμετρο 1 m και μία τετράγωνη με πλευρά 2.7 m. Το στρώμα του αργού πετρελαίου ήταν 2 cm και επέπλεε πάνω από το νερό. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην μέτρηση των ιδιοτήτων του καπνού.

Το κύριο πειραματικό ενδιαφέρον αφορά την εφαρμογή του ισοζυγίου του άνθρακα κατά την μέτρηση των αποδόσεων του καπνού. Η απόδοση του καπνού ορίζεται ως η μάζα των σωματιδίων του καπνού που παράγονται ανά μάζα καυσίμου που καταναλώνεται. Επομένως, για τον υπολογισμό της απόδοσης του καπνού διαιρείται η συνολική μάζα του καπνού, που συλλέχθηκε στο φίλτρο της δειγματοληψίας, με το άθροισμα της συνολικής μάζας του καπνού και της μάζας του άνθρακα που περιέχεται στο CO και στο CO₂. Επομένως, η εξίσωση για τον υπολογισμό της απόδοσης του καπνού, α , εκφρασμένη με βάση τις συγκεντρώσεις CO₂ και CO είναι η εξής:

$$\alpha = \frac{Fm_s}{[am_s + 0.012n_t(\Delta X(\text{CO}) + \Delta X(\text{CO}_2))]} \quad (6.17)$$

Η ποσότητα F είναι το κλάσμα της μάζας του άνθρακα του καυσίμου (0,855 για το μίγμα του αργού πετρελαίου), m_s είναι η μάζα του δείγματος του καπνού που συλλέχθηκε πάνω στο φίλτρο, n_t είναι ο αριθμός των moles του αέρα της δειγματοληψίας και η σταθερά 0,012 αντιπροσωπεύει την μοριακή μάζα του άνθρακα σε κιλά. Οι ποσότητες $\Delta X(\text{CO})$ και $\Delta X(\text{CO}_2)$ είναι τα κλάσματα moles του CO και του CO₂ των δειγμάτων των αερίων που λήφθηκαν κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας μείον την συγκέντρωση του περιβάλλοντος αυτών των αερίων. Ο υπόλοιπος άνθρακας που περιέχεται στα υπόλοιπα αέρια της καύσης έχει θεωρηθεί αμελητέος και δεν συνυπολογίστηκε στην Εξίσωση (6.17), διότι με βάση τις παρατηρήσεις της εργαστηριακής κλίμακας ο άνθρακας που εκπέμπεται από αυτά τα αέρια αποτελεί λιγότερο από το 2% του συνολικού άνθρακα που εκπέμπεται από την φλόγα. Επιπλέον, γίνεται η υπόθεση πως ο καπνός που συλλέγεται είναι καθαρός άνθρακας. Στην πραγματικότητα, ο καπνός αποτελείται κυρίως από γραφιτικό άνθρακα με ένα εκτιμώμενο περιεχόμενο άνθρακα κατά βάρος ίσο ή μεγαλύτερο από



95%. Αυτό το συμπέρασμα μαζί με το γεγονός ότι το m_s εμφανίζει μικρή επίδραση στην Εξίσωση (6.17), καθώς εμφανίζεται ως παρονομαστής, οδηγεί σε μία εκτίμηση της μέγιστης τιμής της αβεβαιότητας ίση με 1% για την τιμή των αποδόσεων του καπνού.

Η μέθοδος με την εφαρμογή του ισοζυγίου μάζας του άνθρακα έχει το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτεί την συλλογή όλου του καπνού που παράγεται. Η μέθοδος αυτή έχει επικυρωθεί σε μετρήσεις εργαστηριακής κλίμακας (τα αποτελέσματα των οποίων ήταν σύμφωνα κατά $\pm 10\%$) στις οποίες τα αποτελέσματα των ισοζυγίων μάζας του άνθρακα συγκρίθηκαν με τις μετρήσεις του συνολικού άνθρακα που παράχθηκε και με την συνολική ποσότητα του καυσίμου που κήκε. Επιπλέον, παρατηρήθηκε πως οι αποδόσεις του καπνού είναι ανεπηρέαστες από την ακτινική θέση του σημείου δειγματοληψίας πάνω από την πυρκαγιά.

Για την μέτρηση των αποδόσεων του καπνού χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές διαδικασίες, και οι δύο βασισμένες στην μέθοδο εφαρμογής ισοζυγίων του άνθρακα. Στην μία μέθοδο, η διάταξη της δειγματοληψίας τοποθετήθηκε 4 m πάνω από την κυκλική πειραματική λεκάνη με διάμετρο 1 m, και στον αγωγό εξαγωγής για την τετράγωνη πειραματική λεκάνη με πλευρά 2.7 m. Ο καπνός/αέριο έμπαινε σε μία διάταξη δειγματοληψίας από μία διάμετρο 6.5 mm, η ταχύτητα του καπνού/αερίου ήταν ίση με 5 m/s για μικρότερες πειραματικές συσκευές και περίπου 10 m/s για μεγαλύτερες πειραματικές συσκευές. Τα σωματίδια καπνού συλλέχθηκαν πάνω σε ένα κεραμικό φίλτρο, ενώ τα αέρια οδηγήθηκαν σε έναν αναλυτή CO-CO₂ με υπέρυθρες. Οι μέσες τιμές των δειγμάτων ήταν 2,000 ppm για το CO₂, 40 ppm για το CO, και 90° C για την θερμοκρασία. Οι τιμές αυτές αφορούν και τις δύο πειραματικές συσκευές (τόσο για αυτήν με διάμετρο 1 m όσο και για αυτήν με πλευρά 2.7 m). Για την πειραματική λεκάνη με διάμετρο ίση 1 m, κοντά στο τέλος της καύσης τυπικά στο χρόνο των 10 λεπτών, έλαβε χώρα αναβρασμός που κατέληξε σε μία ενισχυμένη καύση με αύξηση της θερμοκρασίας στους 150° C.

Η δεύτερη μέθοδος χρησιμοποίησε μία ειδική συσκευή για τη συλλογή του δείγματος του αερομεταφερόμενου καπνού (airborne-smoke-sampling-package, ASSP). Τα βασικά συστατικά της συσκευής είναι το φίλτρο, η αντλία και ο σάκος μεταφοράς του αερίου δείγματος. Σε αυτήν την περίπτωση, ένα κλάσμα του αερίου



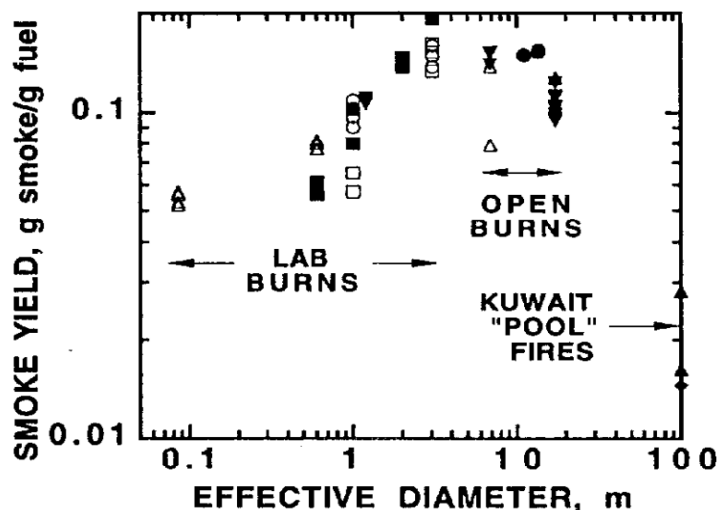
δείγματος που λήφθηκε από την αντλία οδηγήθηκε στον σάκο δειγματοληψίας κατά την διάρκεια της δειγματοληψίας. Έπειτα από την ολοκλήρωση της δοκιμής, το περιεχόμενο CO και το CO₂ του αερίου προσδιορίστηκε από αέρια χρωματογραφία. Η συγκέντρωση του CO₂ βρέθηκε περίπου ίση με 1200 ppm και για τις δύο δοκιμές, δηλαδή η θερμοκρασία ήταν περίπου ίση με 40° C για την πειραματική λεκάνη με διάμετρο ίση με 1 m και περίπου 80° C για την πειραματική λεκάνη πλευράς 2.7 m. Τέλος, πλέγματα της μικροσκοπίας μετάδοσης ηλεκτρονίων (transmission electron microscopy, TEM) τοποθετήθηκαν στην μεταλλική επιφάνεια του ASSP για μεταγενέστερη ανάλυση του μεγέθους και της δομής των συσσωματωμάτων του καπνού. Τα συσσωματώματα κατατέθηκαν με θερμοφόρηση επειδή η μεταλλική επιφάνεια ήταν ψυχρότερη από την επιφάνεια του αέρα. Η καθίζηση και η διάχυση συνέβαλλαν επίσης στην διάχυση του καπνού [94].

Πίνακας 6.2 Αποτελέσματα για τις αποδόσεις του καπνού από πειραματικές μελέτες που εμφανίζονται και στο Διάγραμμα 6.3.

Πειραματική λεκάνη	Μέγεθος λεκάνης (m)	Αποδόσεις καπνού με ASSP	Αποδόσεις καπνού με δειγματοληψίες	Παρατηρήσεις	Μελέτη
Τετράγωνη	2.7	0.148±0.012	0.149±0.015	-	[94]
Κυκλική	1	0.100±0.008	0.061	-	[94]
Κυκλική	3.05	0.194	-	-	[95]
Κυκλική	1	0.087	-	-	[95]
-	2-15	0.13-0.16	-	Οι μελέτες διεξήχθησαν σε εξωτερικό χώρο, άρα ο περιβάλλον αέρας ενδεχομένως να επηρέασε τις μετρήσεις.	[96, 97, 98, 99, 100]
-	~100	0.018 0.031	-	Υποεκτιμημένες τιμές συγκριτικά με τις πραγματικές.	Πυρκαγιές σε πετρελαιοπηγές στο Κουβέιτ.

Τα αποτελέσματα των αποδόσεων καπνού που λήφθηκαν από τις δύο παραπάνω μεθόδους για την τετράγωνη πειραματική λεκάνη με πλευρά 2.7 m συμφωνούσαν απόλυτα μεταξύ τους. Οι αντίστοιχες τιμές που λήφθηκαν από τις δύο παραπάνω

μεθόδους για την κυκλική πειραματική λεκάνη εμφάνιζαν μειωμένη συμφωνία. Συγκεκριμένα, οι τιμές που προέκυψαν από τις συνεχείς δειγματολήψεις ήταν μικρότερες, ο λόγος που εμφανίζεται μικρότερη τιμή για τις συνεχείς δειγματοληψίες είναι ότι ο καπνός συλλέχθηκε κατά την διάρκεια της καύσης συμπεριλαμβανομένης της περιόδου αναβρασμού κατά την διάρκεια της οποίας οι αποδόσεις μειώνονται. Ωστόσο, από το ASSP ο καπνός δεν συλλέγεται κατά την διάρκεια του αναβρασμού για να αποφευχθεί η βλάβη στα πλαστικά συστατικά (σάκος δειγματοληψίας, σωληνώσεις και προστατευτικό κάλυμμα αντλίας). Για τις μεγάλες πειραματικές λεκάνες δεν αναμένεται η εμφάνιση διαφοράς στις αποδόσεις του καπνού ανάμεσα στις δύο προσεγγίσεις. Αυτή η συμπεριφορά προκύπτει από το γεγονός ότι στις μεγαλύτερες πειραματικές λεκάνες το φαινόμενο του αναβρασμού είναι πολύ μικρό. Τέλος, οι τιμές των αποδόσεων του καπνού που προέκυψαν από την τετράγωνη πειραματική λεκάνη με πλευρά 2.7 m ήταν μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν από την κυκλική πειραματική λεκάνη με διάμετρο 1 m. Συγκεκριμένα, προέκυψε πως η απόδοση του καπνού αυξήθηκε κατά 50%, καθώς το μέγεθος της πειραματικής λεκάνης αυξήθηκε από το 1m στο 2.7 m.



Διάγραμμα 6.3 Η επίδραση της διαμέτρου της πειραματικής λεκάνης στις αποδόσεις του καπνού κατά την καύση αργού πετρελαίου. ◻ Η μελέτη των G. W. Mulholland et al [94]. ● Η μελέτη των W. Walton et al [96].

■ Η μελέτη των H. Koseki et al [95]. △ Η μελέτη των D. Evans et al [97]. ▼ Η μελέτη των W. Walton et al [98]. ▲ Η μελέτη των K. K. Laursen et al [99]. ◆ Η μελέτη των W. R. III Cofer et al [100].



Στο Διάγραμμα 6.3 γίνεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων για τις αποδόσεις του καπνού που προέκυψαν από διάφορες πυρκαγιές. Το διάγραμμα αυτό περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης των G. W. Mulholland et al [94], τα αποτελέσματα άλλων ερευνών που έλαβαν χώρα σε συνθήκες περιβάλλοντος [96, 95, 102, 98 , 99, 100] και τα αποτελέσματα από πυρκαγιές που αναπτύχθηκαν σε πετρελαιοπηγές στο Κουβέιτ. Το Διάγραμμα 6.3 περιλαμβάνει πυρκαγιές αργού πετρελαίου σε διάφορα μεγέθη πειραματικών λεκάνων σε κλίμακα από 0.085 m μέχρι 100 m.

Στην συνέχεια, θεωρήθηκε πως η τετράγωνη πειραματική λεκάνη από την πειραματική μελέτη των G. W. Mulholland et al [94] ισοδυναμεί με μία κυκλική πειραματική λεκάνη με διάμετρο 3.05 m οι δυο αυτές πειραματικές λεκάνες έχουν ισοδύναμη επιφάνεια. Η υπόθεση αυτή έγινε προκειμένου να μπορούν να συγκριθούν οι αποδόσεις του καπνού που προέκυψαν από την πειραματική μελέτη των G. W. Mulholland et al [94] με τις αντίστοιχες που προέκυψαν από την πειραματική μελέτη των H. Koseki et al [95]. Επομένως, σύμφωνα με τα δεδομένα του Πίνακα 6.2, παρατηρήθηκε μία τάση για αυξανόμενες αποδόσεις καπνού καθώς το μέγεθος της πειραματική λεκάνης αυξανόταν από 1 m σε 3.05 m.

Τα δεδομένα από τις πειραματικές λεκάνες μεγεθών 2-15 m που παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 6.3 παρατηρήθηκε πως ήταν ανεξάρτητα του μεγέθους της πειραματικής λεκάνης. Για πειραματικές λεκάνες μεγαλύτερες από 3 m, οι πυρκαγιές διεξήχθησαν σε εξωτερικό χώρο όπου ο περιβάλλον άνεμος ενδεχομένως να είχε επίδραση στην απόδοση του καπνού.

Τα αποτελέσματα των αποδόσεων του καπνού από δύο σειρές δοκιμών σε πειραματικές λεκάνες 17.2 m ήταν σημαντικά μικρότερα από τα αποτελέσματα των πειραματικών λεκάνων με μεγέθη 2-15 m. Η αιτία εμφάνισης αυτής της μείωσης δεν έχει προσδιοριστεί.

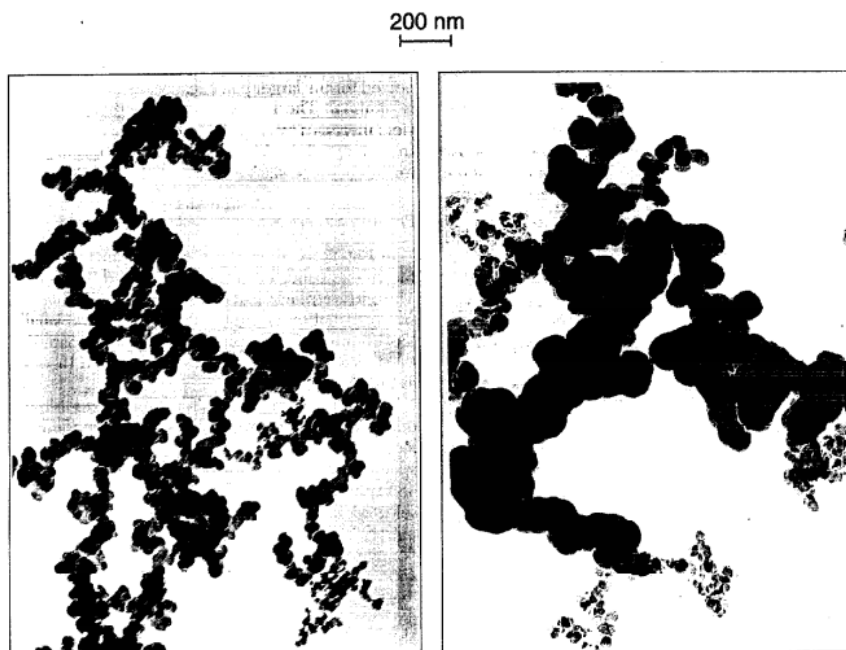
Τέλος, το Διάγραμμα 6.3 περιέχει και τα αποτελέσματα που λήφθηκαν για τις αποδόσεις του καπνού από μεμονωμένες πυρκαγιές στο Κουβέιτ. Τα δείγματα καπνού συλλέχθησαν από τα πλουμιά των δύο μεγάλων πυρκαγιών σε δεξαμενές με μία εκτιμώμενη διάμετρο των 100 m. Η μέθοδος του ισοζυγίου μάζας



χρησιμοποιήθηκε για να καθοριστεί η απόδοση των σωματιδίων άνθρακα του γραφίτη, των σωματιδίων του οργανικού άνθρακα, των ανθρακικών αλάτων και των αερίων σωματιδίων άνθρακα. Για την απόδοση του καπνού θεωρήθηκε το σύνολο της οργανικής και της στοιχειακής μάζας του άνθρακα και προέκυψαν οι τιμές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2. Οι τιμές αυτές θεωρήθηκε πως ήταν σημαντικά υποεκτιμημένες συγκριτικά με την πραγματική τιμή για δύο λόγους. Αρχικά, υπήρχαν μικρές ποσότητες ανοργάνων που συλλέχθηκαν πάνω στα φίλτρα, τα οποία αντιστοιχούσαν στο 11% του συνόλου των σωματιδίων στην μία περίπτωση και στο 5% του συνόλου των σωματιδίων στην άλλη περίπτωση. Ένας άλλος λόγος είναι ότι οι μέθοδοι δειγματοληψίας θα μπορούσαν να επιδράσουν στα αποτελέσματα. Επομένως, τα αποτελέσματα των πυρκαγιών στο Κουβέιτ φαίνεται να είναι αναξιόπιστα χωρίς να καταλήγουν σε κάποιο συμπέρασμα. Είναι πιθανό η απόδοση από τις πυρκαγιές στο Κουβέιτ να είναι σημαντικά διαφορετική από τις δοκιμές μικρότερης κλίμακας λόγω της υψηλής περιεκτικότητας των πετρελαίων σε αλάτι, λόγω του διαφορετικού κλιματισμού του καυσίμου ως αποτέλεσμα των πολλών ημερών καύσης σε αντίθεση με την καύση του πετρελαίου που επιπλέει στο νερό και έχει μικρότερη διάρκεια (λιγότερο από μία ώρα), και λόγω της μεγαλύτερης ταχύτητας του αέρα.

6.5.2 ΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΤΗΣ ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ ΣΦΑΙΡΑΣ ΤΗΣ ΑΙΘΑΛΗΣ

Παρακάτω, όπως και στην περίπτωση των αποδόσεων του καπνού, θα γίνει μία εκτενής ανάλυση της κατανομής όγκου των πρωτογενών σφαιρών (primary spheres) της αιθάλης που παράγεται από πυρκαγιές σε διάφορες δεξαμενές υγρών καυσίμων. Η ανάλυση αυτή θα περιλαμβάνει δεδομένα και από άλλες μελέτες, εκτός από την μελέτη των G. W. Mulholland et al [94] που αναπτύχθηκε παραπάνω. Από την κατανομή του όγκου των πρωτογενών σφαιρών της αιθάλης θα προκύψουν δεδομένα για τις διαμέτρους των σφαιρών αυτών. Στόχος της ανάλυσης που θα ακολουθήσει είναι ο συσχετισμός εκτεταμένων δεδομένων για τις πυρκαγιές, προκειμένου να διεξαχθούν κάποια γενικά συμπεράσματα για τα μεγέθη των πρωτογενών σφαιρών της αιθάλης.



Εικόνα 6.7 Οι TEM φωτογραφίες για τον καπνό που συλλέχθηκαν από τις πυρκαγιές στην πειραματική λεκάνη διαμέτρου 1 m (αριστερά εικόνα) και στην πειραματική λεκάνη διαστάσεων 2.7x2.7 m (δεξιά) κατά την πειραματική μελέτη των G. W. Mulholland et al [94].

Στην Εικόνα 6.7 παρουσιάζονται τα μικρογραφήματα του καπνού που συλλέχθηκαν από την καύση στις πειραματικές λεκάνες διαστάσεων 1 m και 2.7 m κατά την πειραματική μελέτη των G. W. Mulholland et al [94]. Το πιο εκπληκτικό χαρακτηριστικό στην εικόνα αυτή είναι η φαινομενική δικόρυφη κατανομή μεγέθους των μεγάλων (100-150 nm) και των μικρότερων (30-70 nm) πρωτογενών σφαιρών της αιθάλης. Επιπλέον, οι μεγαλύτερες σφαίρες ομαδοποιούνται όλες μαζί, όπως και οι μικρότερες.

Η ανάλυση του μεγέθους των σωματιδίων για καθεμία από τις πειραματικές φλόγες βασίστηκε στα μικρογραφήματα που λήφθηκαν από τυχαία επιλεγμένες περιοχές ενός πλέγματος TEM (transmission electron microscopy, TEM) κατά την πειραματική μελέτη των G. W. Mulholland et al [94]. Για την πειραματική λεκάνη με διάμετρο ίση με 1m μετρήθηκε ένα σύνολο από 404 σφαίρες, ενώ για την πειραματική λεκάνη με πλευρά 2.7 m μετρήθηκε ένα σύνολο από 483. Οι σφαίρες αυτές συλλέχθηκαν για διαστασιολόγηση, έτσι για κάθε φωτογραφία καθορίστηκαν



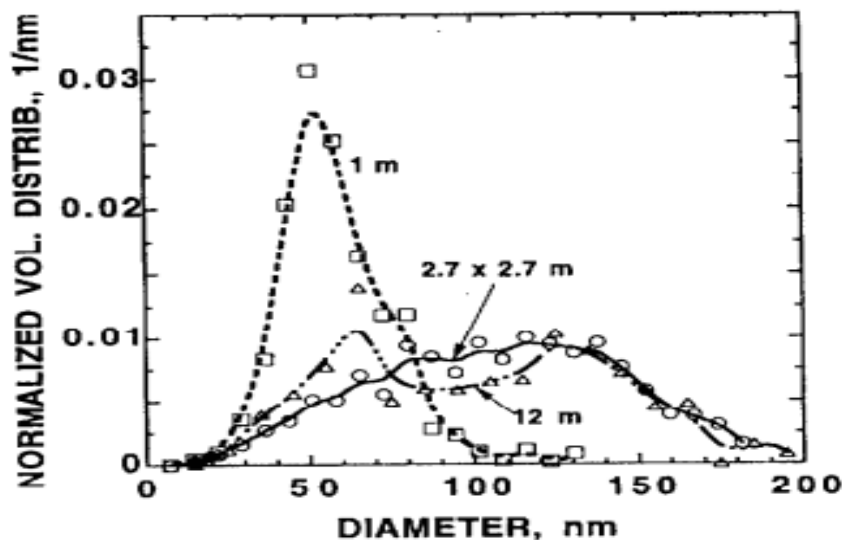
100 τυχαία σημεία. Στην περίπτωση όπου ένα σημείο εμφανιζόταν σε μία περιοχή από επικαλυπτόμενες πρωτογενείς σφαίρες της αιθάλης, για την διαστασιολόγηση επιλεγόταν η πλησιέστερη αναγνωρίσιμη σφαίρα. Η επικάλυψη εμφανίζεται κυρίως στις μεγαλύτερες σφαίρες. Οι φωτογραφίες TEM λήφθηκαν σε μεγέθυνση της κλίμακας των 30,000x. Οι πρωτογενείς σφαίρες της αιθάλης προσδιορίστηκαν κυρίως από τις στιλπνότητες που εμφάνιζαν.

Η διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε για την τυχαία επιλογή των σφαιρών δεν βασίζεται στην επιλογή των μεγαλύτερων σφαιρών. Η εμπειρικά καθορισμένη κατανομή, $Y(D)$, είναι ανάλογη με την αριθμητική κατανομή και προκύπτει από την ακόλουθη έκφραση:

$$Y(D) = CD^2n(D) \quad (6.18)$$

όπου C είναι η αναλογική σταθερά.

Ωστόσο, το μεγαλύτερο ενδιαφέρον συγκεντρώνεται στην κατανομή όγκου, $V(D)$, των πρωτογενών σφαιρών της αιθάλης, επειδή οι οπτικές ιδιότητες και οι επιπτώσεις στη υγεία συσχετίζονται άμεσα με την κατανομή όγκου και μάζας. Η κατανομή όγκου είναι ανάλογη του $D^3n(D)$. Επομένως, πολλαπλασιάζοντας το $Y(D)$ με το D προκύπτει πως το αποτέλεσμα είναι ανάλογο της κατανομής όγκου. Αυτή η μέθοδος δίνει αρκετά ακριβείς μετρήσεις της κατανομής όγκου. Το συμπέρασμα αυτό έχει ιδιαίτερη ισχύ για μεγάλες πυρκαγιές στις οποίες ένας σχετικά μικρός αριθμός από μεγάλες σφαίρες συμβάλλει σε ένα μεγάλο κλάσμα της κατανομής όγκου.



Διάγραμμα 6.4 Η κανονικοποιημένη κατανομή όγκου του καπνού από πυρκαγιές αργού πετρελαίου για πειραματική λεκάνη διαμέτρου 1 m, πειραματική λεκάνη διαστάσεων 2.7x2.7 m και πειραματική λεκάνη διαμέτρου 12 m σύμφωνα με την μελέτη των G. W. Mulholland et al [94].

Επιπλέον, είναι σημαντικό να καθοριστεί η κανονικοποιημένη κατανομή όγκου, $V^1(D)$, η τιμή της οποίας είναι ίση με ένα για μεγάλες διαμέτρους σωματιδίων:

$$V^1(D) = \frac{D_i Y(D_i)}{\sum D_i Y(D_i) \Delta D} \quad (6.19)$$

Στο Διάγραμμα 6.4 απεικονίζεται η κατανομή όγκου για τις πρωτογενείς σφαίρες της αιθάλης που παρήχθησαν από την καύση αργού πετρελαίου σε πειραματική λεκάνη με διάμετρο 1 m, σε πειραματική λεκάνη διαστάσεων 2.7 m x 2.7 m, και σε πειραματική λεκάνη διαμέτρου 12 m (317 points) κατά την μελέτη των G. W. Mulholland et al [94].



Πίνακας 6.3 Αποτελέσματα για το μέγεθος της πρωτογενούς σφαίρας της αιθάλης.

Πειραματική λεκάνη	Μέγεθος λεκάνης (m)	Καύσιμο	Μέγεθος πρωτογενούς σφαίρας της αιθάλης (nm)	Μελέτη
Τετράγωνη	2.7	Αργό πετρέλαιο	106	[94]
Κυκλική	1	Αργό πετρέλαιο	58	[94]
Κυκλική	12	Αργό πετρέλαιο	101	[94]
-	0.05-0.25	Καύσιμα με ελάχιστη και μέγιστη παραγωγή αιθάλης	33-56	[101]
Κυκλική	30	Καύσιμο αεροπορίας	30 και 150	[102]
-	100	Πυρκαγιές στο Κουβείτ	100	[103]

Στον Πίνακα 6.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την μέση διάμετρο της πρωτογενούς σφαίρας της αιθάλης, D_0 , της αιθάλης που προέκυψε από πυρκαγιές. Τα περιορισμένα δεδομένα (διαστασολόγηση 83 σφαιρών) για την πειραματική λεκάνη διαμέτρου 0.1 m εμφάνιζαν παρόμοιες τιμές με τα αντίστοιχα δεδομένα που προέκυψαν για την πειραματική λεκάνη διαμέτρου 1 m κατά την πειραματική μελέτη των G. W. Mulholland et al [94]. Στην περίπτωση της πειραματικής λεκάνης με διάμετρο 12 m, το καύσιμο ήταν αργό πετρέλαιο από το Baton Rouge και ο καπνός συλλέχθηκε από το ASSP περίπου 200 m πάνω από την κορυφή της φλόγας. Ο εμφανής χαρακτήρας της διπλής κορυφής που εμφανίζεται στα μικρογραφήματα των μεγαλύτερων πυρκαγιών προκύπτει κυρίως για την πυρκαγιά που αναπτύχθηκε στην πειραματική λεκάνη με διάμετρο 12 m παρά για την αντίστοιχη που αναπτύχθηκε σε πειραματική λεκάνη με πλευρά 2.7 m.

Θεωρώντας πάλι πως η τετράγωνη πειραματική λεκάνη ισοδυναμεί με μία κυκλική πειραματική λεκάνη με διάμετρο 3.05 m, προκύπτει η παρατήρηση ότι η μέση διάμετρος της πρωτογενούς σφαίρας της αιθάλης αυξάνεται περισσότερο από 80% (από 58 nm στα 106 nm) καθώς η διάμετρος της πειραματικής λεκάνης αυξάνεται από 1 σε 3.05 m. Αυτή η διαφορά αναμένεται να έχει επιδράσεις τόσο στις οπτικές όσο και στις αεροδυναμικές ιδιότητες της αιθάλης.



Από τα δεδομένα του Πίνακα 6.3 προκύπτει οι μεγάλες πυρκαγιές εμφανίζουν μεγάλες μέσες τιμές για την διάμετρο των πρωτογενών σφαιρών της αιθάλης σε συνθήκες περιβάλλοντος. Τέλος, η μελέτη των Dobbins et al [104] κατέληξε στο συμπέρασμα πως το μέγεθος της πρωτογενούς σφαίρας της αιθάλης μπορεί να αυξηθεί με μείωση της θερμοκρασίας της φλόγας ή με αύξηση του χρόνου παραμονής στην περιοχή της χαμηλότερης θερμοκρασίας της φλόγας. Ωστόσο, η αιτία αύξησης του μεγέθους του πρωτογενούς σωματιδίου της αιθάλης δεν έχει ακόμα προσδιοριστεί πλήρως.

6.5.3 Η ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΑΙΘΑΛΗΣ

Έχουν διεξαχθεί αρκετές έρευνες της δομής της αιθάλης που δημιουργείται από την καύση, δίνοντας στοιχεία για το μηχανισμό του σχηματισμού αιθάλης, την πηγή της ατμοσφαιρικής αιθάλης, την επίδραση της ενδιάμεσης θερμοκρασίας οξείδωσης στην εσωτερική δομή της αιθάλης, και την επίδραση του χρόνου παραμονής στην ανάπτυξη των φουλερενίων. Οι περισσότερες από τις μελέτες αυτές έχουν διεξαχθεί με την χρήση της υψηλής ανάλυσης ηλεκτρονικής μικροσκοπίας μετάδοσης (HRTEM, high-resolution transmission electron microscopy) για ανάλυση της νανοδομής της αιθάλης. Η διαδικασία της απεικόνισης των μορφών του άνθρακα με HRTEM έχει γίνει ημι-αυτοματοποιημένη και έχει καταφέρει να ποσοτικοποιηθεί μέσω της ανάπτυξης προηγμένων διαδικασιών με προηγμένη ανάλυση εικόνων με την χρήση φίλτρων. Έτσι, μπορεί να αξιολογεί τα πλέγματα του άνθρακα ως προς διάφορες παραμέτρους. Αυτές οι βελτιώσεις στην ανάλυση της HRTEM την έχουν κάνει ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την αξιολόγηση των αλλαγών στην νανοδομή της αιθάλης, ειδικά λόγω του ότι άλλες πρότυπες αναλυτικές τεχνικές έχουν απαιτήσεις για σημαντικές ποσότητες υλικού δείγματος.

Η νανοδομή της αιθάλης επηρεάζει την δραστικότητα των σωματιδίων της αιθάλης, τόσο ως προς την ανάπτυξη της επιφάνειας όσο και ως προς την οξείδωση. Ωστόσο, η δραστικότητα των σωματιδίων της αιθάλης είναι κυρίως ένα επιφανειακό φαινόμενο και ως εκ τούτου δεν μπορεί να αντιμετωπίζεται αυστηρά μέσω της

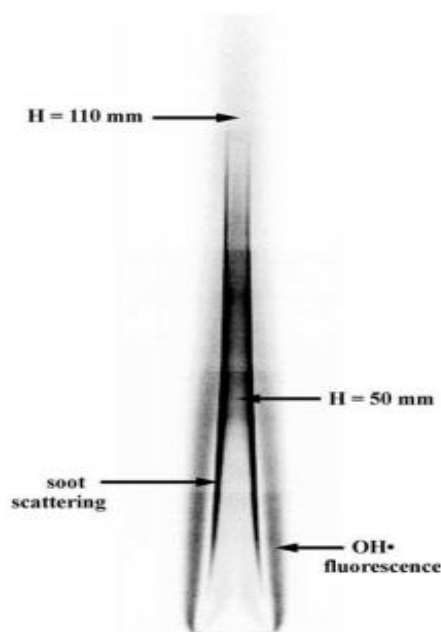


HRTEM. Παρακάτω γίνεται λεπτομερής ανάλυση της επίδρασης της μικροδομής της αιθάλης στην οπτική απορροφητικότητά της, αλλά και σε άλλες παραμέτρους. Η ανάλυση αυτή βασίστηκε στα πειραματικά δεδομένα των C. R. Shaddix et al [105] για πυρκαγιές σε δεξαμενές αιθυλενίου και JP-8, τόσο για στρωτή όσο και για τυρβώδη φλόγα διάχυσης.

Η πειραματική διαδικασία που ακολούθησαν οι C. R. Shaddix et al [105] βασίστηκε στην συλλογή δειγμάτων αιθάλης από τρεις διαφορετικές φλόγες, όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.4. Για τις στρωτές φλόγες τα δείγματα του πλέγματος TEM συλλέχθηκαν χρησιμοποιώντας μια τεχνική δειγματοληψίας ταχείας ένεσης και το φαινόμενο της θερμοφόρησης με τα πλέγματα προσανατολισμένα κάθετα. Για τις τυρβώδεις φλόγες τα δείγματα αιθάλης συλλέχθηκαν με τα φύλλα των πλεγμάτων άνθρακα να είναι προσανατολισμένα οριζόντια και να εκτίθενται για 0,3 s [105].

Πίνακας 6.4 Λήψη δειγμάτων με πλέγματα TEM από διάφορα σημεία σε φλόγες κατά την πειραματική μελέτη των C. R. Shaddix et al [105].

Φλόγα	Καύσιμο	Διάμετρος καύσης/ χαρακτηριστικά ροής	Τοποθεσίες δειγμάτων	Ύψη δειγμάτων
1	Αιθυλένιο	1,1 cm/σταθερή στρωτή	Κεντρική γραμμή	H=50 mm H=110 mm H=210 mm
2	Αιθυλένιο	6 cm/ασταθής στρωτή	Κεντρική γραμμή	H=70 mm μετά την φλόγα
3	JP-8	5 m/τυρβώδης	0,8 m από την κεντρική γραμμή	H=1,2 m

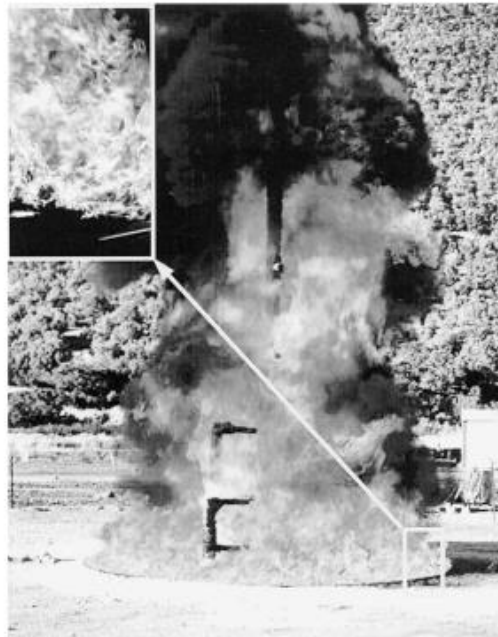


Εικόνα 6.8 Εικόνες από στοιβαγμένα επίπεδα OH που προκαλούνται από φθορισμό λέιζερ (στην εξωτερική άκρη της φλόγας) και από ελαστική σκέδαση αιθάλης (εντός του στρώματος OH) από την φλόγα 1 κατά την πειραματική μελέτη των των C. R. Shaddix et al [105].

Η φλόγα 1 ήταν μία φλόγα με διάμετρο 1.1 cm από καπνό αιθυλενίου με εξαναγκασμένη συν-δακτυλοειδή ροή αέρα. Η ψυχρή ροή είχε κατά μέσο όρο ταχύτητα εξόδου ίση με 5.07 cm/s για το αιθυλένιο και 16.2 cm/s για τον αέρα. Επειδή η αιχμή της φλόγας ήταν ανοικτή και εξέπεμπε καπνό, το φωτεινό ύψος της φλόγας μπορούσε δύσκολα να οριστεί γι' αυτή την φλόγα, αλλά ήταν της τάξης των 150 mm. Τα δείγματα της αιθάλης συλλέχθησαν κατά μήκος της κεντρικής γραμμής, σε ύψη που αντιστοιχούν στην περιοχή εμφάνισης πρωτογενών σωματιδίων αιθάλης με τη μέγιστη διάμετρο ($H = 50$ mm), στο τέλος της ενεργού οξείδωσης της αιθάλης ($H = 110$ mm), και πέρα από τη φωτεινή αιχμή της φλόγας ($H = 210$ mm). Η Εικόνα 6.8 δείχνει το φθορισμό του OH και την σκέδαση της αιθάλης σε αυτή την φλόγα, ενώ υποδεικνύονται και τα δύο κατώτερα ύψη της δειγματοληψίας.

Η φλόγα 2 ήταν μία φλόγα αιθυλενίου με διάμετρο 6 cm που έχει σταθεροποιηθεί σε ένα καυστήρα McKenna χωρίς αναγκαστική ροή αέρα. Ήταν μια

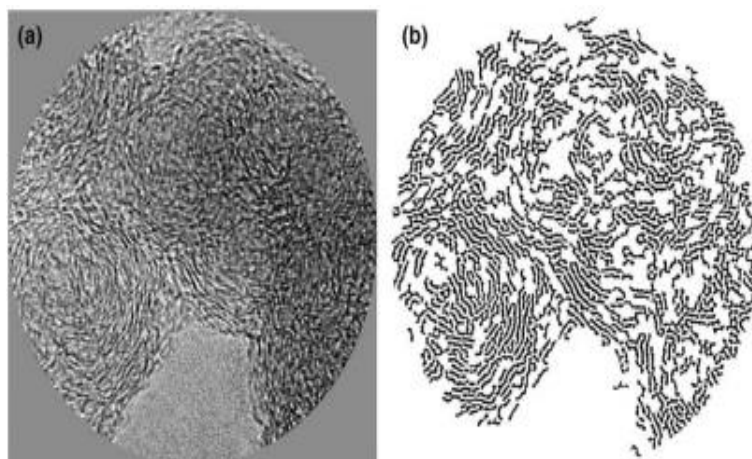
δυναμική, ασταθής φλόγα που εμφάνιζε διάχυση καπνού. Τα δείγματα της αιθάλης συλλέχθηκαν κατά μήκος της κεντρικής γραμμής της φλόγας σε ύψος 70 mm (στο μέσο του ύψους της φλόγας), αλλά και κάτω από την δραστική ζώνη καύσης (στην περιοχή μετά την φλόγα).



Εικόνα 6.9 Φωτογραφία της φλόγας 3 από μία πυρκαγιά σε δεξαμενή διαμέτρου 5 m που περιείχε JP-8 από τα Εθνικά Εργαστήρια Sandias' Lurance Canyon Burn Site [106], που εδρεύουν στο Μεξικό. Η φωτογραφία αποτελεί ένα κοντινό πλάνο της δομής της φλόγας στην βάση της πυρκαγιάς της δεξαμενής.

Η φλόγα 3 ήταν μία φλόγα από μία πυρκαγιά σε δεξαμενή JP-8, μία φωτογραφία αυτής της φλόγας δίνεται στην Εικόνα 6.9. Τα δείγματα της αιθάλης από αυτήν την πυρκαγιά συλλέχθηκαν από την ενεργό περιοχή της φλόγας, έξω από την κεντρική γραμμή της φλόγας. Τα δείγματα για την ανάλυση συλλέχθηκαν με συμβατικά πλέγματα TEM από μία πυρκαγιά σε μία δεξαμενή JP-8 διαμέτρου 1 m.

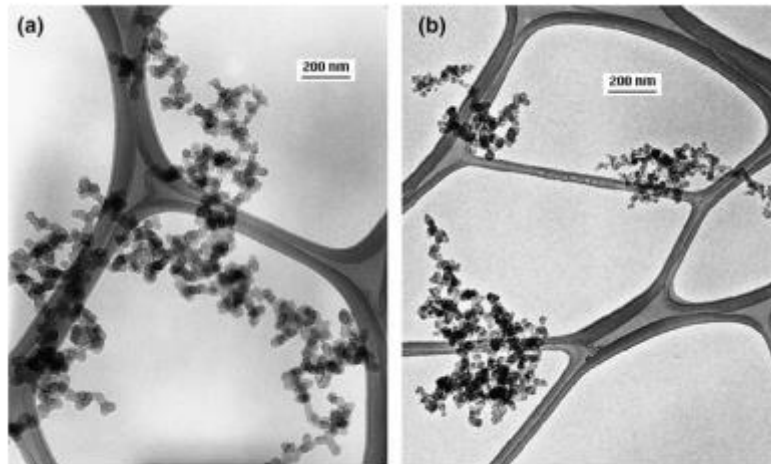
Στα συλλεχθέντα δείγματα πραγματοποιήθηκε ανάλυση HRTEM. Οι εικόνες συλλέχθηκαν για τα σωματίδια αιθάλης και στη συνέχεια σαρώθηκαν από έναν υπολογιστή για πρόσθετη ψηφιακή ανάλυση.



Εικόνα 6.10 Η αριστερά εικόνα παρουσιάζει το κυκλικό τμήμα της αιθάλης από την HRTEM. Η δεξιά εικόνα παρουσιάζει τις θέσεις των ατόμων άνθρακα. Οι εικόνες αυτές προέκυψαν από την πειραματική μελέτη των C. R. Shaddix et al [105].

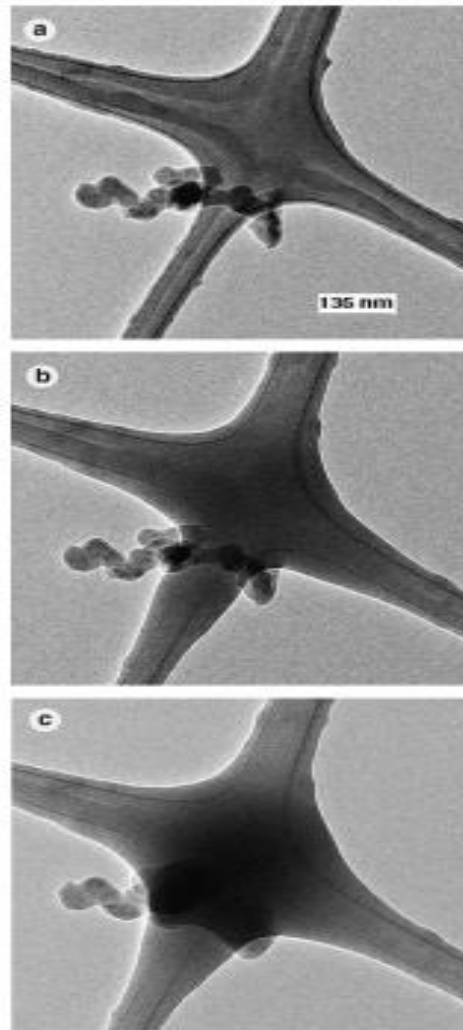
Εκτός από την ποιοτική ανάλυση, πραγματοποιήθηκε και οπτική ανάλυση των συλλεχθέντων εικόνων από την HRTEM, αλλά και ψηφιακή ανάλυση της διάταξης του άνθρακα με τη χρήση λογισμικού επεξεργασίας εικόνας κατά την πειραματική μελέτη των C. R. Shaddix et al [105]. Στην Εικόνα 6.10 φαίνεται ένα δείγμα μίας εικόνας από την HRTEM και η αντίστοιχη εικόνα που παρουσιάζει τις θέσεις των ατόμων άνθρακα. Με αυτές τις εικόνες, μπορούν να προσδιοριστούν μια ποικιλία παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τον στροβιλοστρωματικό άνθρακα (turbostatic carbon), όπως η απόσταση των ατόμων άνθρακα (fringe length) και το πάχος του στρώματος των ατόμων άνθρακα (graphitic layer interplanar spacing), d_{002} . Για την εκτίμηση του βαθμού γραφίτιοποίησης των ανθρακούχων υλικών χρησιμοποιείται συχνά το πάχος του στρώματος των ατόμων άνθρακα. Η απόσταση των ατόμων άνθρακα, χρησιμοποιείται συχνά ως σχετική ένδειξη του βαθμού γραφίτιοποίησης, αλλά η

χρήση του πάχους του στρώματος των ατόμων άνθρακα παρέχει μια απόλυτη ένδειξη, καθώς δεν περιορίζεται από την αρχική διάταξη των ατόμων άνθρακα μέσα στο ανθρακούχο υλικό [105].



Εικόνα 6.11 Εικόνες TEM σε πλέγματα αιθάλης που συλλέχθηκαν στα $H=110$ mm (αριστερά εικόνα) και στα $H=210$ mm (δεξιά εικόνα) από την φλόγα 1 κτλα την πειραματική μελέτη των των C. R. Shaddix et al [105]. Η μεγέθυνση είναι 50.000x.

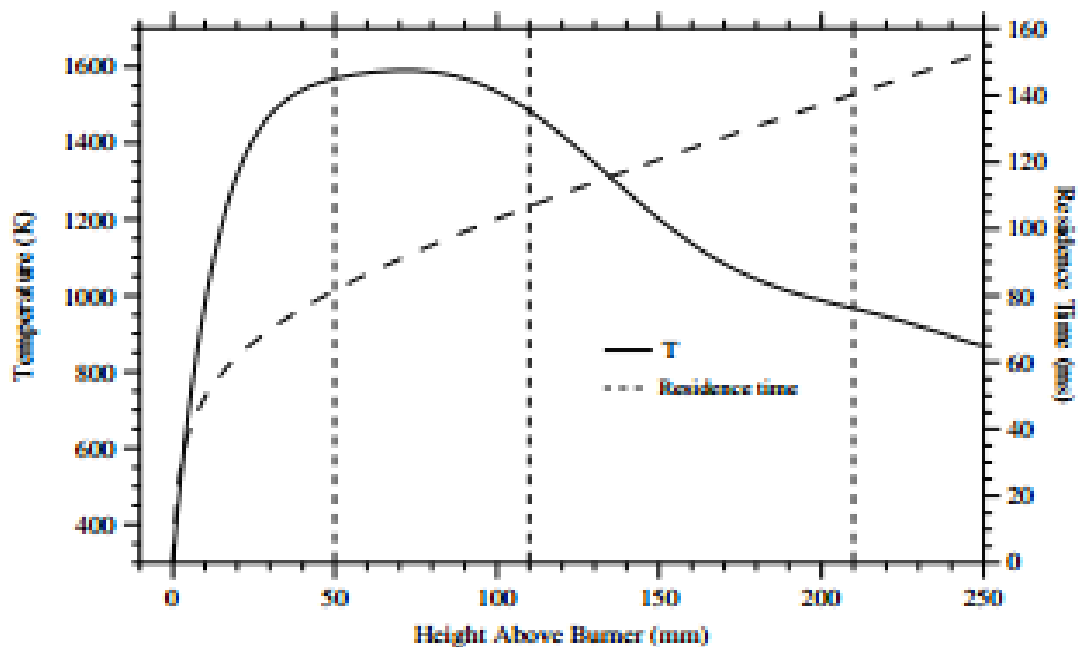
Τα παραδείγματα των εικόνων TEM χαμηλής ανάλυσης για την αιθάλη που συλλέχθηκαν, κατά την πειραματική μελέτη των C. R. Shaddix et al [105], από την φλόγα 1 σε ύψη των 110 mm και 210 mm φαίνονται στην Εικόνα 6.11. Η λεπτομερής εξέταση αυτών των εικόνων δείχνει ότι το μέγεθος των πρωτογενών σωματιδίων της αιθάλης μειώνεται σε ύψος πάνω από τα 50 mm. Αυτή η τάση μείωσης του μεγέθους των πρωτογενών σωματιδίων της αιθάλης σε αυξανόμενο ύψος κατά μήκος της κεντρικής γραμμής της φλόγας, ακόμη και όταν το κλάσμα όγκου της αιθάλης αυξάνεται, έχει παρατηρηθεί από πολλούς ερευνητές για παρόμοιες φλόγες χωρίς να έχει γίνει κατανοητή. Οι μικρογραφίες δείχνουν επίσης ότι ο βαθμός συσσωμάτωσης της αιθάλης αυξάνει με την αύξηση του ύψους κατά μήκος της γραμμής του καπνού, όπως ήταν αναμενόμενο.



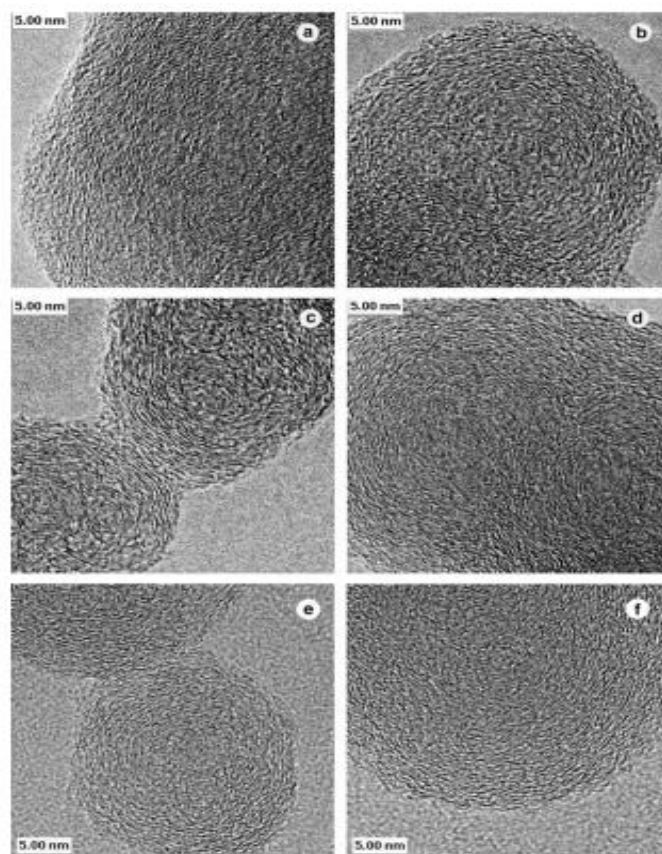
Εικόνα 6.12 Σειρές από διαδοχικές εικόνες TEM (από πάνω προς τα κάτω) σε μεγέθυνση 70,000x, που δείχνουν την επίδραση μίας δέσμης ηλεκτρονίων υψηλής ισχύος τόσο στην επιφάνεια της αδρανούς αιθάλης όσο και στα πλέγματα TEM σε $H=70$ mm στην φλόγα 2. Η λήψη των εικόνων έγινε με χρονική διαφορά 30 s κατά την πειραματική μελέτη των C. R. Shaddix et al [105].

Η αιθάλη που συλλέχθηκε σε ύψος 70 mm στη φλόγα 2 φαίνεται ότι είχε πρόσφατα σχηματιστεί και αποτελούταν από σχετικά μικρά συσσωματώματα με μία άμορφη επίστρωση που ήταν παρούσα τόσο στην επιφάνεια της αδρανούς αιθάλης όσο και στο πλέγμα TEM. Μετά την έκθεση σε μία δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ισχύος, το άμορφο υλικό που είχε αποτεθεί στο πλέγμα παρουσίασε ρευστότητα και κάλυψε

τα αδρανή συσσωματώματα της αιθάλης που είχαν κατατεθεί, αποτρέποντας την αποτελεσματική απεικόνιση υψηλής ανάλυσης της αιθάλης. Αυτή η αλληλουχία γεγονότων εμφανίζεται στην Εικόνα 6.12. Από την εικόνα δεν γίνεται σαφές αν η αιθάλη αποσυνδέθηκε κάτω από την επίδραση της ακτινοβολίας της δέσμης ηλεκτρονίων υψηλής ισχύος ή αν το θάμπωμα στις εικόνες προέκυψε εξ' ολοκλήρου από την ροή του υλικού που είχε κατατεθεί αρχικά στις επιφάνειες του πλέγματος. Άλλοι μελετητές έχουν παρατηρήσει ότι η ακτινοβολία των μορφών άνθρακα με δέσμη ηλεκτρονίων, κατά την εκτέλεση της HRTEM, θερμαίνει τα δείγματα και μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές δομικές ανακατατάξεις, ανάλογα με την ένταση και τη διάρκεια της έκθεσης. Τα δείγματα που συλλέχθηκαν από $H = 50$ mm και $H = 110$ mm στη φλόγα 1 εμφάνισαν επίσης μια μικρή ποσότητα άμορφης επίστρωσης υλικού τόσο στην αδρανή αιθάλη όσο και στην επιφάνεια του πλέγματος. Ωστόσο, το πλέγμα του άμορφου υλικού που αποτέθηκε δεν εμφάνισε ρευστότητα κατά την διάρκεια της HRTEM σε κανένα από τα δείγματα από την φλόγα 1 [105].



Διάγραμμα 6.5 Η θερμοκρασία και ο χρόνος παραμονής κατά μήκος της κεντρικής γραμμής την φλόγας 1. Οι διακεκομμένες κάθετες γραμμές υποδεικνύουν τα ύψη στα οποία συλλέχθηκαν τα πλέγματα TEM κατά την πειραματική μελέτη των C. R. Shaddix et al [105].



Εικόνα 6.13 Υψηλής ανάλυσης εικόνες TEM (μεγέθυνση 1,800,000x) από διαφορετικές θέσεις δειγματοληψίας και φλόγες κατά την πειραματική μελέτη των C. R. Shaddix et al [105].(a) φλόγα 1, σε H=50 mm, (b) φλόγα 1, σε H=110 mm, (c) φλόγα 1, σε H=210 mm, (d) φλόγα 2, σε ύψος μετά την φλόγα, (e) και (f) φλόγα 3.

Οι εικόνες των δειγμάτων της HRTEM και από τις 3 φλόγες παρουσιάζονται στην Εικόνα 6.13. Όλα τα δείγματα που λήφθηκαν από τους C. R. Shaddix et al [105] δείχνουν το χαρακτηριστικό σχήμα <<κρεμμυδιού>> (“onion” shape) του στροβιλοστρωματικού γραφίτη (turbostatic graphitic) που έχει παρατηρηθεί για την αιθάλη (δηλαδή, ομόκεντρα προσανατολισμένα στρώματα γραφενίου). Ποιοτικά, κατά την προβολή όλων των συλλεχθέντων εικόνων της HRTEM φαίνεται να υπάρχει μια αύξηση της διάταξης του γραφίτη σε αυτές τις εικόνες, καθώς το ύψος αυξάνεται κατά μήκος της κεντρικής γραμμής της φλόγας 1. Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 6.5, η αιθάλη που είχε πρόσφατα σχηματιστεί στο ύψος κεντρικής γραμμής



δειγματοληψίας ($H = 50 \text{ mm}$), παρέμεινε στην θερμοκρασιακή περιοχή των 1,500-1,600 K για 25 ms πριν φτάσει στο δεύτερο ύψος δειγματοληψίας, και στη συνέχεια παρέμεινε για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα (35 ms) σε ένα χαμηλότερο θερμοκρασιακό εύρος 1,000-1,500 K πριν φτάσει στο τελικό ύψος δειγματοληψίας. Ως εκ τούτου, η αύξηση της διατεταγμένης μορφής του γραφίτη στην αιθάλη μπορεί να ερμηνευτεί ως αποτέλεσμα της θερμικής καταπόνησης κατά μήκος της κεντρικής γραμμής της φλόγας [105].

Πίνακας 6.5 Πλεγματική απόσταση των γραφιτικών στρωμάτων στην συλλεγόμενη αιθάλη από τα πειράματα των των C. R. Shaddix et al [105].

Φλόγα	Καύσιμο	Διάμετρος καύσης/χαρακτηριστικά ροής	Τοποθεσία δείγματος	Μέση τιμή d_{002} (Å)	SD d_{002} (Å)
1	Αιθυλένιο	1,1 cm/σταθερή στρωτή	H=50 mm	3,52	0,14
			H=110 mm	3,48	0,15
			H=210 mm	3,47	0,10
2	Αιθυλένιο	6 cm/ασταθής στρωτή	Περιοχή μετά την φλόγα	3,57	0,12
3	JP-8	5 m/τυρβώδης	H=1,2 m	3,55	0,14

Για να ποσοτικοποιηθεί η οπτικά φαινομενική τάση για αύξηση της διάταξης του άνθρακα και να προσδιοριστεί η σχετική γραφίτοποίηση της αιθάλης σε διαφορετικές φλόγες, διεξήχθη από τους C. R. Shaddix et al [105] μια ποσοτική ανάλυση των εικόνων της HRTEM, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Ο Πίνακας 6.5 δείχνει τα αποτελέσματα της ανάλυσης για όλα τα δείγματα αιθάλης που αναλύθηκαν. Έτσι, παρατίθενται οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις του πάχους του στρώματος των ατόμων άνθρακα (graphitic layer interplanar spacing). Από τα αποτελέσματα αυτά προέκυψε μία μικρή μείωση της μέσης τιμής του πάχους του στρώματος των ατόμων άνθρακα, καθώς η αιθάλη κινούταν διαμέσου της περιοχής αυξανόμενης θερμοκρασίας. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα από την περιοχή μετά την φλόγα και από την ενεργό φλεγόμενη περιοχή έδειξαν μία ελαφρώς μεγαλύτερη τιμή του πάχους του στρώματος των ατόμων άνθρακα για τις μεγαλύτερες φλόγες, που



ίσως να αντανακλά στο γεγονός ότι η αιθάλη σχηματίζεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες σε αυτές τις φλόγες [105].

6.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- ❖ Η κατανόηση του μηχανισμού παραγωγής αιθάλης από μεγάλες πυρκαγιές δεξαμενών είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο. Τα πειραματικά αποτελέσματα και τα αποτελέσματα των μοντελοποιήσεων έδειξαν πως ο κυρίαρχος μηχανισμός παράσυρσης της αιθάλης είναι η κατακόρυφη παράσυρση ενώ η επιτάχυνση των κυρίων φαινομένων της πυρκαγιάς λαμβάνει χώρα κατά μήκος του άξονα του πλουμίου και εντός της διαμέτρου της φλόγας.
- ❖ Η μελέτη του σχηματισμού της αιθάλης βασίστηκε κατά μεγάλο ποσοστό στην ανάπτυξη διαφόρων μοντέλων. Ωστόσο, παρόλη την πρόοδο που έχει γίνει στον τομέα των προσομοιώσεων είναι απαραίτητο να γίνει ένας συμβιβασμός ανάμεσα στην επιθυμητή πολυπλοκότητα, στον χρόνο και στο κόστος. Επομένως, για την ανάπτυξη διαφόρων μοντέλων μελέτης του σχηματισμού της αιθάλης απαιτείται επιπλέον έρευνα για να προκύψουν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.
- ❖ Ο σχηματισμός της αιθάλης στις φλόγες διάχυσης είναι δυνατόν να μελετηθεί σε τέσσερα στάδια: το στάδιο δημιουργίας πυρήνων, την αντίδραση σχηματισμού αιθάλης, το στάδιο οξειδωσης της αιθάλης και την συσσωμάτωση των σωματιδίων της αιθάλης. Ωστόσο, κατά την μελέτη των σταδίων αυτών λαμβάνεται υπόψιν και η γήρανση των σωματιδίων της αιθάλης με αποτέλεσμα την ταυτόχρονη μείωση της τάσης για αντίδραση των σωματιδίων αυτών. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατόν να προκύψουν πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα.
- ❖ Το φαινόμενο της αστάθειας στις φλόγες εμφανίζει σημαντική επίδραση στην συμπεριφορά της πυρκαγιάς. Η ασταθής φλόγα είναι δυνατόν να χωριστεί σε τρεις περιοχές: την επίμονη περιοχή, την διακοπτόμενη περιοχή και την περιοχή του πλουμίου. Η παραγωγή του καπνού λαμβάνει χώρα στην διακοπτόμενη περιοχή και στην περιοχή του πλουμίου, για το λόγο αυτό οι περισσότερες μελέτες έχουν εστιάσει στην διακοπτόμενη περιοχή της φλόγας.



- ❖ Η ασταθής φλόγα λαμβάνει την μορφή της φλόγας που μοιάζει με μανιτάρι κατά την οποία η ροή του πλουμίου γίνεται οριζόντια προς αυτήν. Η κατακόρυφη ταχύτητα του πλουμίου είναι ανεξάρτητη από την αυξημένη κατακόρυφη ταχύτητα του πλουμίου. Συγκεκριμένα, η κατακόρυφη ταχύτητα της φλόγας μπορεί να προκαλέσει την κατάσβεσή της.
- ❖ Ο σχηματισμός της αιθάλης οδηγεί στην παραγωγή καπνού από την φλόγα. Σημαντική επίδραση στην παραγωγή καπνού έχει η δύναμη θερμοφόρησης που επηρεάζει ιδιαίτερα την παραγωγή καπνού στις περιοχές με απότομη μεταβολή της θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα, η δύναμη της θερμοφόρησης δυσκολεύει το σωματίδιο της αιθάλης να περάσει διαμέσου της φλόγας όταν βρίσκεται στην περιοχή του καυσίμου και το οδηγεί να διασπαστεί σε μικρά κομμάτια όταν βρίσκεται στην πλευρά του αέρα. Άμεση συνέπεια είναι η μείωση του χρόνου παραμονής των σωματιδίων στην περιοχή παραγωγής της αιθάλης και η ταυτόχρονη παραγωγή καπνού.
- ❖ Η απόδοση του καπνού εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος της λεκάνης στην οποία γίνεται η καύση. Στις μικρές πειραματικές λεκάνες η απόδοση του καπνού αυξάνεται με αύξηση του μεγέθους της λεκάνης, ενώ στις μεγάλες πειραματικές λεκάνες η απόδοση του καπνού είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος της λεκάνης. Η διαφορά αυτή εκτιμάται πως σχετίζεται με το φαινόμενο του αναβρασμού που εμφανίζεται σε μικρές πειραματικές λεκάνες και μειώνει τις αποδόσεις του καπνού. Ωστόσο, αξίζει να αναφερθεί πως οι πειραματικές μελέτες σε μεγάλες δεξαμενές διεξάχθηκαν στο εξωτερικό περιβάλλον όπου ο περιβάλλον άνεμος ενδεχομένως να εμφάνιζε σημαντική επίδραση.
- ❖ Το μέγεθος των πρωτογενών σφαιρών της αιθάλης αυξάνεται με αύξηση του μεγέθους της πειραματικής λεκάνης σε συνθήκες περιβάλλοντος και για μεγάλες πυρκαγιές. Επιπλέον, το μέγεθος των πρωτογενών σφαιρών της αιθάλης αυξάνεται με μείωση της θερμοκρασίας της φλόγας ή με αύξηση του χρόνου παραμονής των σωματιδίων της αιθάλης στην περιοχή με χαμηλή θερμοκρασία της φλόγας.
- ❖ Τέλος, η δομή της αιθάλης επηρεάζεται από τη θέση της στην φλόγα. Συγκεκριμένα, ο βαθμός συσσωμάτωσης των σωματιδίων της αιθάλης αυξάνεται



με αύξηση του ύψους και κατά μήκος της κεντρικής γραμμής του καπνού. Κατ'αντιστοιχία η διάταξη του γραφίτη αυξάνεται σημαντικά με αύξηση του ύψους κατά μήκος της κεντρικής γραμμής του καπνού και με τη αύξηση της θερμικής καταπόνησης. Το πάχος του στρώματος των ατόμων άνθρακα επηρεάζεται από την θέση τους στην φλόγα. Καθώς η αιθάλη κινούταν διαμέσου της περιοχής αυξανόμενης θερμοκρασίας προέκυψε μείωση της μέσης τιμής του πάχους στρώματος των ατόμων άνθρακα. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα από την περιοχή μετά την φλόγα και από την ενεργό φλεγόμενη περιοχή έδειξαν μία ελαφρώς μεγαλύτερη τιμή του πάχους του στρώματος των ατόμων άνθρακα για τις μεγαλύτερες φλόγες, που ίσως να αντανακλά στο γεγονός ότι η αιθάλη σχηματίζεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες σε αυτές τις φλόγες.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Fr: ο αριθμός Froude ($Fr=V/\sqrt{gD}$)

D: η διάμετρος της φλόγας

H: το ύψος δειγματοληψίας

R₁: ο ρυθμός σχηματισμού πυρήνων της αιθάλης

k₁: η σταθερά ρυθμού σχηματισμού πυρήνων της αιθάλης

R₂: ο ρυθμός ανάπτυξης αιθάλης

[A]: η συγκέντρωση του A σε kmol/m³ μίγματος

k₂: η σταθερά ρυθμού ανάπτυξης αιθάλης

T: θερμοκρασία

t: χρόνος

S: η συνολική επιφάνεια της αιθάλης



d_p : η διάμετρος των σωματιδίων της αιθάλης

N : ο αριθμός των σωματιδίων της αιθάλης ανά kg μείγματος

Y_k : το κλάσμα μάζας των ειδών k

M : η μοριακή μάζα του στοιχείου

R_3 : ο ρυθμός οξείδωσης αιθάλης

k_3 : η σταθερά ρυθμού οξείδωσης αιθάλης

R_4 : ο ρυθμός δημιουργίας πυρήνων

k_4 : η σταθερά ρυθμού δημιουργίας πυρήνων

N_A : ο αριθμός Avogadro ($6.022 \cdot 10^{26}$ σωματίδια/kmol)

C_{min} : ο αριθμός των ατόμων άνθρακα στο νέο σωματίδιο αιθάλης (100)

k : η σταθερά Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K)

$\rho_{c(s)}$: η πυκνότητα της αιθάλης

C_a : η σταθερά του ρυθμού συσσωμάτωσης, στην οποία αποδίδεται η τιμή 9.0

F_T : η δύναμη θερμοφόρησης ή η οπισθέλκουσα δύναμη (που είναι ίσες)

C_T : σταθερά

K_n : αριθμός Knusen

ν : το δυναμικό ιξώδες

∇T : η κλίση της θερμοκρασίας

T_m : η μέση θερμοκρασία στο χώρο γύρω από το σωματίδιο

U_T : η ταχύτητα της θερμοφόρησης



μ : το ιξώδες του περιβάλλοντος αερίου

r : η ακτίνα του σωματιδίου

ρ_g : η πυκνότητα του περιβάλλοντος αερίου

α : η απόδοση του καπνού

F : είναι το κλάσμα της μάζας του άνθρακα του καυσίμου

m_s : η μάζα του δείγματος του καπνού που συλλέχθηκε πάνω στο φίλτρο

n_t : ο αριθμός των moles του αέρα της δειγματοληψίας

$\Delta X(\text{CO})$: κλάσμα moles του CO

$\Delta X(\text{CO}_2)$: κλάσμα moles του CO₂

$Y(D)$: η μέση κατανομή των πρωτογενών σφαιρών

$n(D)$: ο αριθμός των πρωτογενών σφαιρών με διάμετρο D

C : αναλογική σταθερά

$V(D)$: η κατανομή όγκου των πρωτογενών σφαιρών

D_o : η μέση διάμετρος της πρωτογενούς σφαίρας

$V^1(D)$: κανονικοποιημένη κατανομή όγκου

d_{002} : το πάχος του στρώματος των ατόμων άνθρακα



7. ΚΕΦΑΛΑΙΟ-ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΠΡΟΣΚΕΙΜΕΝΩΝ ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ

7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι δεξαμενές αποθήκευσης στην βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου περιέχουν μεγάλες ποσότητες εύφλεκτων υδρογονανθράκων των οποίων οι χωρητικότητες ποικίλουν από μερικές εκατοντάδες μέχρι μερικά εκατομμύρια βαρέλια. Σύμφωνα με την βιομηχανική εμπειρία, μία πυρκαγιά σε ένα τέτοιο εξοπλισμό είναι τεράστια και πρέπει να περιοριστεί. Λόγω της μεγάλης έκτασης και έντασής της η πυρκαγιά μπορεί να επιφέρει σημαντικές καταστροφές στον εξοπλισμό και στο περιβάλλον.

Λαμβάνοντας υπόψιν την δυνητική σοβαρότητα των ατυχημάτων αυτών, συμπεριλαμβανομένων των φαινομένων ντόμινο (domino effects) που μπορούν να εμφανιστούν, προκύπτουν τα διάφορα προληπτικά μέτρα για την προστασία των δεξαμενών. Τα μέτρα αυτά είναι δυνατόν να περιλαμβάνουν τις αποστάσεις ασφαλείας, την θερμική μόνωση ή την παροχή νερού για καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Αυτά τα μέτρα θα μπορούσαν να ρυθμίσουν ή να μειώσουν την πιθανότητα διάρρηξης ή καταστροφής μίας δεξαμενής από μία πυρκαγιά που αναπτύσσεται κοντά της.

Η χρήση του νερού ως μέτρο προστασίας είναι ιδιαίτερα σημαντική για την εκτίμηση της απόστασης μεταξύ των δεξαμενών, για την προστασία των δεξαμενών και τον καθορισμό του επίπεδου προστασίας που απαιτείται για τις δεξαμενές που είναι ήδη κατασκευασμένες [107]. Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει η ανάλυση της προστασίας των προσκείμενων δεξαμενών με χρήση συστημάτων παροχής νερού ψύξης, θα μελετηθεί πως επιδρά η ακτινοβολία της φλεγόμενης δεξαμενής στην προσκείμενη δεξαμενή συναρτήσει της απόστασης μεταξύ τους, αλλά και πως επιδρούν οι διαστάσεις της φλεγόμενης και της προσκείμενης δεξαμενής στις απαιτήσεις για νερό ψύξης της προσκείμενης δεξαμενής.



7.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΨΥΞΗΣ

Ο τύπος και το επίπεδο της προστασίας είναι οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν την ποσότητα του νερού (water application rate) που απαιτείται, ενώ το σύστημα των σωληνώσεων ψύξης σχεδιάζεται για να μεταφέρει την απαιτούμενη ποσότητα νερού με το μεγαλύτερο πρακτικό ενδιαφέρον [107].

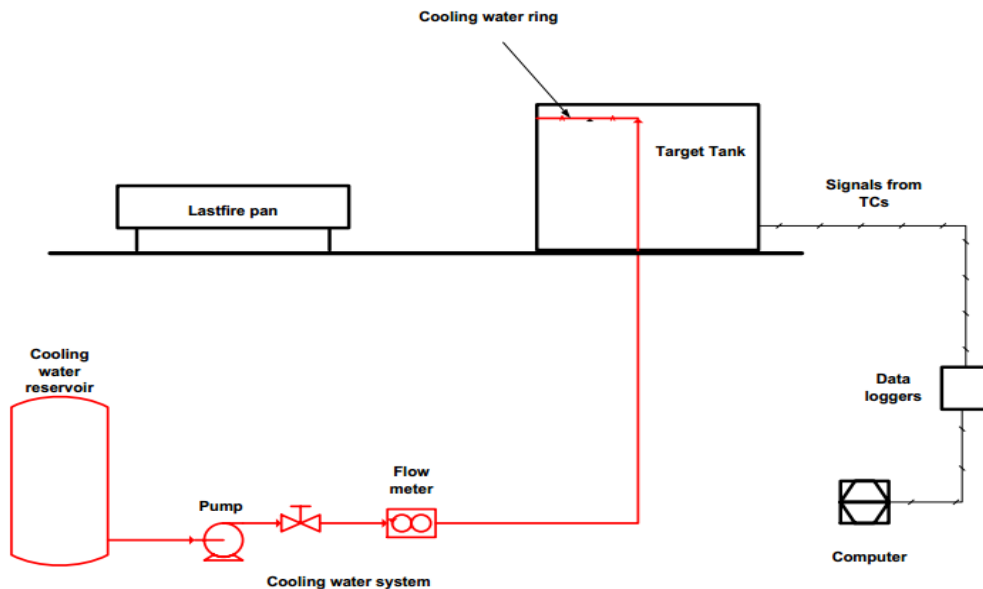
Υπάρχουν περιορισμένες πληροφορίες ή έρευνες σχετικά με τις επιδόσεις ενός συστήματος ψύξης ως προς την προστασία των προσκείμενων δεξαμενών υπό την επίδραση πυρκαγιών διαφόρων υδρογονανθράκων. Επομένως, η ομάδα LASTFIRE [108] διεξήγαγε μία σειρά από δοκιμές με στόχο την κατανόηση των παραγόντων που επιδρούν στην αλληλεπίδραση του νερού ψύξης με τις πυρκαγιές υδρογονανθράκων που αναπτύσσονται σε μεγάλες εκτάσεις δεξαμενών.

Η δημιουργία των ξηρών περιοχών αποτελεί μία βασική αδυναμία των συστημάτων ψύξης, διότι οι ξηρές περιοχές μπορούν να μείνουν εκτεθειμένες αφήνοντας ένα τμήμα του τοιχίου της δεξαμενής απροστάτευτο. Οι ξηρές περιοχές μπορούν να σχηματιστούν λόγω του γεγονότος ότι το νερό μπορεί να βράσει (boil off) πριν φτάσει τον πυθμένα του τοιχίου της προστατευόμενης δεξαμενής ή λόγω της δυσλειτουργίας του συστήματος [108].

Η ομάδα LASTFIRE [108] μελέτησε την τεχνική του εκνεφώματος νερού (water spray), την τεχνική του υδάτινου φιλμ (water film) και την τεχνική της κουρτίνας (water curtain) για την παροχή του νερού ψύξης στο σύστημα. Συγκεκριμένα, οι τεχνικές αυτές δρουν με τους εξής τρόπους:

- ❖ **Water curtain ή κουρτίνα νερού:** με την τεχνική αυτή το νερό ρέει από πάνω προς τα κάτω, ενώ δεν βρίσκεται σε απευθείας επαφή με το τοίχιο της προστατευόμενης δεξαμενής.
- ❖ **Water film ή υδάτινο φιλμ:** με την τεχνική αυτή το νερό ρέει από πάνω προς τα κάτω, ενώ βρίσκεται σε επαφή με το τοίχιο της προστατευόμενης δεξαμενής
- ❖ **Water spray ή εκνέφωμα:** με την τεχνική αυτή γίνεται ο ψεκασμός του νερού πάνω στο τοίχιο της προστατευόμενης δεξαμενής [108].

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποίησε η ομάδα LASTFIRE [108] αποτελούταν από μία δεξαμενή στην οποία αναπτύχθηκε η φλόγα, μία προσκείμενη δεξαμενή που βρισκόταν υπό μελέτη και ένα σύστημα παροχής νερού ψύξης. Η γενική μορφή της πειραματικής διάταξης δίνεται στην Εικόνα 7.1.



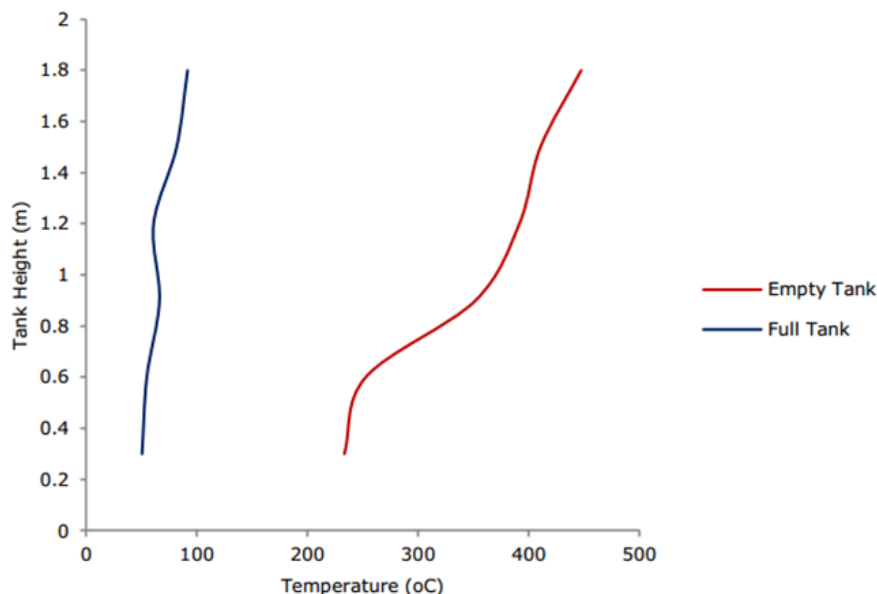
Εικόνα 7.1 Γενική μορφή της πειραματικής διάταξης της ομάδας LASTFIRE [108].

Η προσκείμενη δεξαμενή είχε διάμετρο 2.46 m και βάθος 2 m, ενώ η φλεγόμενη δεξαμενή είχε διάμετρο 2.44 m και βάθος 0.6 m. Στην προσκείμενη δεξαμενή τοποθετήθηκαν 32 θερμοστοιχεία προκειμένου να παρακολουθείται η θερμοκρασία και οι μεταβολές της σε όλη την έκτασή της. Τα θερμοστοιχεία τοποθετήθηκαν στο εσωτερικό του τοιχίου της δεξαμενής και σε βάθος 3 mm κάτω από την εξωτερική της επιφάνεια. Από την κορυφή της προσκείμενης δεξαμενής έρεε νερό ψύξης με ελάχιστη τιμή της ταχύτητας παροχής του ίση με $2\text{L}/\text{min}/\text{m}^2$. Η τιμή αυτή για την ταχύτητα παροχής νερού ψύξης προέκυψε από το Μοντέλο του Κώδικα Ασφαλούς Λειτουργίας (Model Code of Safe Practice, Part 19) [108].

Κατά την πειραματική διαδικασία προέκυψαν τιμές για την θερμοκρασία της προσκείμενης δεξαμενής σε διαφορετικές αποστάσεις ανάμεσα στις δεξαμενές. Οι αποστάσεις ανάμεσα στις δεξαμενές ήταν 0.5D, 1D και 1.5D, όπου D η διάμετρος της

φλεγόμενης δεξαμενής. Οι τιμές της θερμοκρασίας της προσκείμενης δεξαμενής μετρήθηκαν σε τέσσερα σημεία της δεξαμενής και ειδικότερα στο τμήμα της δεξαμενής που βρισκόταν κοντά στην φλεγόμενη δεξαμενή. Τέλος, έλαβαν χώρα μετρήσεις της θερμοκρασίας τόσο με ταυτόχρονη ψύξη της δεξαμενής όσο και χωρίς ψύξη της δεξαμενής. Οι μετρήσεις που λήφθηκαν απουσία ψύξης θεωρήθηκαν ως οι μετρήσεις αναφοράς. Οι καιρικές συνθήκες ήταν παρόμοιες κατά την διεξαγωγή όλων των δοκιμών.

Αρχικά, έγινε η μελέτη μίας άδειας δεξαμενής χωρίς την παροχή ψύξης. Από την μελέτη αυτή προέκυψε πως εμφανιζόταν μεγάλη θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στην βάση και στην κορυφή της δεξαμενής. Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας στην προσκείμενη δεξαμενή εμφάνιζαν μία χωρική μεταβολή κατά μήκος της περιφέρειάς της. Η μείωση της απόστασης μεταξύ των δεξαμενών μείωσε σημαντικά την θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στην βάση και την κορυφή της δεξαμενής. Τέλος, εμφανιζόταν αμελητέα θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στην εσωτερική και στην εξωτερική επιφάνεια του τοιχίου της δεξαμενής λόγω της καλής αγωγιμότητας που εμφανίζει το ατσάλι και του χαμηλού πάχους του τοιχίου της.



Διάγραμμα 7.1 Σύγκριση ανάμεσα στην θερμοκρασία του τοιχίου μίας άδειας δεξαμενής και στην θερμοκρασία του τοιχίου μίας δεξαμενής που είναι γεμάτη με νερό κατά την πειραματική μελέτη της ομάδας LASTFIRE [108].



Στην συνέχεια μελετήθηκε η κατανομή θερμοκρασίας σε μία δεξαμενή γεμάτη με νερό χωρίς την παροχή ψύξης. Από την μελέτη αυτή προέκυψε πως καθώς εισερχόταν η θερμότητα από το ζεστό τοιχίο της δεξαμενής το νερό που βρισκόταν κοντά στο τοιχίο θερμαινόταν ταχύτερα από το νερό που βρισκόταν στην υπόλοιπη δεξαμενή. Επομένως, η πυκνότητα του θερμότερου νερού έγινε μικρότερη από την πυκνότητα του ψυχρότερου νερού και προκλήθηκε την ροή του νερού υπό την μορφή ενός λεπτού, θερμού, οριακού στρώματος. Η σταθερά μεταφοράς θερμότητας του υγρού είναι ένας σημαντικός παράγοντας κατά την διαδικασία μεταφοράς θερμότητας, καθώς εμφανίζει σημαντική επίδραση στην θερμοκρασία του τοιχίου της δεξαμενής. Η θερμοκρασία του τοιχίου της δεξαμενής δεν ξεπερνούσε το σημείο βρασμού του νερού, ακόμα και σε απόσταση $0.5D$ ανάμεσα στις δεξαμενές. Ωστόσο, οι μετρήσεις των θερμοκρασιών εμφάνισαν μία διακύμανση. Η διακύμανση αυτή παρατηρήθηκε λόγω της φυσικής συναγωγής που συμβαίνει κοντά στο τοιχίο της δεξαμενής. Η κατανομή της θερμοκρασίας στο τοιχίο της δεξαμενής που ήταν γεμάτη με νερό ακολουθούσε την ίδια συμπεριφορά με την περίπτωση μίας άδειας που ερχόταν σε επαφή με τον αέρα. Στην περίπτωση μίας γεμάτης δεξαμενής, πρέπει να ληφθούν υπόψιν τόσο η θερμική φόρτιση όσο και η υδροστατική πίεση, ενώ στην περίπτωση της άδειας δεξαμενής δεν υπάρχει η υδροστατική πίεση. Το Διάγραμμα 7.1 δείχνει την διαφορά στην θερμοκρασία ανάμεσα σε μία άδεια και σε μία γεμάτη δεξαμενή. Από το διάγραμμα αυτό προέκυψε ότι η θερμοκρασία του τοιχίου που ήταν εκτεθειμένο στην φλόγα μπορούσε να μειωθεί σημαντικά λόγω της απορρόφησης θερμότητας από το αποθηκευμένο υγρό.

7.2.1 ΤΕΧΝΙΚΗ WATER CURTAIN

Η τεχνική της κουρτίνας νερού (water curtain) βασίζεται στη χρήση μίας διάταξης που παρέχει νερό ψύξης και θεωρείται χρήσιμη για τον υπολογισμό σημαντικών βιομηχανικών κινδύνων. Το συγκεκριμένο σύστημα ψύξης εμφανίζει ένα σύνολο από πλεονεκτήματα, όπως είναι η απλότητα, η αποτελεσματικότητα και η δυνατότητα προσαρμογής σε διαφορετικές συνθήκες κινδύνων.

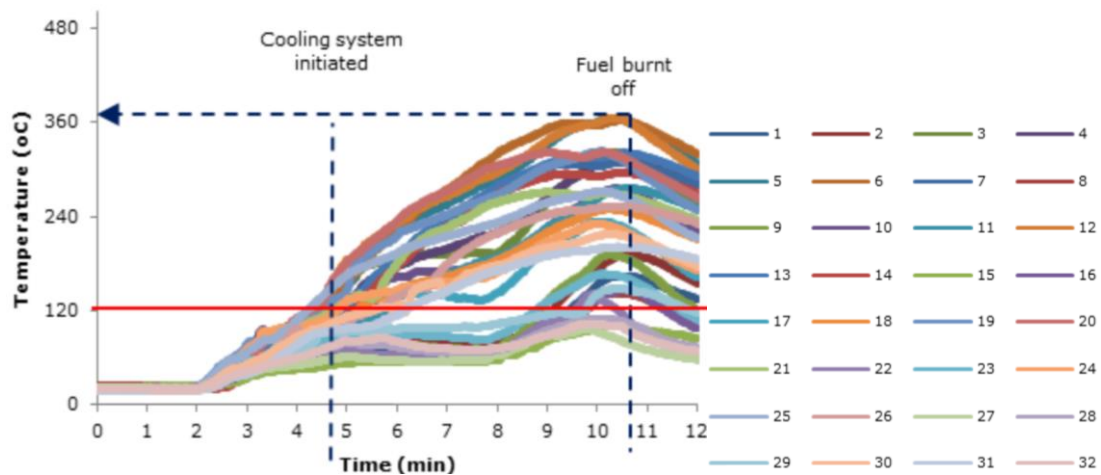
Η κουρτίνα νερού (water curtain) του συστήματος προστασίας των προσκείμενων δεξαμενών συμπεριφέρεται ως φίλτρο. Επομένως, μειώνει σημαντικά την προσπίπτουσα θερμική ακτινοβολία στις προσκείμενες δεξαμενές αποθήκευσης. Η διάταξη για την παροχή του νερού ψύξης περιλαμβάνει έναν σταθερό δακτυλιοειδή σωλήνα που είναι εγκατεστημένος γύρω από το ανώτερο τμήμα του τοιχίου της δεξαμενής και είναι συνδεδεμένος με μία παροχή νερού. Μία τέτοια διάταξη είναι σχεδιασμένη για να παρέχει ελεγχόμενη προστασία από την έκθεση στην προσπίπτουσα θερμική ακτινοβολία. Το νερό ψύξης συνήθως βρίσκεται γύρω από την δεξαμενή προκειμένου να παρέχεται συνεχώς, να καλύπτει και να προστατεύει το εκτεθειμένο τοίχωμα της δεξαμενής. Η θερμική προστασία συμβαίνει άμεσα ως αποτέλεσμα του νερού που βρίσκεται στο τοίχωμα της δεξαμενής. Επιπλέον, η θερμική προστασία οφείλεται τόσο στην φάση των σταγονιδίων του νερού όσο και στο προσπίπτον στρώμα του <<καταρράκτη>> που δημιουργείται [108].



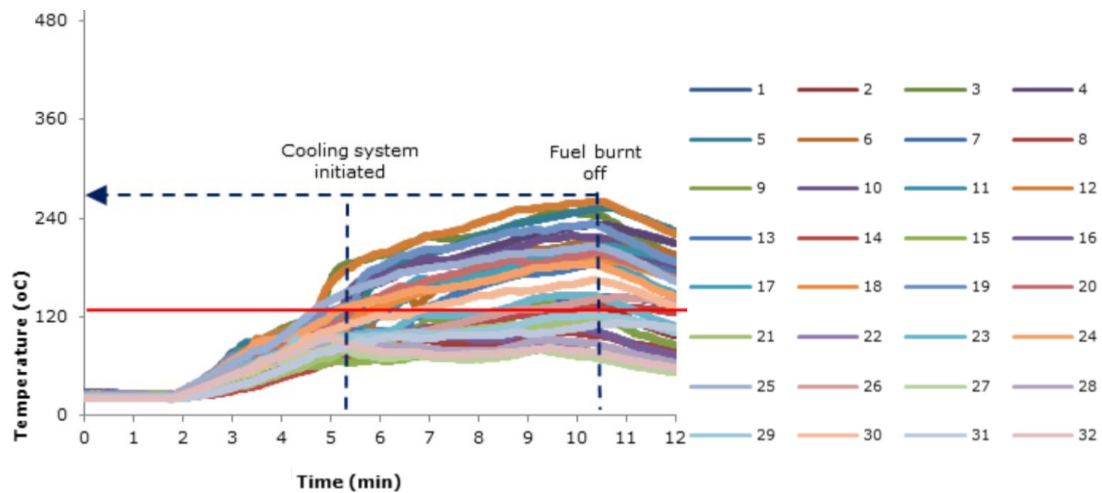
Εικόνα 7.2 Εφαρμογή της τεχνικής water curtain για την ψύξη μίας δεξαμενής [108].

Η εφαρμογή της τεχνικής αυτής είναι πολύ περιορισμένη. Παρατηρήθηκε ότι η φλόγα μπορεί εύκολα να διεισδύσει στην κουρτίνα νερού και να κατακλύσει την

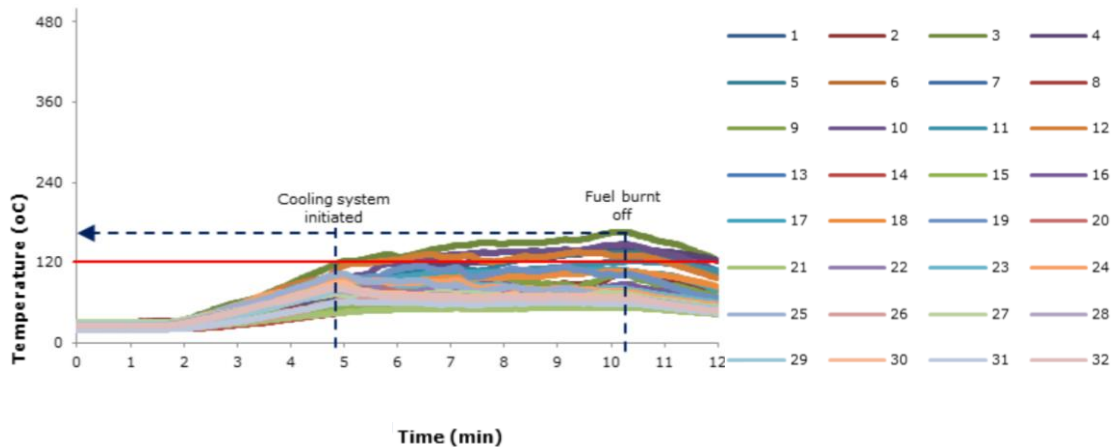
δεξαμενή, ειδικά σε πιο κοντινές αποστάσεις. Τα Διαγράμματα 7.2, 7.3 και 7.4 δείχνουν τις μετρήσεις της θερμοκρασίας που πραγματοποιήθηκαν κατά την πειραματική μελέτη της ομάδας LASTFIRE σε μία άδεια δεξαμενή που προστατευόταν με χρήση της τεχνικής με την κουρτίνα νερού. Συγκρίνοντας αυτές τις μετρήσεις με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των άλλων τεχνικών είναι προφανές ότι η τεχνική με την κουρτίνα νερού δεν παρέχει σημαντικό όφελος στην μείωση του φορτίου της θερμικής ακτινοβολίας στην πλευρά της δεξαμενής που είναι εκτεθειμένη στην πυρκαγιά, υπό την προϋπόθεση ότι οι καιρικές συνθήκες ήταν παρόμοιες και για όλες τις δοκιμές.



Διάγραμμα 7.2 Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας της προσκείμενης δεξαμενής που προστατεύεται με την τεχνική water curtain και βρίσκεται σε απόσταση 0.5D από την δεξαμενή που φλέγεται σύμφωνα με την πειραματική μελέτη της ομάδας LASTFIRE [108]. Δεξιά δίνονται τα θερμοστοιχεία της δεξαμενής που έχουν σημειωθεί με διαφορετικά χρώματα.



Διάγραμμα 7.3 Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας της προσκείμενης δεξαμενής που προστατεύεται με την τεχνική water curtain και βρίσκεται σε απόσταση 1D από την δεξαμενή που φλέγεται σύμφωνα με την πειραματική μελέτη της ομάδας LASTFIRE [108]. Δεξιά δίνονται και τα θερμοστοιχεία της δεξαμενής που έχουν σημανθεί με διαφορετικά χρώματα.

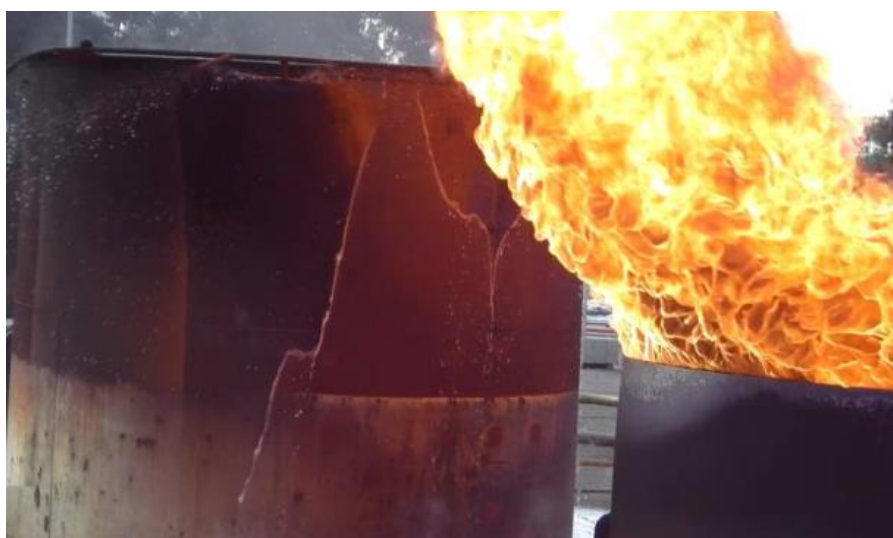


Διάγραμμα 7.4 Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας της προσκείμενης δεξαμενής που προστατεύεται με την τεχνική water curtain και βρίσκεται σε απόσταση 1.5D από την δεξαμενή που φλέγεται σύμφωνα με την πειραματική μελέτη της ομάδας LASTFIRE [108]. Δεξιά δίνονται και τα θερμοστοιχεία της δεξαμενής που έχουν σημανθεί με διαφορετικά χρώματα.

Τα Διαγράμματα 7.2, 7.3 και 7.4 υπέδειξαν ότι οι μετρήσεις των θερμοστοιχείων αυξήθηκαν σημαντικά και έφτασαν πάνω από τους 120° C, ιδιαίτερα σε απόσταση 0.5 D. Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις των θερμοστοιχείων διατηρήθηκαν κάτω από τους 120° C για 3 λεπτά και στην συνέχεια άρχισαν να αυξάνονται. Για την απόσταση των 1.5 D οι περισσότερες μετρήσεις εμφάνιζαν τιμές κάτω από τους 120° C, επειδή δεν υπήρχε επαφή ανάμεσα στην φλόγα και στην κουρτίνα νερού (water curtain). Επίσης, είναι προφανές ότι το θερμαινόμενο τμήμα της εκτεθειμένης πλευράς της δεξαμενής ήταν το άνω μέρος της, το οποίο εμφάνιζε παρόμοια τάση με τις δεξαμενές που δεν είχαν διάταξη ψύξης [108].

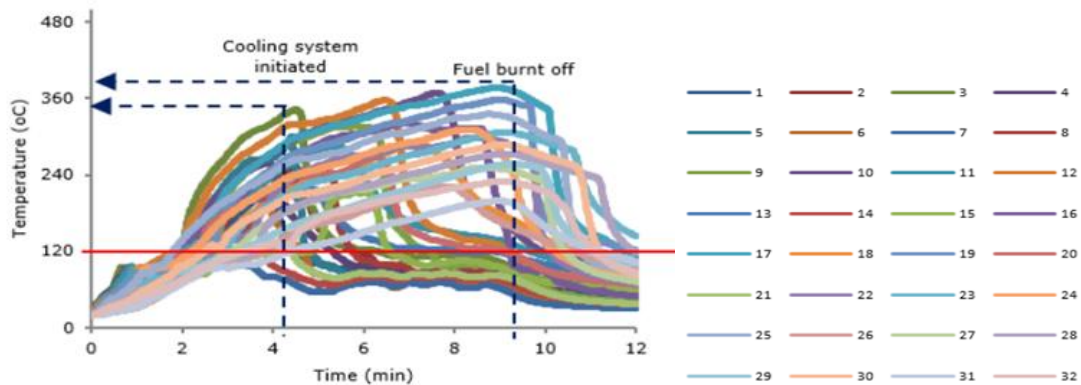
7.2.2 ΤΕΧΝΙΚΗ WATER FILM

Η τεχνική ψύξης της δεξαμενής με την χρήση ενός στρώματος νερού (water film) εφαρμόζεται σε απευθείας επαφή με το τοιχίο της δεξαμενής. Συγκεκριμένα, κατά την τεχνική αυτή το νερό ρέει από πάνω προς τα κάτω, ενώ έρχεται σε απευθείας επαφή με τα τοιχία της προστατευόμενης δεξαμενής.

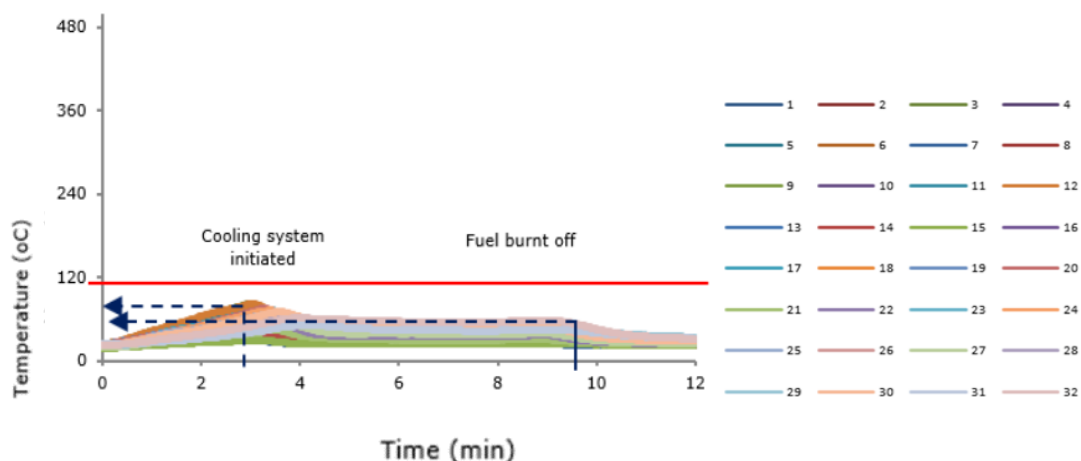


Εικόνα 7.3 Εφαρμογή της τεχνικής water film για την ψύξη μίας δεξαμενής [108].

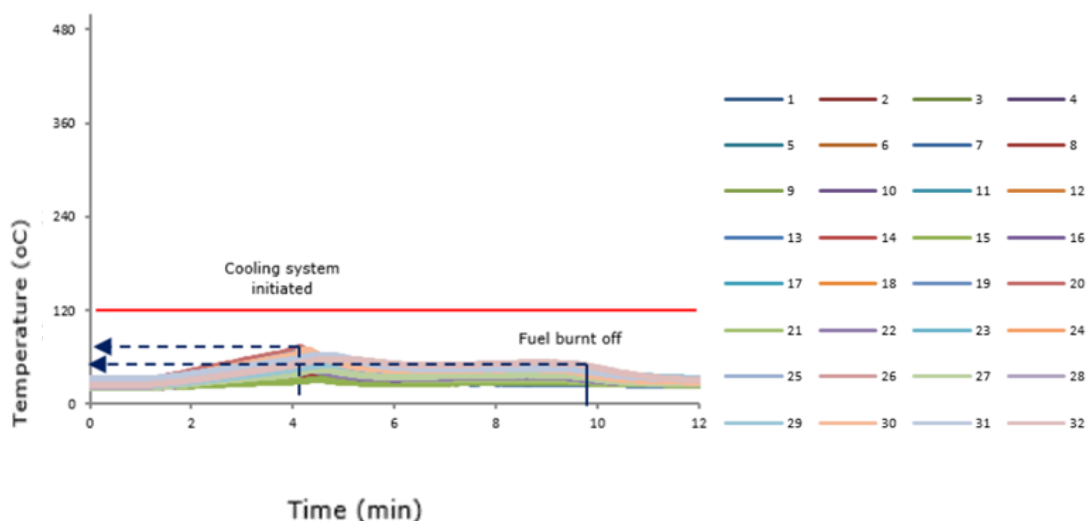
Μετά την εκκίνηση της λειτουργίας του συστήματος ψύξης κατά την πειραματική μελέτη της ομάδας LASTFIRE [108], παρατηρήθηκε πως το στρώμα του νερού (water film) έφτασε εγκαίρως σε μόνιμες συνθήκες για τα θερμοστοιχεία που ήταν τοποθετημένα στην κορυφή της δεξαμενής, δηλαδή 1 έως 7. Σε χαμηλότερα σημεία του τοιχίου της δεξαμενής η θερμοκρασία του τοιχίου δεν γινόταν μεγαλύτερη από τους 120° C. Αυτή η συμπεριφορά παρατηρήθηκε επειδή στα χαμηλότερα σημεία το υδάτινο φιλμ χρειάστηκε περισσότερο χρόνο για να δράσει με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του τοιχίου να ξεπεράσει τους 120° C. Ωστόσο, μόλις η ροή του νερού αναπτύχθηκε πλήρως, η ταχύτητα αύξησης της θερμοκρασίας μειώθηκε. Η μέγιστη θερμοκρασία του τοιχίου σε απόσταση 0.5D από την φλεγόμενη δεξαμενή ήταν 375° C. Το φαινόμενο της προστασίας της προσκείμενης δεξαμενής από το υδάτινο φιλμ εμφανίστηκε στις αποστάσεις 1D και 1.5D. Σε αυτές τις αποστάσεις εκτιμήθηκε πως η μείωση της θερμοκρασίας του τοιχίου της δεξαμενής έφτασε το ποσοστό των 70 % και η θερμοκρασία του τοιχίου παρέμεινε κάτω από τους 120° C [108].



Διάγραμμα 7.5 Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας της προσκείμενης δεξαμενής που προστατεύεται με την τεχνική water film και βρίσκεται σε απόσταση 0.5D από την δεξαμενή που φλέγεται σύμφωνα με την πειραματική μελέτη της ομάδας LASTFIRE[108]. Δεξιά δίνονται και τα θερμοστοιχεία της δεξαμενής που έχουν σημειωθεί με διαφορετικά χρώματα.



Διάγραμμα 7.6 Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας της προσκείμενης δεξαμενής που προστατεύεται με την τεχνική water film και βρίσκεται σε απόσταση 1D από την δεξαμενή που φλέγεται σύμφωνα με την πειραματική μελέτη της ομάδας LASTFIRE[108]. Δεξιά δίνονται και τα θερμοστοιχεία της δεξαμενής που έχουν σημειωθεί με διαφορετικά χρώματα.



Διάγραμμα 7.7 Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας της προσκείμενης δεξαμενής που προστατεύεται με την τεχνική water film και βρίσκεται σε απόσταση 1.5D από την δεξαμενή που φλέγεται σύμφωνα με την πειραματική μελέτη της ομάδας LASTFIRE[108]. Δεξιά δίνονται και τα θερμοστοιχεία της δεξαμενής που έχουν σημειωθεί με διαφορετικά χρώματα.

Η εφαρμογή της τεχνικής water film μελετήθηκε από την ομάδα LASTFIRE [108]. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής φαίνονται στα Διαγράμματα 7.5, 7.6 και 7.7. Στην απόσταση των 0.5D παρατηρήθηκε ότι η προσκείμενη δεξαμενή κατακλύστηκε από την φωτιά για ορισμένο χρόνο. Αυτό προκάλεσε υπερθέρμανση του σωλήνα του συστήματος ψύξης και ως εκ τούτου η ροή του νερού σταθεροποιήθηκε 50 δευτερόλεπτα μετά από την έναρξη της λειτουργίας του συστήματος. Στην διάρκεια των 50 δευτερολέπτων εξήλθε ατμός από τα ακροφύσια του συστήματος ψύξης. Επομένως, η φλόγα εξάτμισε το υδατινό φιλμ αφήνοντας εκτεθειμένη μία μεγάλη περιοχή της δεξαμενής προς την επιφάνεια της φλόγας.

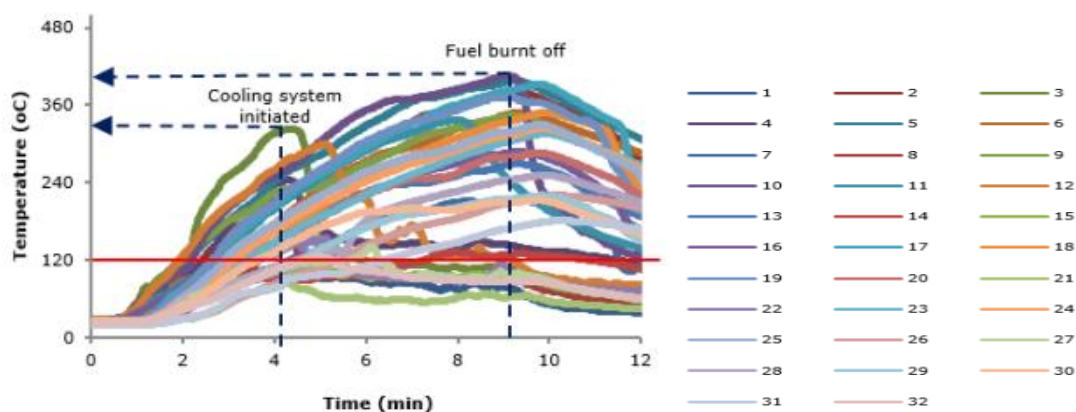
7.2.3 ΤΕΧΝΙΚΗ WATER SPRAY

Κατά την εφαρμογή της τεχνικής ψύξης της δεξαμενής με ψεκασμό νερού (water spray) γίνεται απευθείας ψεκασμός νερού πάνω στο τοιχίο της προσκείμενης δεξαμενής.

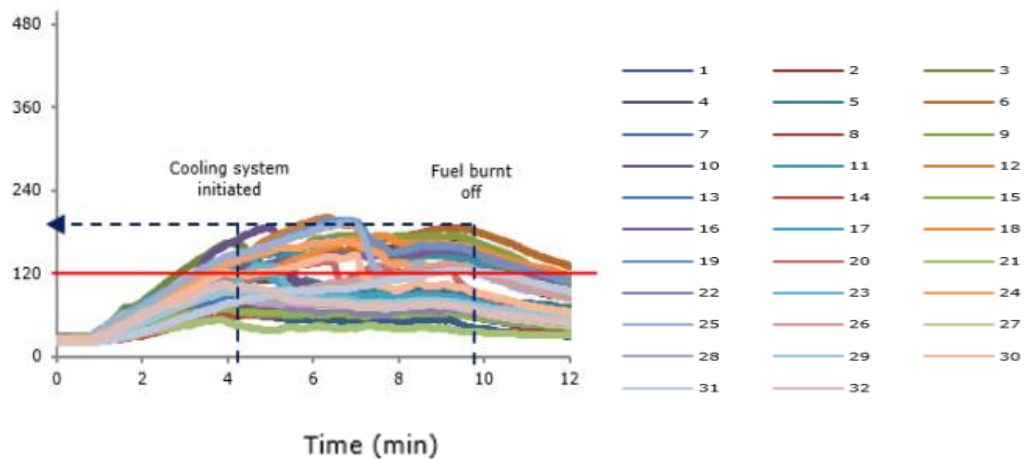


Εικόνα 7.4 Εφαρμογή της τεχνικής water spray για την ψύξη μίας δεξαμενής [108].

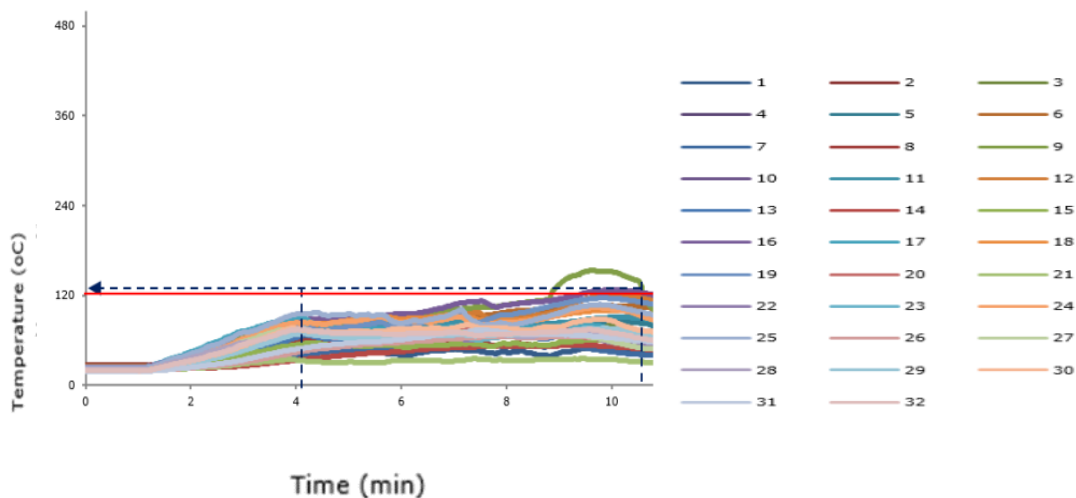
Κατά την πειραματική μελέτη της ομάδας LASTFIRE [108], η εφαρμογή της τεχνικής του εκνεφώματος νερού ξεκίνησε 3 λεπτά μετά την ανάφλεξη και η ροή της αναπτύχθηκε πλήρως 50 δευτερόλεπτα μετά την έναρξη της εφαρμογής της. Για κάποια θερμοστοιχεία σε ορισμένες θέσεις, π.χ. 3 και 4, χρησιμοποιήθηκε ένα στρώμα νερού (water film) προκειμένου η θερμοκρασία του να πέσει κάτω από τους 120° C. Στην θέση 17, έγινε χρήση του στρώματος νερού (water film) για 6 λεπτά, διότι η αρχική θερμοκρασία του τοιχίου ήταν μεγαλύτερη από 120° C. Σε ορισμένες θέσεις θερμοστοιχείων έγινε σαφές ότι μόλις η ροή του νερού αναπτύχθηκε πλήρως η ταχύτητα αύξησης της θερμοκρασίας άρχισε να μειώνεται, ενώ η θερμοκρασία στα υπόλοιπα θερμοστοιχεία συνέχισε να αυξάνεται. Η τεχνική με το εκνέφωμα νερού παρείχε πλήρη προστασία σε απόσταση 1.5 D. Η θερμοκρασία του τοιχίου σε αυτήν την περίπτωση διατηρήθηκε κάτω από τους 120°C [108].



Διάγραμμα 7.8 Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας της προσκείμενης δεξαμενής που προστατεύεται με την τεχνική water spray και βρίσκεται σε απόσταση 0.5D από την δεξαμενή που φλέγεται σύμφωνα με την πειραματική μελέτη της ομάδας LASTFIRE [108]. Δεξιά δίνονται και τα θερμοστοιχεία της δεξαμενής που έχουν σημειωθεί με διαφορετικά χρώματα.



Διάγραμμα 7.9 Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας της προσκείμενης δεξαμενής που προστατεύεται με την τεχνική water spray και βρίσκεται σε απόσταση 1D από την δεξαμενή που φλέγεται σύμφωνα με την πειραματική μελέτη της ομάδας LASTFIRE [108]. Δεξιά δίνονται και τα θερμοστοιχεία της δεξαμενής που έχουν σημανθεί με διαφορετικά χρώματα.



Διάγραμμα 7.10 Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας της προσκείμενης δεξαμενής που προστατεύεται με την τεχνική water spray και βρίσκεται σε απόσταση 1.5D από την δεξαμενή που φλέγεται σύμφωνα με την πειραματική μελέτη της ομάδας LASTFIRE [108]. Δεξιά δίνονται και τα θερμοστοιχεία της δεξαμενής που έχουν σημανθεί με διαφορετικά χρώματα.

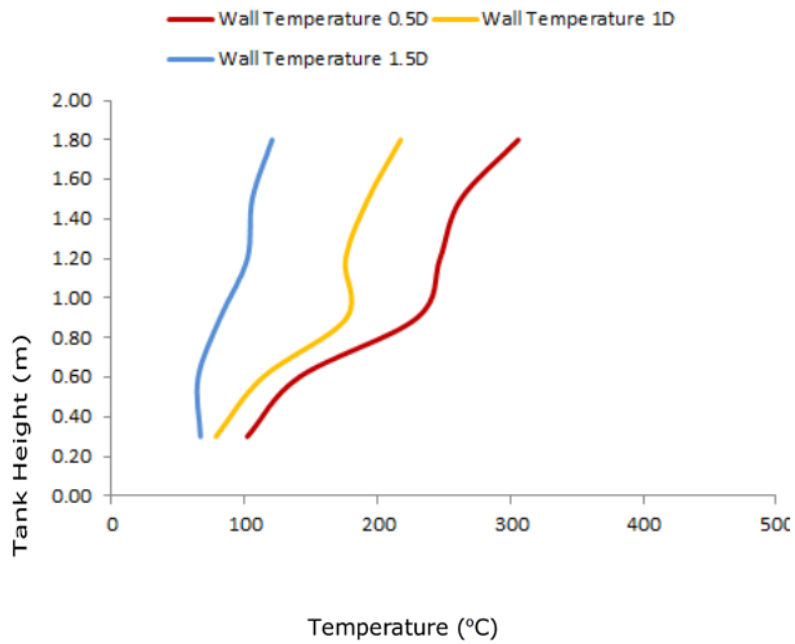


Τα αποτελέσματα κατά την εφαρμογή της τεχνικής αυτής φαίνονται στα Διαγράμματα 7.8, 7.9 και 7.10. Τα αποτελέσματα αυτά προέκυψαν από την πειραματική μελέτη της ομάδας LASTFIRE [108] και είναι ιδιαίτερα περίπλοκα. Η παροχή του νερού ψύξης με εκνέφωμα νερού δεν παρείχε επαρκή κάλυψη ολόκληρης της εκτεθειμένης επιφάνειας, ακόμα και στις δοκιμές που έλαβαν χώρα απουσία πυρκαγιάς. Αυτό συνέβη επειδή το εκτεθειμένο εμβαδόν ήταν σχετικά μικρό (7.73 m^2) με αποτέλεσμα να εμφανίζεται χαμηλή παροχή νερού ψύξης 18.5 L/min , συμπεριλαμβανομένων των απωλειών που είχαν ποσοστό ίσο με 20 %. Αυτή η ροή δεν επέτρεψε την εμφάνιση της μέγιστης τιμής του ψεκασμού από το ακροφύσιο.

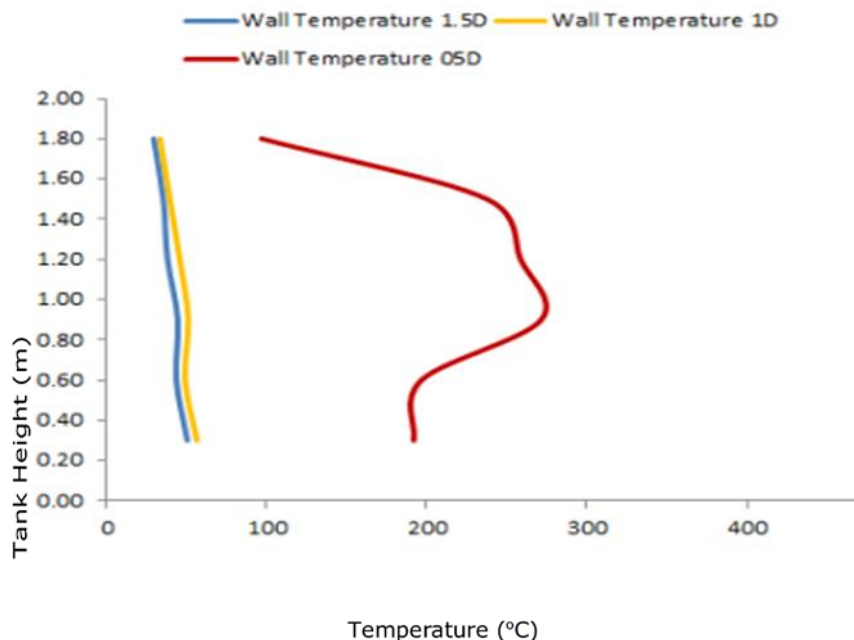
7.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ

Η παραπάνω ανάλυση περιλαμβάνει την μελέτη τριών τεχνικών παροχής νερού ψύξης. Οι τεχνικές που μελετήθηκαν ήταν η τεχνική παροχής νερού ψύξης με κουρτίνα, η τεχνική παροχής νερού ψύξης με υδάτινο φιλμ και η τεχνική παροχής νερού ψύξης με εκνέφωμα νερού.

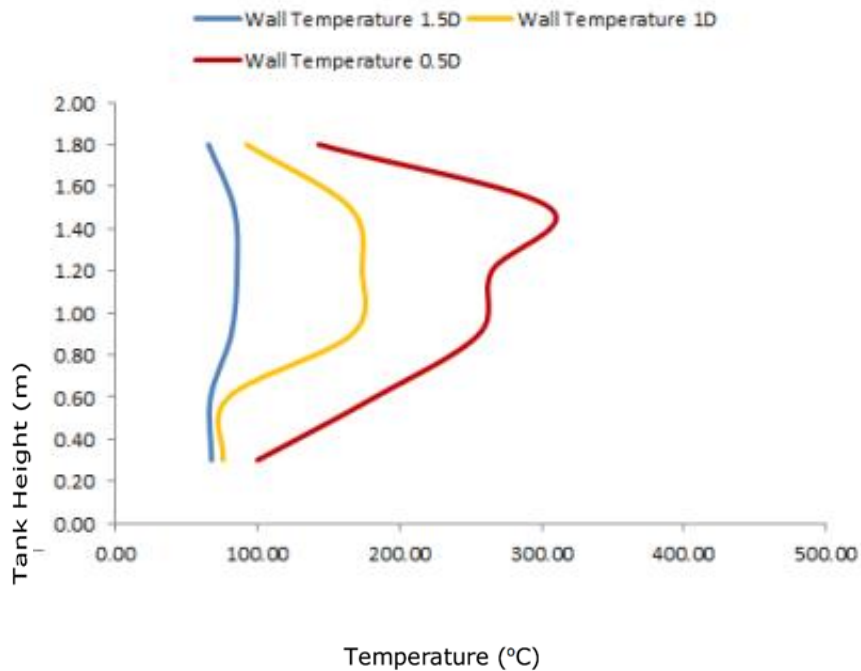
Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας των θερμοστοιχείων (αριθμοί 4 και 32) κατά την πειραματική μελέτη της ομάδας LASTFIRE [108], που βρίσκονταν στην κατακόρυφη γραμμή των δεξαμενών, για τις τρεις τεχνικές παρουσιάζονται στα παρακάτω Διαγράμματα 7.11, 7.12 και 7.13. Επιπλέον, στο Διάγραμμα 7.14 παρουσιάζονται οι μετρήσεις της θερμοκρασίας των αντίστοιχων θερμοστοιχείων για μία άδεια δεξαμενή που δεν διέθετε κάποιο σύστημα ψύξης. Το θερμοκρασιακό προφίλ σε αυτά τα διαγράμματα παρουσιάζεται συναρτήσεως του ύψους. Οι μεγάλες μεταβολές της θερμοκρασίας είναι εμφανείς με την μεταβολή του ύψους και στις τρεις δοκιμές. Οι τιμές αυτές συσχετίζονται σημαντικά με την προσπίπτουσα ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας.



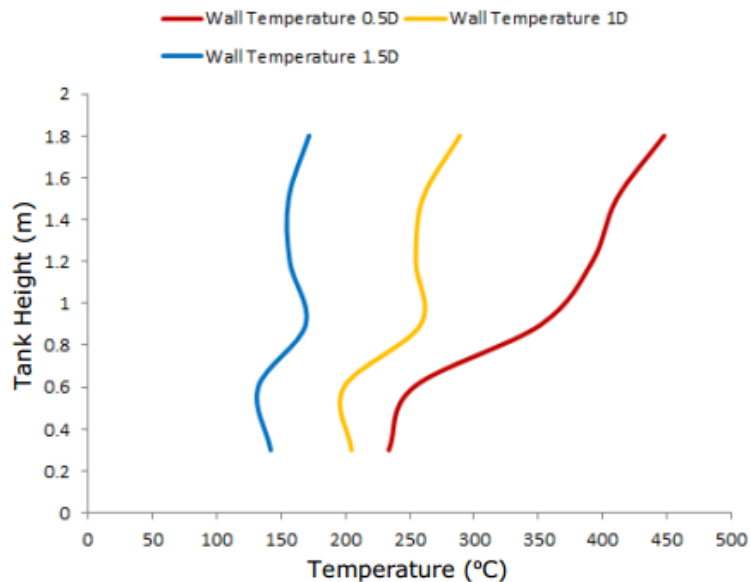
Διάγραμμα 7.11 Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας σε κατακόρυφη διεύθυνση για μία προσκείμενη δεξαμενή που προστατεύεται με την τεχνική water curtain σύμφωνα με την πειραματική μελέτη της ομάδας LASTFIRE [108].



Διάγραμμα 7.12 Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας σε κατακόρυφη διεύθυνση για μία προσκείμενη δεξαμενή που προστατεύεται με την τεχνική water film σύμφωνα με την πειραματική μελέτη της ομάδας LASTFIRE [108].



Διάγραμμα 7.13 Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας σε κατακόρυφη διεύθυνση για μία προσκείμενη δεξαμενή που προστατεύεται με την τεχνική water spray σύμφωνα με την πειραματική μελέτη της ομάδας LASTFIRE [108].



Διάγραμμα 7.14 Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας σε κατακόρυφη διεύθυνση για μία άδεια προσκείμενη δεξαμενή που δεν διαθέτει σύστημα ψύξης σύμφωνα με την πειραματική μελέτη της ομάδας LASTFIRE [108].



Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με την χρήση ψύξης με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της άδειας δεξαμενής χωρίς ψύξη, προκύπτει ότι σε απόσταση 0.5D καμία από τις τρεις τεχνικές δεν μπορούν να προστατέψουν την δεξαμενή, θεωρώντας πως οι καιρικές συνθήκες ήταν παρόμοιες για όλες τις δοκιμές. Στην απόσταση αυτή η θερμοκρασία του τοιχίου της δεξαμενής ξεπέρασε τους 300° C. Ο λόγος εμφάνισης αυτής της συμπεριφοράς ήταν ότι η δεξαμενή που μελετήθηκε ήταν πολύ κοντά στην πυρκαγιά και καλύφθηκε από την φλόγα λόγω της σχετικά μεγάλης ταχύτητας του ανέμου. Το γεγονός αυτό δεν θα εμφανιζόταν σε μία δεξαμενή με μεγαλύτερη διάμετρο.

Η τεχνική παροχής νερού ψύξης με το υδάτινο φιλμ (water film) παρείχε πλήρη προστασία στις αποστάσεις των 1D και 1.5D, όπου η θερμοκρασία του τοιχίου της δεξαμενής δεν υπερέβαινε τους 120° C και βρισκόταν κάτω από το σημείο βρασμού του νερού. Η τεχνική με εκνέφωμα νερού και η τεχνική με κουρτίνα νερού παρείχαν ικανοποιητικά αποτελέσματα για την απόσταση των 1.5D. Στην περίπτωση αυτή η θερμοκρασία του τοιχίου της δεξαμενής παρέμενε κάτω από τους 120°C.

Γενικά, η ταχύτητα παροχής του νερού των 2 L/min/m² δεν ήταν επαρκής για την απόσταση των 0.5D σε όλες τις τεχνικές ψύξης. Αυτό παρατηρήθηκε ειδικότερα κατά την εφαρμογή της τεχνικής με τον ψεκασμό νερού (water spray) σε δεξαμενές με μικρή διάμετρο.

Το σύνολο των αποτελεσμάτων που προέκυψαν απέδειξαν πως το ταχύτερο ποσοστό θέρμανσης της προσκείμενης δεξαμενής εμφανίστηκε όταν η απόστασή της από την φλεγόμενη δεξαμενή ήταν ίση με 0.5 D. Σε αυτήν την περίπτωση και κατά την εφαρμογή της τεχνικής ψύξης με εκνέφωμα νερού παρατηρήθηκε ότι το νερό εξήλθε ως πίδακας νερού και όχι με την μορφή εκνεφώματος που θα μπορούσε να σχηματίσει ένα υδάτινο φιλμ στο τοίχιο της δεξαμενής. Αυτό το φαινόμενο παρατηρήθηκε επειδή η εκτεθειμένη περιοχή της προσκείμενης δεξαμενής ήταν πολύ μικρή (7.73 m²) και αυτό είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση χαμηλής ταχύτητας ροής του νερού ψύξης, που δεν επέτρεπε την βέλτιστη απόδοση της τεχνικής αυτής. Στις μεγαλύτερες δεξαμενές η ταχύτητα ροής του νερού ψύξης ήταν μεγαλύτερη και μπορούσε να σχηματιστεί ένα επαρκές υδάτινο στρώμα στην εκτεθειμένη επιφάνεια.



Επιπλέον, η φλόγα εξάτμισε το νερό όταν ήρθε σε επαφή με το τοίχιο της δεξαμενής [108].

7.4 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΕ ΝΕΡΟ ΨΥΞΗΣ

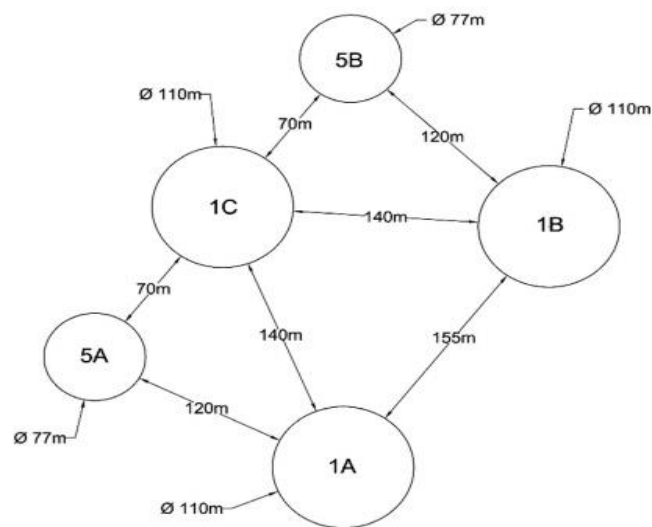
Η θερμοκρασία μίας μεταλλικής επιφάνειας μπορεί να διατηρηθεί κάτω από μία ορισμένη τιμή, εάν στην επιφάνεια αυτή βρεθεί μία ελάχιστη ποσότητα νερού. Η ποσότητα του νερού μπορεί να συνδεθεί στενά με την έκταση της έκθεσης και τον προβλεπόμενο τύπο προστασίας. Για έναν καθορισμένο τύπο προστασίας υπάρχουν συγκεκριμένοι παράγοντες για την εκτίμηση της ποσότητας του νερού που απαιτείται:

1. Σύμφωνα με τις τιμές που καθορίζονται από τους κώδικες και τα πρότυπα. Οι τιμές αυτές μερικές φορές δεν συμφωνούν μεταξύ τους.
2. Σύμφωνα με την προσπίπτουσα ακτινοβολία που μπορεί να λαμβάνει η προσκείμενη δεξαμενή και την μέγιστη επιτρεπόμενη παροχή θερμότητας στον εξοπλισμό. Η ακριβής απαίτηση για την ποσότητα του νερού εξαρτάται από την ένταση της θερμότητας που ακτινοβολείται, την απορροφητικότητα της επιφάνειας, την ταχύτητα του ανέμου και την απόσταση διαχωρισμού του εξοπλισμού από την πηγή ακτινοβολίας. Ακολουθώντας αυτήν την διαδικασία, αρχικά μπορεί να προσδιοριστεί η συνολική ακτινοβολία που λαμβάνεται από την παρακείμενη φωτιά και στην συνέχεια η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της ακτινοβολίας προς την δεξαμενή χρησιμοποιώντας μία από τις ακόλουθες τρεις μεθόδους.

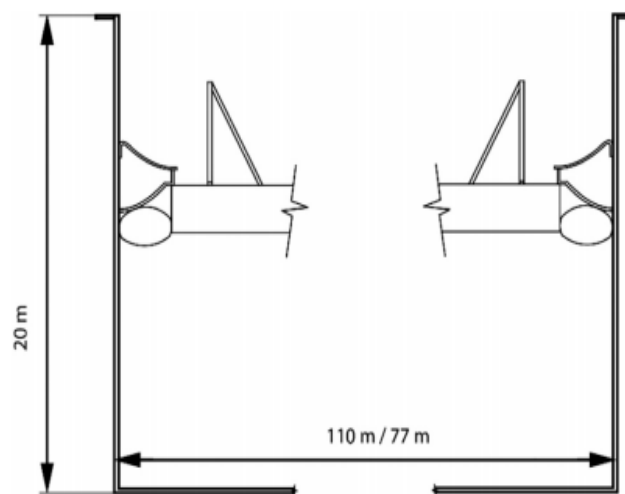
A) Την κρίσιμη θερμοκρασία του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένη η δεξαμενή αποθήκευσης. Αυτό το κριτήριο δεν είναι κατάλληλο για τον σχεδιασμό του συστήματος ψύξης, δεδομένου ότι η αυτόματη ανάφλεξη του εύφλεκτου υγρού επιτυγχάνεται πολύ πριν την κρίσιμη θερμοκρασία του υλικού της δεξαμενής αποθήκευσης.

Β) Την θερμοκρασία ανάφλεξης των περιεχομένων της δεξαμενής. Αυτό το κριτήριο καθορίζει την ποσότητα της επιτρεπόμενης εισροής θερμότητας και συνεπώς την απαιτούμενη ταχύτητα παροχής του νερού ψύξης.

Γ) Τις προτεινόμενες τιμές από τα πρότυπα της βιβλιογραφίας. Πολλοί μελετητές έχουν ερευνήσει τα επιτρεπόμενα όρια ροής θερμότητας για τις δεξαμενές αποθήκευσης. Οι τιμές αυτές πολλές φορές δεν συμφωνούν μεταξύ τους [107].



Εικόνα 7.5 Η διάταξη των δεξαμενών που χρησιμοποιήθηκαν στην μελέτη των A. M. Ghasemi et al [107].



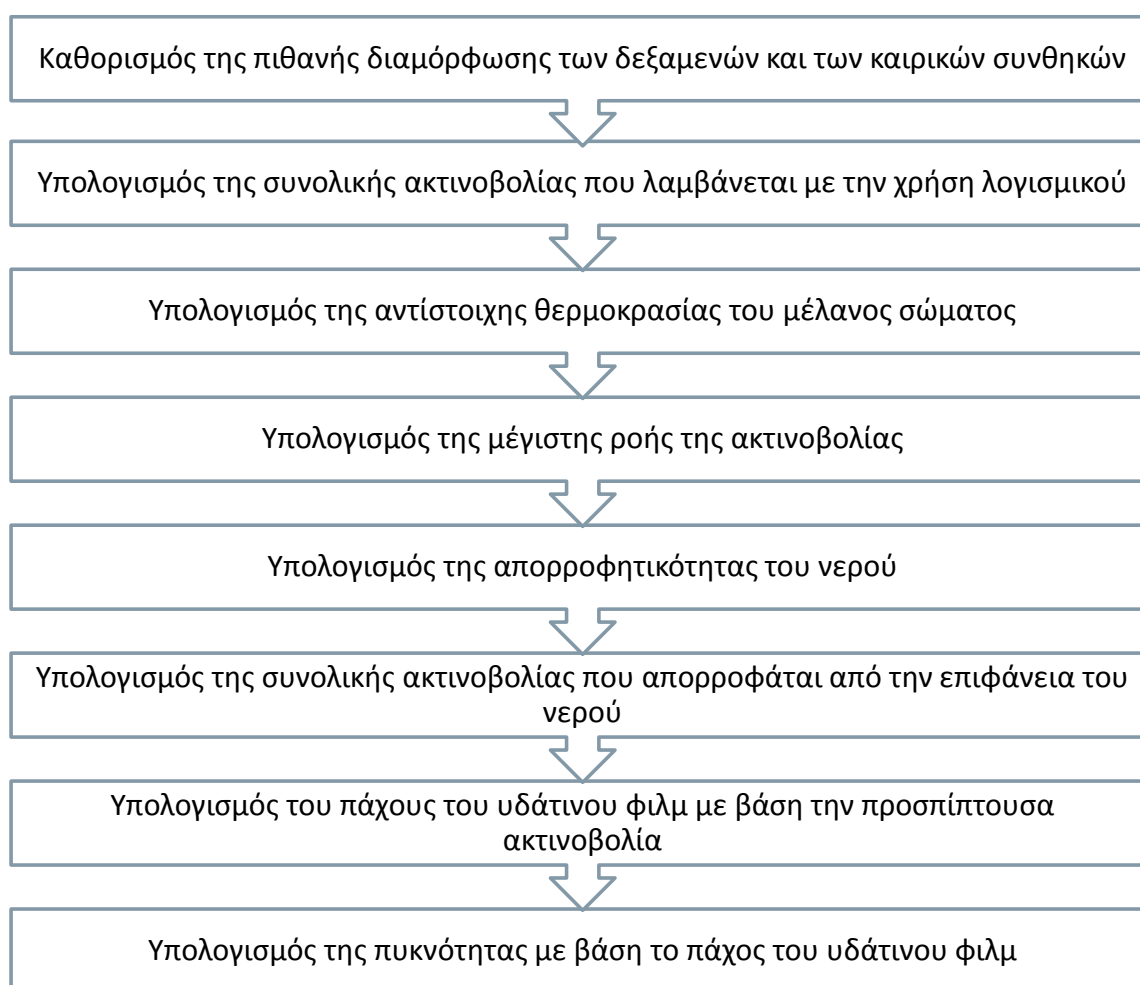
Εικόνα 7.6 Οι διαστάσεις της δεξαμενής αποθήκευσης που χρησιμοποιήθηκε στην μελέτη των A. M. Ghasemi et al [107].

Πίνακας 7.1 Οι διαστάσεις των δεξαμενών που χρησιμοποιήθηκαν στην μελέτη των A. M. Ghasemi et al [107].

Δεξαμενή	Ύψος (m)	Διάμετρος (m)	Χωρητικότητα (x1000 BBL)
1A	20	110	1000
1B	20	110	1000
1C	20	110	1000
5A	20	77	500
5B	20	77	500

Στην συνέχεια θα γίνει η ανάλυση της μοντελοποίησης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε μία προσκείμενη δεξαμενή, προκειμένου να προσδιοριστεί η ταχύτητα παροχής του νερού ψύξης στην δεξαμενή αυτή. Η μοντελοποίηση έλαβε χώρα από τους A. M. Ghasemi et al [107] με την χρήση ενός λογισμικού που υπάρχει στην αγορά και χρησιμοποιείται ευρέως για την εκτίμηση κινδύνων. Επομένως, προκειμένου να εκτιμηθεί η προστασία των δεξαμενών γίνεται η εφαρμογή του λογισμικού αυτού σε έναν χώρο δεξαμενών (tank farm). Η έκταση του χώρου ήταν 25 εκτάρια και περιείχε 5 μεγάλες δεξαμενές. Οι τρεις από τις δεξαμενές αυτές είχαν χωρητικότητα 1 εκατομμύριο βαρέλια και οι δύο από αυτές είχαν χωρητικότητα 500 χιλιάδες βαρέλια. Οι δεξαμενές τοποθετήθηκαν όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.5 και είχαν διαστάσεις που δίνονται στην Εικόνα 7.6 και στον Πίνακα 7.1. Η τιμή της μέγιστης επιτρεπόμενης ακτινοβολίας προς την προσκείμενη δεξαμενή θεωρήθηκε ίση με την επιτρεπόμενη εισερχόμενη θερμότητα στην προσκείμενη δεξαμενή σύμφωνα με το Μοντέλο Κώδικα Ασφαλούς Λειτουργίας [109] (Model Code of Safe Practice, Part 19), δηλαδή ίση με 8 kW/m². Επιπλέον, για να προβλεφθούν όλα τα σενάρια και να απλοποιηθούν οι υπολογισμοί θεωρήθηκε ότι η πυρκαγιά έλαβε χώρα σε όλη την έκταση της επιφάνειας της δεξαμενής. Το υγρό καύσιμο θεωρήθηκε πως ήταν το n-επτάνιο, διότι οι ιδιότητες καύσης του είναι πιο έντονες από τις αντίστοιχες του αργού πετρελαίου. Η στάθμη του υγρού στην φλεγόμενη δεξαμενή θεωρήθηκε πως ήταν ίση με το ύψος της δεξαμενής προκειμένου να προκύψουν συντηρητικές εκτιμήσεις, ενώ η προσπίπτουσα ακτινοβολία θεωρήθηκε πως ήταν ίση με αυτή στην άνω άκρη της δεξαμενής, όπου η ακτινοβολία ήταν μεγαλύτερη. Τέλος, κατά την συνολική μελέτη θεωρήθηκε μία τιμή για τον παράγοντα ασφαλείας

προκειμένου να προβλεφθούν όλα τα πιθανά σενάρια. Επομένως, με βάση τις παραπάνω υποθέσεις έγινε μία εκτίμηση για την ποσότητα του νερού ψύξης που απαιτείται για την προστασία μίας δεξαμενής πλωτής οροφής που περιείχε αργό πετρέλαιο από μία πυρκαγιά που εξελισσόταν σε μία προσκείμενη δεξαμενή χωρίς να έρχεται σε επαφή με την δεξαμενή που βρισκόταν υπό εξέταση.



Εικόνα 7.7 Διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό της ποσότητας του νερού ψύξης που απαιτείται σύμφωνα με την μελέτη των A. M. Ghasemi et al [107].

Για την διεξαγωγή της μοντελοποίησης έγινε η υπόθεση πως η παροχή του νερού είναι ανάλογη με την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε φαίνεται στην Εικόνα 7.7.



Εικόνα 7.8 Ακτινοβολία που λαμβάνεται από την προσκείμενη δεξαμενή, όπως θεωρήθηκε από την μελέτη των A. M. Ghasemi et al [107].

Σύμφωνα με την Εικόνα 7.7 αρχικά έγινε ο καθορισμός της διάταξης των δεξαμενών και των καιρικών συνθηκών. Στην συνέχεια ακολούθησε η αξιολόγηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας προς την δεξαμενή που πρέπει να προστατευθεί και προσδιορίστηκε η ποσότητα του νερού που απαιτείται. Προκειμένου να προβλεφθεί το χειρότερο σενάριο θεωρήθηκε πως η στάθμη του υγρού καυσίμου στην φλεγόμενη δεξαμενή ήταν ίση με το ύψος της δεξαμενής. Σε αυτήν την περίπτωση, η προσπίπτουσα ακτινοβολία υπολογίστηκε στο άνω άκρο της προστατευόμενης δεξαμενής, όπου εμφανίζει την μέγιστη τιμή, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.8.



Πίνακας 7.2 Καιρικές συνθήκες που επικρατούσαν κατά την μελέτη των Α. Μ. Ghasemi et al [107].

Καιρός	Περιγραφή	Ταχύτητα του ανέμου (m/s)	Τάξη Pasquill	Θερμοκρασία (° C)	Σχετική υγρασία (%)
W 1	Παγκόσμια μετεωρολογία\ κατηγορία 1.5/ F	1.5	F	9.85	70
W 2	Παγκόσμια μετεωρολογία\ κατηγορία 1.5/ D	1.5	D	9.85	70
W 3	Παγκόσμια μετεωρολογία\ κατηγορία 5/ D	5	D	9.85	70
W 4	Μέσες συνθήκες	15.44	A	24	50
W 5	Μέγιστες συνθήκες	32.42	A	50	50

Οι συνθήκες περιβάλλοντος που επικρατούσαν κατά την διεξαγωγή των υπολογισμών της θερμικής ακτινοβολίας δίνονται στον Πίνακα 7.2. Οι πρώτες τρεις καιρικές συνθήκες είναι οι προεπιλεγμένες που συνήθως χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των καταστάσεων κινδύνου και οι άλλες δύο καιρικές συνθήκες είναι αυτές που επικρατούν συνήθως στις περιοχές του Ιράν που έχουν πλούσια κοιτάσματα πετρελαίου. Για όλες τις παραπάνω καιρικές συνθήκες υπολογίστηκε η προσπίπτουσα ακτινοβολία.



Πίνακας 7.3 Διαμορφώσεις των δεξαμενών για τον προσδιορισμό των απαιτήσεων σε νερό ψύξης κατά την μελέτη των A. M. Ghasemi et al [107].

Διαμόρφωση δεξαμενών	Αλληλεπίδραση της δεξαμενής που φλέγεται και της δεξαμενής που εξετάζεται	Απόσταση διαχωρισμού ανάμεσα στην δεξαμενή που φλέγεται και στην δεξαμενή που εξετάζεται	Διάμετρος της δεξαμενής που φλέγεται (m)
Διαμόρφωση 1	1A προς 1B, 1B προς 1 ^A	155	110
Διαμόρφωση 2	1A προς 1C, 1B προς 1C, 1C προς 1A, 1C προς 1B	140	110
Διαμόρφωση 3	1A προς 5A, 1B προς 5B	120	110
Διαμόρφωση 4	1C προς 5A, 1C προς 5B	70	110
Διαμόρφωση 5	5A προς 1A, 5B προς 1B	120	7
Διαμόρφωση 6	5A προς 1C, 5B προς 1C	70	77

Λόγω της διάταξης των δεξαμενών εμφανίζονται πολλές δυνατές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των δεξαμενών. Ο Πίνακας 7.3 δείχνει τους πιθανούς συνδυασμούς των δεξαμενών που μπορούν να βρίσκονται σε κατάσταση πυρκαγιάς και των δεξαμενών που είναι δυνατόν να αποτελούν τις προσκείμενες δεξαμενές που εξετάζονται. Θεωρήθηκε πως κάθε φορά μόνο μία δεξαμενή βρισκόταν σε κατάσταση πυρκαγιάς και οι γειτονικές δεξαμενές ήταν αυτές που χρειάζονταν προστασία.

Για τον υπολογισμό της απαιτούμενης ταχύτητας του νερού ψύξης ορίστηκε κατά την πειραματική μελέτη των A. M. Ghasemi et al [107], η συνολική προσπίπτουσα θερμική ακτινοβολία για καθεμία από τις διατάξεις των δεξαμενών και για καθεμία από τις καιρικές συνθήκες. Στην συνέχεια, η ισοδύναμη θερμοκρασία του μέλανος σώματος της φλόγας της πυρκαγιάς και το σύνολο της εκπεμπόμενης θερμότητας συνδέθηκαν με το νόμο του Planck. Ο νόμος του Planck δίνεται από την παρακάτω σχέση:



$$W_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda T}\right) - 1} \left(\frac{W}{m^2 m}\right) \quad (7.1)$$

όπου,

h: η σταθερά του Planck (J s)

c: η ταχύτητα του φωτός (m/s)

k: η σταθερά του Boltzmann

T: η θερμοκρασία της πηγής (K)

λ : το μήκος κύματος της ακτινοβολίας (m)

Επομένως, η μέγιστη ροή της ακτινοβολίας υπολογίστηκε από την εξίσωση του Planck και τις ισοδύναμες θερμοκρασίες του μέλανος σώματος. Η απορρόφηση της ακτινοβολίας από το νερό υπολογίστηκε με χρήση των Εξισώσεων (7.2) και (7.3). Η ακτινοβολία που απορροφήθηκε από το νερό είναι ίση με την ποσότητα που υπερβαίνει το επιτρεπτό επίπεδο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην προσκείμενη δεξαμενή. Η επιτρεπόμενη ροή θερμότητας προς τη δεξαμενή θεωρήθηκε ότι ήταν ίση με 8 kW/m^2 . Ωστόσο, με μεταβολή της διαμόρφωσης των δεξαμενών και των καιρικών συνθηκών ήταν δυνατόν να προκύψει μία υψηλότερη τιμή για την προσπίπτουσα θερμική ακτινοβολία. Επομένως, η εκτίμηση της ταχύτητας ροής του νερού ψύξης για συνθήκες υψηλότερες από τις επιτρεπόμενες έγινε από δύο διαφορετικές προσεγγίσεις. Κατά την πρώτη προσέγγιση έγινε η υπόθεση πως το υδάτινο φιλμ έπρεπε να αφαιρέσει την περίσσεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, ενώ κατά τη δεύτερη προσέγγιση θεωρήθηκε πως έπρεπε να αφαιρεθεί το σύνολο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Ο υπολογισμός της ακτινοβολίας που απορροφήθηκε από το υδάτινο φιλμ σύμφωνα με την πρώτη προσέγγιση δίνεται από την Εξίσωση (7.2):

$$W_{Water,abs,\lambda} = W_{\lambda} \exp(-a_{\lambda} b) \quad (7.2)$$

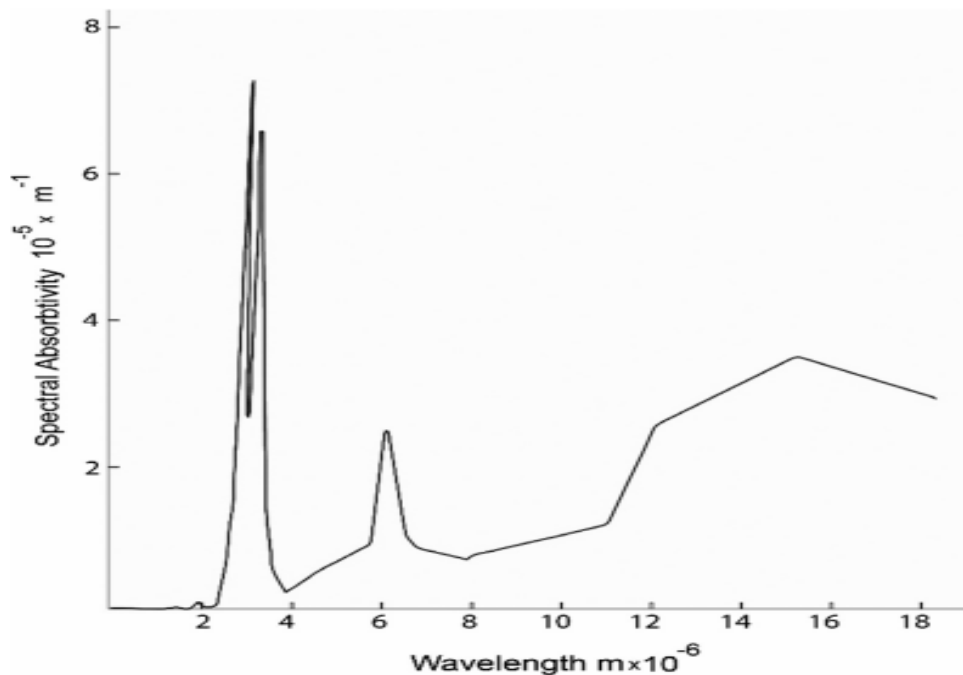
όπου,

$W_{Water,abs,\lambda}$: η φασματική ακτινοβολία που απορροφήθηκε από το υδάτινο φιλμ (W/m^2m)

W_λ : η προσπίπτουσα φασματική ακτινοβολία (W/m^2m)

α_λ : ο συντελεστής απορρόφησης που εξαρτάται από την συχνότητα

b : το πάχος του υδάτινου φιλμ (m)



Διάγραμμα 7.15 Τιμές της σταθεράς απορρόφησης α_λ συναρτήσει του μήκους κύματος λ . Το διάγραμμα αυτό χρησιμοποιήθηκε από την μελέτη των A. M. Ghasemi et al [107].

Οι τιμές του α_λ για μήκη κύματος μέχρι και 18 μm δίνονται στο Διάγραμμα 7.15. Η ακτινοβολία σε αυτό το μήκος κύματος αλλά και σε μεγαλύτερες τιμές μήκους κύματος είναι αμελητέα. Κατά την δεύτερη προσέγγιση το σύνολο της συνολικής ακτινοβολίας που απορροφάται δίνεται από την Εξίσωση (7.3). Για απλούστερους υπολογισμούς η Εξίσωση (7.3) αντικαταστάθηκε από την Εξίσωση (7.4). Η φασματική απορρόφηση του νερού στην περίπτωση αυτή αντικαταστάθηκε από μία μέση τιμή απορρόφησης, η οποία προέκυψε από την αυθαίρετη κατανομή του φάσματος του



Διαγράμματος 7.15 σε 27 ίσα μέρη, και στην συνέχεια υπολογίστηκε η μέση τιμή της κάθε ζώνης. Οι Εξισώσεις (7.3) και (7.4) είναι οι εξής:

$$W_{Water,abs,total} = \int_0^{18 \mu m} W_{\lambda} \exp(-a_{\lambda} b) d\lambda \quad (7.3)$$

$$W_{Water,abs,total} = W_{max} \sum_{i=1}^{27} \exp(-a_i b) \Delta\lambda \quad (7.4)$$

$W_{Water,abs,total}$: η συνολική ακτινοβολία που απορροφήθηκε από το στρώμα του νερού (water film) (W/m^2)

W_{max} : η μέγιστη ακτινοβολία που εκπεμπόνταν (W/m^2m)

a_i : ο μέσος συντελεστής απορρόφησης

b : το πάχος του υδάτινου φιλμ (m)

λ : το μήκος κύματος (m)

Το πάχος του υδάτινου φιλμ υπολογίστηκε από την Εξίσωση (7.5):

$$b = \left[\frac{2.4 \dot{M} v}{\rho g w} \right]^{1/3} \quad (7.5)$$

όπου,

b : το πάχος του στρώματος του νερού (water film) (m)

w : το πλάτος της πλάκας (m)

\dot{M} : η ταχύτητα του νερού που εξατμίζεται (kg/s)

v : το κινηματικό ιξώδες του νερού (m^2/s)

ρ : η πυκνότητα του νερού (kg/m^3)

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s^2)

Από την Εξίσωση (7.5) προέκυψε η γραμμική πυκνότητα του νερού η οποία υπολογίστηκε με βάση την Εξίσωση (7.6). Η γραμμική πυκνότητα του νερού και η πυκνότητα της επιφάνειας του νερού συνδέθηκαν με την Εξίσωση (7.7).

$$\rho_l = \frac{\dot{M}}{\rho_w} = \frac{b^3 \times g}{2.4 \times v} \quad (7.6)$$

$$\rho_l = \rho_s \times h \quad (7.7)$$

όπου,

ρ_l : η γραμμική πυκνότητα του νερού (l/min/m)

ρ_s : η πυκνότητα του νερού (l/min/m²)

h : το ύψος του τμήματος του κελύφους της δεξαμενής (m)

Προκειμένου να ληφθούν υπόψιν οι απώλειες μπορούσε να προστεθεί η τιμή 2 L/min/m² στις τελικές τιμές των ταχυτήτων παροχής του νερού ψύξης.

Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης της ακτινοβολίας που λάμβανε η προσκείμενη δεξαμενή για συγκεκριμένες καιρικές συνθήκες και συγκεκριμένες διαμορφώσεις των δεξαμενών δίνονται στον Πίνακα 7.4.

Πίνακας 7.4 Η προσπίπτουσα ακτινοβολία στην δεξαμενή που βρίσκονταν υπό εξέταση (kW/m²) κατά την μελέτη των A. M. Ghasemi et al [107].

Διαμόρφωση δεξαμενών	Καιρικές συνθήκες				
	W 1	W 2	W 3	W 4	W 5
Διαμόρφωση 1	1.26	1.26	1.44	1.54	1.57
Διαμόρφωση 2	1.56	1.56	1.85	2.05	2.13
Διαμόρφωση 3	2.12	2.12	2.63	3.10	3.28
Διαμόρφωση 4	5.14	5.14	6.83	8.97	9.82
Διαμόρφωση 5	1.17	1.17	1.32	1.40	1.43
Διαμόρφωση 6	3.27	3.27	4.29	5.39	5.74

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.4 προκύπτει πως καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται και η θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από την συνολική επιφάνεια της δεξαμενής που φλέγεται προς το κέλυφος των προσκείμενων



δεξαμενών. Επιπλέον, προκύπτει πως καθώς αυξάνεται η διάμετρος της δεξαμενής που φλέγεται και μειώνεται η απόσταση διαχωρισμού ανάμεσα στις δεξαμενές, αυξάνεται και η προσπίπτουσα θερμική ακτινοβολία στις προσκείμενες δεξαμενές. Κατά την διαμόρφωση των δεξαμενών 4 και κατά τις καιρικές συνθήκες W4 και W5 η ακτινοβολία στην προσκείμενη δεξαμενή είναι μεγαλύτερη από την εκτιμώμενη. Από τις τιμές αυτές της ακτινοβολίας προκύπτει η ισοδύναμη θερμοκρασία του μέλανος σώματος. Οι τιμές της ισοδύναμης θερμοκρασίας του μέλανος σώματος δίνονται στον Πίνακα 7.5.

Πίνακας 7.5 Ισοδύναμη θερμοκρασία του μέλανος σώματος (K) κατά την διαμόρφωση των δεξαμενών και τις καιρικές συνθήκες όπου η ακτινοβολία προς την προσκείμενη δεξαμενή ήταν μεγαλύτερη από την εκτιμώμενη σύμφωνα με την μελέτη των A. M. Ghasemi et al [107].

Διαμόρφωση δεξαμενών	Καιρικές συνθήκες	
	W 4	W 5
Διαμόρφωση 4	630.95	645.1

Οι τιμές της ισοδύναμης θερμοκρασίας του μέλανος σώματος παρουσιάζουν αύξηση με αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Η συμπεριφορά αυτή ήταν αναμενόμενη και ακολούθησε παρόμοια τάση με την προσπίπτουσα θερμική ακτινοβολία.

Γνωρίζοντας την υψηλότερη, την κανονική και την επιτρεπόμενη τιμή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην δεξαμενή που ήταν υπό μελέτη, μπορούσε να υπολογιστεί η ποσότητα της ακτινοβολίας που απορροφήθηκε από το νερό όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 7.6.



Πίνακας 7.6 Προσπίπτουσα ακτινοβολία, επιτρεπόμενη ακτινοβολία και ακτινοβολία που απορροφήθηκε από το νερό κατά την μελέτη των Α. Μ. Ghasemi et al [107].

Διαμορφώσεις δεξαμενών	Καιρικές συνθήκες	Συνολική προσπίπτουσα ακτινοβολία (kW/m ²)	Επιτρεπόμενη προσπίπτουσα ακτινοβολία (kW/m ²)	Ακτινοβολία που απορροφάται από το νερό (kW/m ²)
Διαμόρφωση 4	W 4	8.97	8	0.97
Διαμόρφωση 4	W 5	9.82	8	1.82

Τα αποτελέσματα για την πυκνότητα του νερού, χωρίς την εκτίμηση της περίσσειας της ποσότητας του νερού, συνοψίζονται στους Πίνακες 7.7 και 7.8.

Πίνακας 7.7 Τελικές τιμές της γραμμικής πυκνότητας του νερού ψύξης για την απομάκρυνση της περίσσειας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας Α. Μ. Ghasemi et al [107].

Διαμόρφωση δεξαμενών	Καιρικές συνθήκες	Ελάχιστο πάχος του νερού (mm)	Γραμμική πυκνότητα του νερού (l/min/m)	Τελική γραμμική πυκνότητα του νερού (l/min/m)
Διαμόρφωση 4	W 4	$2.89288 * 10^{-5}$	$9.51190 * 10^{-8}$	$2.85357 * 10^{-4}$
Διαμόρφωση 4	W 5	$3.03693 * 10^{-5}$	$1.10048 * 10^{-7}$	$3.30144 * 10^{-4}$

Πίνακας 7.8 Τελικές τιμές της γραμμικής πυκνότητας του νερού ψύξης για την απομάκρυνση της συνολικής ποσότητας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας Α. Μ. Ghasemi et al [107].

Διαμόρφωση δεξαμενών	Καιρικές συνθήκες	Ελάχιστο πάχος του νερού (mm)	Γραμμική πυκνότητα του νερού (l/min/m)	Τελική γραμμική πυκνότητα του νερού (l/min/m)
Διαμόρφωση 4	W 4	$3.47952 * 10^{-5}$	$1.65514 * 10^{-7}$	$4.96541 * 10^{-4}$
Διαμόρφωση 4	W 5	$3.47999 * 10^{-5}$	$1.65581 * 10^{-7}$	$4.96743 * 10^{-4}$



Οι τιμές για την ποσότητα του νερού που απαιτείται υπό την ανάλυση των δύο διαφορετικών προσεγγίσεων που ακολουθήθηκαν εμφανίζουν μία παρόμοια τάση. Ωστόσο, η ποσότητα του νερού που απαιτείται για την απομάκρυνση της συνολικής ποσότητας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη από την ποσότητα που απαιτείται για την απομάκρυνση της περίσσειας της ακτινοβολίας.

Από τον αντίστροφο υπολογισμό προκύπτει ότι η τιμή των 2 L/min/m² για την ταχύτητα παροχής του νερού είναι επαρκής για μία επιτρεπόμενη απόσταση ανάμεσα στις δεξαμενές αποθήκευσης ίση με 60 m. Αυτό αποδεικνύει πως στην περίπτωση που περιγράφεται θα μπορούσε να προστατευτεί το 25 % της υπάρχουσας έκτασης, όπου αποθηκεύονται οι δεξαμενές [107].

Κατά την ανάλυση μίας άλλης μελέτης, των N. Jain et al [110], σχετικά με την επίδραση του μεγέθους της δεξαμενής στο απαιτούμενο νερό ψύξης θεωρήθηκε πως q (kw/m²) είναι η ροή της θερμότητας που φθάνει στην προσκείμενη δεξαμενή και M (L/m²s) είναι η ροή του νερού που ρέει στην επιφάνεια της προσκείμενης δεξαμενής (L/m²s). Η ποσότητα του νερού που απαιτήθηκε για την προστασία της προσκείμενης δεξαμενής από την έκθεση στην θερμότητα ακτινοβολίας μπορούσε να καθοριστεί από τους υπολογισμούς της ροής θερμότητας και από την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού από την αρχική τιμή της (θερμοκρασία του νερού ψύξης) σε μία θερμοκρασία κοντά στο σημείο βρασμού του νερού 100° C. Στην συνέχεια εφαρμόζοντας το ισοζύγιο θερμότητας στην μόνιμη κατάσταση έγινε η υπόθεση πως όλη η θερμότητα που εκπεμπόταν στην προσκείμενη δεξαμενή απορροφήθηκε από το νερό και προέκυψε:

$$qA_f = MA_w C_p \Delta T \Rightarrow M = qA_f / (A_w C_p \Delta T) \quad (7.8)$$

όπου,

A_f : το εμβαδόν της φλόγας (διάμετρος x ύψος της φλόγας) (m²)

A_w : το εμβαδόν της επιφάνειας πάνω στην οποία αναπτύσσεται η ροή του νερού

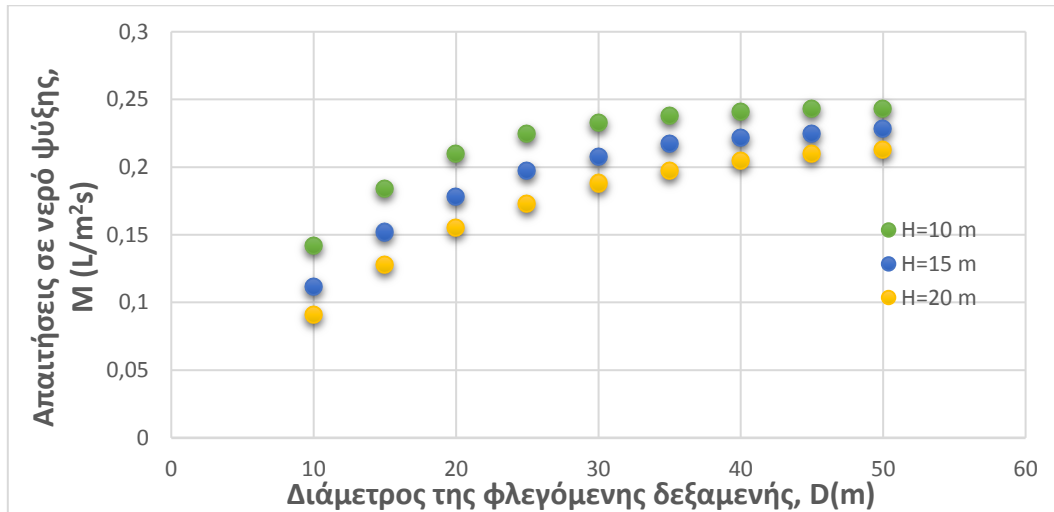
C_p : η ειδική θερμότητα του νερού (J/kg°C)

ΔT : η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού ψύξης



Μία ποσότητα του νερού είναι πιθανόν να εξατμιστεί λαμβάνοντας μαζί την θερμότητα εξάτμισης. Αυτό μειώνει την ποσότητα της θερμότητας που πρόκειται να λάβει το νερό. Ωστόσο, κατά την μελέτη των N. Jain et al [110], θεωρήθηκε ότι η ταχύτητα εξάτμισης του νερού μειώνεται τόσο για συντηρητικούς λόγους όσο και για λόγους αβεβαιότητας των υπολογισμών. Επιπλέον, έγινε η υπόθεση πως το σύνολο της εκτεθειμένης επιφάνειας καταβρέχεται από το νερό και δεν υπάρχουν ξηρά σημεία στην έκτασή της.

Με βάση τους υπολογισμούς των N. Jain et al [110] προέκυψε πως οι απαιτήσεις σε νερό ψύξης βρίσκονταν στο εύρος των $0.091 \text{ L/m}^2\text{s}$ έως $0.243 \text{ L/m}^2\text{s}$ και εξαρτώνταν από το σχετικό μέγεθος της πυρκαγιάς της δεξαμενής και το μέγεθος της προσκείμενης δεξαμενής που βρισκόταν σε ορισμένη απόσταση. Η τιμή που προέκυψε από την NFPA-15 [111] είναι $0.17 \text{ L/m}^2\text{s}$ ($10.2 \text{ L/m}^2\text{min}$) για όλα τα μεγέθη των δεξαμενών και όλες τις αποστάσεις διαχωρισμού των φλεγόμενων δεξαμενών και των γειτονικών δεξαμενών. Συμπερασματικά, προέκυψε ότι η συνολική απαίτηση σε νερό ψύξης αυξάνεται, καθώς αυξάνεται το μέγεθος της προσκείμενης δεξαμενής και γίνεται μεγαλύτερο από το μέγεθος της δεξαμενής που φλέγεται, ταυτόχρονα αυξάνεται και η απαιτούμενη ποσότητα νερού ανά μονάδα επιφάνειας. Ωστόσο, είναι πιθανόν να συμβεί και το αντίστροφο. Η απαίτηση για νερό μπορεί να μειώνεται εάν η απόσταση μεταξύ της δεξαμενής που φλέγεται και της προσκείμενης δεξαμενής ξεπεράσει τα 5 m N. Jain et al [110].



Διάγραμμα 7.16 Οι απαιτήσεις σε νερό ψύξης για την προσκείμενη δεξαμενή συναρτήσει του μεγέθους της φλεγόμενης δεξαμενής για προσκείμενες δεξαμενές διαφορετικών μεγεθών σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης των N. Jain et al [110].

Το Διάγραμμα 7.16 δείχνει τις απαιτήσεις σε νερό ψύξης για διαφορετικά μεγέθη φλεγόμενων δεξαμενών και για διαφορετικά ύψη προσκείμενων δεξαμενών. Από το διάγραμμα αυτό φαίνεται πως καθώς αυξάνεται η διάμετρος της φλεγόμενης δεξαμενής, αυξάνονται και οι απαιτήσεις της σε νερό ψύξης. Ωστόσο, η αντίθετη συμπεριφορά παρατηρείται με την αύξηση του ύψους της προσκείμενης δεξαμενής. Συγκεκριμένα, παρατηρείται μείωση της απαιτούμενης ταχύτητας ψύξης καθώς αυξάνεται το ύψος της προσκείμενης δεξαμενής για μία πυρκαγιά που αναπτύσσεται σε μία δεξαμενή καθορισμένης διαμέτρου.



7.5 ΑΝΑΦΕΡΟΜΕΝΑ ΠΡΟΤΥΠΑ

❖ ΑΜΕΡΙΚΑΝΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, API) 2030

Η ταχύτητα παροχής του νερού ψύξης εξαρτάται από την ταχύτητα μεταφοράς θερμότητας, την μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία και την απόδοση της απορρόφησης θερμότητας από το νερό ψύξης. Γενικά, οι επιτρεπόμενες ταχύτητες παροχής του νερού ψύξης κυμαίνονται μεταξύ των 4.1 και 10.2 L/min/m². Αυτές οι προτεινόμενες ταχύτητες παροχής νερού ψύξης βασίζονται σε εμπειρικές τιμές και περιλαμβάνουν έναν παράγοντα ασφαλείας των 2 L/min/m². Η μέγιστη τιμή των 10.2 L/min/m² συνιστάται για την προστασία των επιφανειών που είναι κατασκευασμένες από χάλυβα και καταπονούνται, όπως δοχεία πίεσης. Οι τιμές μεταξύ του 6.1 και 10.2 L/min/m² μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν τα τεχνικά δεδομένα ή η τεχνική εμπειρία ή άλλα προστατευτικά μέτρα το απαιτούν.

Σύμφωνα με το πρότυπο API 2030, η ψύξη πρέπει να λαμβάνει χώρα μόνο στην περιοχή όπου είναι εκτεθειμένη στην φωτιά. Η περιοχή αυτή καθορίζεται σύμφωνα με το πρότυπο από το ένα τέταρτο έως το μισό της συνολικής επιφάνειας της δεξαμενής. Επιπλέον, όσον αφορά στο API 2030 η ψύξη δρα μόνο στο τοίχιο της δεξαμενής που έρχεται σε επαφή με το υγρό και συνήθως στο ανώτερο τμήμα του τοιχίου [112].

❖ ΕΘΝΙΚΗ ΕΝΩΣΗ ΠΥΡΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ (NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, NFPA 30)

Η NFPA 30 δεν περιλαμβάνει συγκεκριμένες απαιτήσεις για το νερό ψύξης, αλλά απαιτεί μία μηχανική αξιολόγηση προκειμένου να καθοριστούν τα μέτρα πρόληψης και ελέγχου των πυρκαγιών. Επομένως, σε περιπτώσεις που ενδείκνυται η ανάγκη για νερό ψύξης γίνεται η αναφορά στο NFPA 15 για να αντληθούν περισσότερες πληροφορίες [108].



❖ **ΕΘΝΙΚΗ ΕΝΩΣΗ ΠΥΡΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ (NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, NFPA 15)**

Το πρότυπο αυτό αφορά την προστασία με χρήση της τεχνικής με εκνέφωμα νερού προκειμένου να περιοριστεί η απορρόφηση της θερμότητας από τον εξοπλισμό ή τις διάφορες διατάξεις που υπάρχουν σε ένα επίπεδο και να ελαχιστοποιηθεί η ζημιά. Η NFPA 15 συνιστά την τιμή 10.2 L/min/m^2 για την ταχύτητα παροχής του νερού ψύξης σε μία μη μονωμένη επιφάνεια που εκτίθενται σε φλόγα με τις ανάλογες επιπτώσεις. Για μία πυρκαγιά που αναπτύσσεται σε ολόκληρη την επιφάνεια μίας δεξαμενής, γίνεται η υπόθεση πως στις φλόγες εκτίθεται το ήμισυ του κατακόρυφου ύψους της προσκείμενης δεξαμενής [111].

❖ **ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΩΔΙΚΑ ΑΣΦΑΛΟΥΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (MODEL CODE OF SAFE PRACTICE, PART 19)**

Για την μοντελοποίηση των πυρκαγιών των δεξαμενών, πρέπει να υπολογιστεί η ακτινοβολούμενη θερμότητα. Για οποιαδήποτε έκθεση σε περισσότερα από 32 kW/m^2 πρέπει να γίνει η παροχή νερού ψύξης. Επιπλέον, οι εκθέσεις ανάμεσα στα $8-32 \text{ kW/m}^2$ πρέπει να ψύχονται. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση φορητών μέσων σε εύλογο χρονικό διάστημα. Η ταχύτητα παροχής του νερού ψύξης των 2 L/min/m^2 είναι συνήθως επαρκής και μπορεί να αφαιρέσει την θερμική ακτινοβολία των 43 kW/m^2 με αποτελεσματικότητα ίση με 50 %, την θερμική ακτινοβολία των 30 kW/m^2 με αποτελεσματικότητα ίση με 35 % ή την θερμική ακτινοβολία των 69 kW/m^2 με αποτελεσματικότητα ίση με 80 %. Οι τιμές για την ταχύτητα παροχής του νερού που είναι μεγαλύτερες από 2 L/min/m^2 δεν παρέχουν ανάλογη αύξηση της προστασίας [108].

7.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την ανάλυση που προηγήθηκε προκύπτει πως όταν φλέγεται μία δεξαμενή σε έναν χώρο όπου υπάρχουν πολλές δεξαμενές απαιτείται η ψύξη των



προσκειμένων δεξαμενών προκειμένου να μην υποστούν σημαντικές βλάβες ή να μην καταστραφούν.

Η αποτελεσματικότητα των τεχνικών παροχής νερού ψύξης επηρεάζεται σημαντικά τόσο από την απόσταση των δεξαμενών όσο και από την διάμετρο της προσκειμένης δεξαμενής. Για απόσταση 0.5D μεταξύ των δεξαμενών και για προσκειμένες δεξαμενές με μικρές διαμέτρους παρατηρήθηκε πως καμία από τις τεχνικές δεν εμφάνιζε ικανοποιητική προστασία. Ωστόσο, εάν η διάμετρος της προσκειμένης δεξαμενής αυξανόταν τα αποτελέσματα θα ήταν διαφορετικά. Η τεχνική water film παρουσίασε πλήρη προστασία της προσκειμένης δεξαμενής σε αποστάσεις 1D και 1.5D μεταξύ των δεξαμενών, ενώ η τεχνική water curtain παρουσίασε πλήρη προστασία σε απόσταση 1.5D μεταξύ των δεξαμενών. Η τεχνική water spray εμφάνιζε περιορισμένη προστασία ιδιαίτερα σε δεξαμενές μικρών διαστάσεων, καθώς το νερό εξατμιζόταν από την προσπίπτουσα ακτινοβολία.

Οι τιμές για την ταχύτητα ροής του νερού ψύξης είναι δυνατόν να προκύψουν από αναφερόμενα πρότυπα. Ωστόσο, οι τιμές αυτές των προτύπων σε ορισμένες περιπτώσεις δεν συνάδουν και εμφανίζουν μειωμένη ακρίβεια. Επομένως, προκειμένου να γίνει καλύτερη εκτίμηση της ταχύτητας ροής του νερού ψύξης θεωρείται πως η ταχύτητα παροχής του νερού ψύξης είναι ανάλογη της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην προσκειμένη δεξαμενή. Η προσπίπτουσα ακτινοβολία εξαρτάται από τις διαστάσεις της προσκειμένης και της φλεγόμενης δεξαμενής, τις καιρικές συνθήκες και την απόσταση ανάμεσα στις δεξαμενές. Συγκεκριμένα, η αύξηση της διαμέτρου της προσκειμένης δεξαμενής απαιτεί αύξηση της ταχύτητας ροής του νερού ψύξης. Επιπλέον, η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου αυξάνει την θερμική ακτινοβολία προς την προσκειμένη δεξαμενή με αποτέλεσμα να απαιτείται αυξημένη παροχή του νερού ψύξης. Η αύξηση της διαμέτρου της φλεγόμενης δεξαμενής και η μείωση της απόστασης μεταξύ των δεξαμενών προκαλεί αύξηση της θερμικής ακτινοβολίας προς την προσκειμένη δεξαμενή και ταυτόχρονη αύξηση της απαιτούμενης ταχύτητας παροχής του νερού ψύξης. Τέλος, η αύξηση του ύψους της φλεγόμενης δεξαμενής για μία δεδομένη διάμετρο φλεγόμενης δεξαμενής προκαλεί μείωση της απαιτούμενης ταχύτητας παροχής του νερού ψύξης.



Τα χαρακτηριστικά που προέκυψαν κατά την διάρκεια των δοκιμών δεν είναι τα ίδια με τα πραγματικά χαρακτηριστικά των μεγαλύτερων δεξαμενών, άρα ορισμένες από τις τεχνικές παροχής του νερού ψύξης δεν είναι άμεσα εφαρμόσιμες. Συγκεκριμένα, η εφαρμογή της τεχνικής με εκνέφωμα νερού δεν μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα και σε δεξαμενές μεγαλύτερης διαμέτρου.

Το υγρό στο εσωτερικό της δεξαμενής αποθήκευσης μπορεί να ψύξει το τοίχιο της δεξαμενής σημαντικά και ο βαθμός ψύξης εξαρτάται από τις ιδιότητες του υγρού.

Η παροχή του νερού σύμφωνα με την προσπίπτουσα ακτινοβολία επιτρέπει στον σχεδιασμό αποτελεσματικότερων συστημάτων για την αξιοποίηση του νερού και της έκτασης του εδάφους. Αυτή η μεθοδολογία προσφέρει την δυνατότητα μεγιστοποίησης της ασφάλειας κατά την αποθήκευση των καυσίμων με ταυτόχρονη βελτίωση στην χρήση της έκτασης του εδάφους και ευελιξία στις υπάρχουσες διατάξεις για την αντιμετώπιση των κινδύνων. Η ευελιξία αυτή εξασφαλίζεται με την εισαγωγή νέων τμημάτων στις υπάρχουσες διατάξεις αλλά και με την κατασκευή νέων διατάξεων. Το σχεδιαζόμενο σύστημα παροχής νερού ψύξης σύμφωνα με την προσπίπτουσα ακτινοβολία προσφέρει προστασία κατά το απαιτούμενο επίπεδο. Αντιθέτως, τα σχεδιαζόμενα συστήματα που βασίζονται στις προτεινόμενες τιμές από τα αποτελέσματα των προτύπων παρουσιάζουν τιμές που είναι είτε μεγαλύτερες είτε μικρότερες από αυτές που απαιτούνται στην πραγματικότητα. Οι τιμές αυτές σπάνια ταιριάζουν με την ακριβή τιμή της ταχύτητας παροχής νερού που απαιτείται. Η παροχή μίας συγκεκριμένης ποσότητας νερού είναι ιδιαίτερα σημαντική σε σημεία όπου η ποσότητα του νερού είναι περιορισμένη.

Οι έρευνες που υπάρχουν εστιάζουν κατά κύριο λόγο στον υπολογισμό της απαιτούμενης παροχής νερού ψύξης με βάση την προσπίπτουσα ακτινοβολία προς την προσκείμενη δεξαμενή. Ωστόσο, θα ήταν χρήσιμο να διεξαχθεί περαιτέρω έρευνα για τις μεθόδους υπολογισμού της ταχύτητας παροχής νερού με βάση την θερμοκρασία αυτανάφλεξης του αποθηκευμένου καυσίμου.

Στις απαιτήσεις για την παροχή νερού ψύξης επιδρούν διάφοροι παράμετροι. Αρχικά, η παρουσία του ανέμου μπορεί να επιδράσει στην ταχύτητα παροχής του



νερού ψύξης. Λόγω της εμφάνισης του ανέμου η φλόγα παίρνει κλίση με αποτέλεσμα την επέκταση της πυρκαγιάς (flame drag). Η επέκταση της πυρκαγιάς αντιπροσωπεύει την επέκταση της βάσης της φλόγας προς την αντίθετη κατεύθυνση της δεξαμενής. Ο άνεμος έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μεγαλύτερης ή μικρότερης ποσότητας της ροής θερμότητας λόγω ακτινοβολίας προς την προσκειμένη δεξαμενή ανάλογα με την κατεύθυνση του ανέμου. Ως εκ τούτου, καμία υπόθεση κατά την μελέτη απουσίας ανέμου δεν είναι λογική. Η αβεβαιότητα της μελέτης αυτής εξισορροπείται από άλλες υποθέσεις. Επιπλέον, η κατεύθυνση του ανέμου ενδεχομένως να μεταβάλλεται κατά το χρονικό διάστημα που χρειάζεται όλο το περιεχόμενο της δεξαμενής για να καεί.

Μία άλλη παράμετρος που επιδρά στην ταχύτητα παροχής του νερού ψύξης είναι η ατμοσφαιρική εξασθένιση της ακτινοβολούμενης ενέργειας. Η ροή της ακτινοβολούμενης ενέργειας από την φλόγα προς το περιβάλλον της δεξαμενής θα είναι εν μέρει εξασθετισμένη λόγω της απορρόφησης και του διασκορπισμού που εμφανίζεται κατά μήκος της ενδιάμεσης απόστασης από το διοξείδιο του άνθρακα, τον ατμό του νερού και τα σωματίδια σκόνης. Οι ποσότητες και οι συγκεντρώσεις τους στον αέρα ποικίλλουν από θέση σε θέση, εποχή σε εποχή και μεταβάλλονται κάθε ώρα της ημέρας. Επομένως, είναι πιθανόν να υπάρξουν σημαντικές αβεβαιότητες των αποτελεσμάτων. Εάν δεν ληφθεί υπόψιν αυτή η επίδραση της ατμοσφαιρικής απορροφητικότητας θα προκύψουν συντηρητικές εκτιμήσεις δεδομένου ότι οι υπολογισμοί θα εμφανίσουν υψηλότερες τιμές από την πραγματική ροή ακτινοβολίας.

Η παρουσία του καπνού επιδρά εξίσου σημαντικά στην εκτίμηση της ταχύτητας παροχής του νερού ψύξης. Η εκπεμπόμενη ισχύς της φλόγας μειώνεται από την παρουσία καπνού. Το στρώμα του καπνού απορροφά μία σημαντική ποσότητα της ακτινοβολίας με αποτέλεσμα να εκπέμπεται μικρότερη θερμότητα λόγω ακτινοβολίας στο περιβάλλον. Επιπλέον, η μεταφορά θερμότητας διαμέσου της φλόγας θεωρείται αμελητέα. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη μεταφορά θερμότητας λόγω συναγωγής. Ωστόσο, γίνονται επιπλέον υποθέσεις προκειμένου να ληφθεί υπόψιν η περίσσεια της θερμότητας.



Τέλος ο συντελεστής εκπομπής της φλόγας επηρεάζει την απαιτούμενη ταχύτητα παροχής νερού ψύξης. Όταν ο συντελεστής εκπομπής της φλόγας είναι ίσος με ένα, μπορεί να οδηγήσει στην απορρόφηση περισσότερης θερμικής ακτινοβολίας από την προσκείμενη δεξαμενή. Η θεώρηση αυτή είναι συντηρητική.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

D: η διάμετρος της φλεγόμενης δεξαμενής

h: η σταθερά του Planck

c: η ταχύτητα του φωτός

λ : το μήκος κύματος της ακτινοβολίας

k: η σταθερά του Boltzmann

T: η θερμοκρασία της πηγής

$W_{Water,abs,\lambda}$: η φασματική ακτινοβολία που απορροφάται από το στρώμα του νερού

W_λ : η προσπίπτουσα φασματική ακτινοβολία

α_λ : ο συντελεστής απορρόφησης που εξαρτάται από την συχνότητα

b: το πάχος του στρώματος του νερού

$W_{Water,abs,total}$: η συνολική ακτινοβολία που απορροφάται από το στρώμα του νερού

W_{max} : η μέγιστη ακτινοβολία που εκπέμπεται

α_i : ο μέσος συντελεστής απορρόφησης

w: το πλάτος της πλάκας

\dot{M} : η ταχύτητα του νερού που εξατμίζεται



ν : το κινηματικό ιξώδες του νερού

ρ : η πυκνότητα του νερού

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας

ρ_l : η γραμμική πυκνότητα του νερού

ρ_s : η πυκνότητα του νερού

h : το ύψος του τμήματος του κελύφους της δεξαμενής

q : η ροή της θερμότητας που φθάνει στην προσκείμενη δεξαμενή

M : η ροή του νερού που ρέει στην επιφάνεια της προσκείμενης δεξαμενής

A_f : το εμβαδόν της φλόγας (διάμετρος \times ύψος της φλόγας)

A_w : το εμβαδόν της επιφάνειας πάνω στην οποία αναπτύσσεται η ροή του νερού

C_p : η ειδική θερμότητα του νερού

ΔT : η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού ψύξης



8. ΚΕΦΑΛΑΙΟ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η συμπεριφορά των δεξαμενών υγρών καυσίμων παρουσία πλευρικού ανέμου.

Στο πρώτο κεφάλαιο έγινε μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των γενικών φαινομένων της πυρκαγιάς σε στερεά, υγρά ή αέρια καύσιμα. Μελετήθηκαν οι μηχανισμοί που διέπουν την ανάπτυξη μιας φλόγας, τα στάδια ανάπτυξης μίας πυρκαγιάς καθώς και οι μηχανισμοί εξάπλωσης της, δηλ. η αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία, καθώς και φαινόμενα όπως το κύλισμα της πυρκαγιάς (rollover), η καθολική ανάφλεξη της πυρκαγιάς (flashover) και η εμφάνιση του οπίσθιου ρεύματος (backdraft). Τα καύσιμα που εμπλέκονται στις πυρκαγιές είναι στερεά, υγρά ή αέρια. Αυτές οι κατηγορίες καυσίμων περιλαμβάνουν διάφορες υποκατηγορίες οι οποίες σχετίζονται είτε με το σημείο ανάφλεξης των καυσίμων είτε με την συχνότητα εμφάνισης πυρκαγιών των καυσίμων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναδείχθηκε το πρόβλημα των πυρκαγιών σε μεγάλες δεξαμενές υγρών καυσίμων. Ειδικότερα, μελετήθηκε η ταχύτητα καύσης του καυσίμου και οι παράγοντες που την επηρεάζουν. Η ταχύτητα καύσης του καυσίμου επηρεάζεται από το μέγεθος της δεξαμενής, την ταχύτητα και την πίεση του ανέμου. Η συμπεριφορά αυτή προκύπτει ως αποτέλεσμα της λειτουργίας καύσης (αγωγή, συναγωγή, ακτινοβολία) που είναι διαφορετική για κάθε δεξαμενή.

Στο τρίτο κεφάλαιο μελετήθηκε η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τις πυρκαγιές. Η ανάλυση της ακτινοβολίας βασίζεται είτε στο μαθηματικό μοντέλο της φλόγας στερεού καυσίμου, που χρησιμοποιείται για τις εκτιμήσεις της ακτινοβολίας σε μεγάλες αποστάσεις για πυρκαγιές υγρών καυσίμων, είτε στο σημειακό μαθηματικό μοντέλο, που χρησιμοποιείται για τις εκτιμήσεις της ακτινοβολίας σε μικρές αποστάσεις για πυρκαγιές υγρών και αερίων καυσίμων, και είναι ανεξάρτητη από τον τύπο του καυσίμου. Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από μία πυρκαγιά είναι δυνατόν να εξασθενήσει από την ατμοσφαιρική απορρόφηση.



Στο τέταρτο κεφάλαιο εξετάστηκαν το ύψος και το μήκος της φλόγας. Αρχικά, ορίστηκαν οι εξισώσεις υπολογισμού τους, ενώ μελετήθηκαν οι παράμετροι που επιδρούν στην μεταβολή αυτών των μεγεθών. Οι μεταβολές των μεγεθών αυτών είναι ανεξάρτητες από τον τύπο του καυσίμου, ενώ επηρεάζονται από την ταχύτητα του ανέμου και την παρουσία πλευρικού τοιχείου. Απουσία ανέμου, το ύψος και το μήκος της φλόγας εξαρτώνται από το αδιάστατο ποσό απελευθέρωσης θερμότητας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύθηκε η μελέτη της γωνίας κλίσης της φλόγας και των παραμέτρων που την επηρεάζουν. Οι εξισώσεις υπολογισμού της γωνίας κλίσης της φλόγας, που προέκυψαν από διάφορες μελέτες εμφανίζουν διαχρονική ισχύ. Η γωνία κλίσης της φλόγας επηρεάζεται από την ταχύτητα του ανέμου, ενώ μένει σχεδόν ανεπηρέαστη από το μέγεθος της πειραματικής λεκάνης.

Στο έκτο κεφάλαιο μελετήθηκε η παραγωγή καπνού από πυρκαγιές σε δεξαμενές υγρών καυσίμων. Ο σχηματισμός της αιθάλης μελετάται σε τέσσερα στάδια: το στάδιο δημιουργίας πυρήνων, την αντίδραση σχηματισμού αιθάλης, το στάδιο οξειδωσης της αιθάλης και την συσσωμάτωση των σωματιδίων της αιθάλης. Επιπλέον, το φαινόμενο της ασταθούς φλόγας και η δύναμη θερμοφόρησης εμφανίζουν σημαντική επίδραση στην παραγωγή καπνού. Η απόδοση του καπνού, το μέγεθος των πρωτογενών σωματιδίων της αιθάλης, η δομή της αιθάλης, η διάταξη του γραφίτη και το πάχος του στρώματος των ατόμων άνθρακα επηρεάζονται από παραμέτρους όπως είναι το μέγεθος της δεξαμενής, το ύψος κατά μήκος της κεντρικής γραμμής του καπνού και η θερμική καταπόνηση.

Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο αναλύθηκαν οι τρόποι προστασίας των προσκείμενων δεξαμενών. Ο κυριος τρόπος προστασίας είναι η ψύξη, που μπορεί να πραγματοποιηθεί με υδάτινο φιλμ, με εκνέφωμα νερού ή με κουρτίνα νερού. Η αποτελεσματικότητα της κάθε τεχνικής ψύξης εξαρτάται τόσο από την απόσταση των δεξαμενών όσο και από την διάμετρο της δεξαμενής. Οι τιμές για την ταχύτητα ροής του νερού ψύξης προκύπτουν είτε από αναφερόμενα πρότυπα είτε με βάση την προσπίπτουσα ακτινοβολία στην δεξαμενή. Ωστόσο, οι τιμές των προτύπων εμφανίζουν μειωμένη ακρίβεια.





ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. "All about fire". <http://www.nfpa.org/news-and-research/news-and-media/press-room/reporters-guide-to-fire-and-nfpa/all-about-fire> (accessed June 2017).
2. Ε. Λόης, Φ. Ζαννίκος και Δ. Καρώνης, Τεχνολογία Καυσίμων και Λιπαντικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο: Αθήνα, 2014, σελ. 1, 6, 7.
3. "Παράγοντες που επηρεάζουν την συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών". <http://www.fria.gr/mmfria/index.php?id=100&catid=38&lan=GR&tl=CATEGORYID> (πρόσβαση Ιούνιος 2017).
4. "Chapter 41-Fire". <http://www.ilocis.org/documents/chpt41e.htm> (accessed June 2017).
5. J. R. Hall, "Fires Starting With Flammable Gas or Flammable or Combustible Liquid", National Fire Protection Association (NFPA), Fire Analysis and Research Division: Quincy MA, 2014, pp 1-166.
6. "Hydrogen Flames", <https://h2tools.org/bestpractices/h2introduction/hazards/flames> (accessed June 2017).
7. "The dangers of acetylene". <https://www.hantsfire.gov.uk/keeping-safe/atwork/acetylene/> (accessed June 2017).
8. "Working safely with acetylene". <http://www.hse.gov.uk/pubns/indg327.pdf> (accessed June 2017).
9. W. P. Crocker and D. H. Napier, "Thermal Radiation Hazards of Liquid Pool Fires and Tank Fires", Chem. E. Symposium Series No. 97, Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry, University of Toronto, Canada M5S 1A4, pp 159.
10. "Storage Tank Fires: Is Your Department Prepared?". <http://www.fireengineering.com/articles/print/volume-161/issue-11/features/storage-tank-fires-is-your-department-prepared.html> (accessed May 2017).



11. C. H. Shelley, "Continuing Education Course-Storage Tank Fires: Is Your Department Prepared?", Fire Engineering University, pp 3-6.
12. "Number of Fires by type of fire". <http://www.nfpa.org/news-and-research/fire-statistics-and-reports/fire-statistics/fires-in-the-us/overall-fire-problem/number-of-fires-by-type-of-fire> (accessed June 2017).
13. W. Atherton and J. W. Ash, "Review of failures, causes & consequences in the bulk storage industry", Liverpool John Moores University, Faculty of Technology and Environment, School of the Built Environment, Liverpool UK, pp 2-4.
14. V. I. Blinov and G. N. Khudiakov, "Certain Laws Governing Diffusive Burning of Liquids", *Academii Nauks, SSR Doklady*, 1957, pp 1094-1098.
15. H. C. Hottel, "Certain Laws Governing Diffusive Burning of Liquids", *Fire Res. Abstr. Rev.* 1959, Vol. 1 (Issue 41).
16. K. S. Mudan, "Thermal radiation hazards from hydrocarbon pool fires", *Prog. Energy. Combustion*, 1984 Vol. 10, pp 68-69, 71-78.
17. H. C. Hottel, "Review-Certain Laws Governing Diffusive Burning of Liquids, by V. I. Blinov and G. N. Khudiakov", *Fire Research Abstracts and Reviews*, 1958, Vol. 1, pp 41-44.
18. V. I. Blinov and G. N. Khudiakov, "*Diffusion Burning of Liquids*", U. S. Army Translation, 1961.
19. R. C. Corlett and T. M. Fu, "Some Recent Experiments with Pool Fires", *Pyrodynamics*, 1966, Vol. 1, pp 253-269.
20. M. G. Zabetakis and D. S Burgess, "Research on the Hazards Associated with the Production and Handling of Liquid Hydrogen", R. I. 5707, Bureau of Mines, Pittsburgh, 1961.
21. V. Babrauskas, "Estimating Large Pool Fire Burning Rates", *Fire Technology*, 1983, Vol. 19, Issue 4, pp 251-261.
22. P. Jiang and S. Lu, "Pool Fire Mass Burning Rate and Flame Tilt Angle under Crosswind in Open Space", *Procedia Engineering*, 2016, Vol. 135, pp 261-274.



23. R. Tu, Y. Zeng, J. Fang and Y. Zhang, "Low air pressure effects on burning rates of ethanol and n-heptane pool fires under various feedback mechanisms of heat", *Applied Thermal Engineering*, 2016, Vol. 99, pp 545-549.
24. J. Grumer, A. Strasser, T. A. Kubala and D. S. Burgess, "Uncontrolled Diffusive Burning of Some New Liquid Propellants", *Fire Res. Abstr. Rev.*, 1961, Vol. 3, Issue 159.
25. "Urban Development Siting with Respect to Hazardous Commercial/Industrial Facilities", HUD Report HUD-777-CPD, Department of Housing and Urban Development, April 1982.
26. K. B. McGrattan, H. R. Baum, A. Hamins, "Thermal Radiation from Large Pool Fires", *U. S. Department of Commerce, Fire Safety Engineering Division, Building and Fire Research Laboratory, United States of America*, United States of America, November 2000, pp 1-2, 3-10.
27. D. A. Coutts, "An emissive power correlation for solid fuel packages", *Journal of Fire Protection Engineering*, 2011, Vol. 21, Issue 3, pp 133 - 139.
28. "Safety Considerations in Siting Housing Projects", HUD Report 0050137, Department of Housing and Urban Development, 1975.
29. W. D. Walton et al, "In-situ burning of oil spills: Meso-scale experiments and analysis, Proceedings of the 16th Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar", Environment Canada, Emergencies Science Division, Ottawa, Ontario, Canada, June 1993, pp 679-734.
30. J. C. Yang, A. Hamins and T. Kashiwagi, "Estimate of the Effect of Scale on Radiative Heat Loss Fraction and Combustion Efficiency", *Combustion Science and Technology*, 1994, Vol. 96, pp 183-188.
31. H. Koseki and T. Yumoto, "Air Entrainment and Thermal Radiation from Heptane Pool Fires", *Fire Technology*, February 1988.
32. "Engineering Guide for Assessing Flame Radiation to External Targets from Pool Fires", Society of Fire Protection Engineers: Bethesda, Maryland, June 1999.



33. K. S. Mudan and P. A. Croce, "Fire Hazard Calculations for Large Open Hydrocarbon Fires", *SFPE Handbook*, 2nd ed., National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 1995.
34. R. G. Rein, C. M. Sliepcevich and J. R. Welker, "Radiation view factors for titled cylinders", *Journal: Fire and Flammability* 1970.
35. P. K. Raj and A. S. Kalelkar, "Technical Report prepared for the U.S. Coast Guard. *Assessment Models in Support of Hazard Assessment Handbook*, NTIS publication, January 1974.
36. *NFPA 555, Guide on methods for evaluating potential for room flashover*, 2009.
37. B. Hagglund, L-E Persson, "An experimental study of the radiation from wood flames", FOA 4 Rapport C 4589-D6 (A3): Stockholm, Sweden: Forvarets Forskningsanstalt, 1974.
38. B.W. Butler, J. Cohen, D.J. Lathan, R.D. Schuette, P. Sopko, K. S. Shannon et al, "Measurements of radiant emissive power and temperatures in crown fires", *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, Vol. 34, pp 1577-1587.
39. V. Babrauskas, "Ignition handbook", USA: Fire Science Publishers: Issaquah, WA, 2003, pp 523.
40. J. Moorhouse and M. J. Pritchard, "Thermal radiation hazards from large pool fires and fireballs", I. Chem. E. Symposium Series, 1982.
41. V. Babrauskas, "Burning Rates", *SFPE Handbook*, 2nd edition, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 1995.
42. *Fire Protection Handbook*, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 1997.
43. H. C. Hottel and A. F. Sarofim, "Radiative Transfer", McGraw Hill, New York, 1967.
44. K. Buettner, "Effects of Extreme Heat and Cold on Human Skin. II. Surface Temperature, Pain and Heat Conductivity in Experiments with Radiant Heat". *Journal of Applied Physiology*, 1951, Vol. 3, pp 703-713.



45. J. D. Hardy, I. Jacobs and M. D. Meixner, "Thresholds of Pain and Reflex Contraction as Related to Noxious Stimulation", *Journal of Applied Physiology*, 1953, Vol. 5, pp 725-739.
46. A. M. Stoll, L. C. Greene, "Relationship Between Pain and Tissue Damage Due to Thermal Radiation", *Journal of Applied Physiology*, 1959, Vol. 14, pp 373-382.
47. N. Bigelow, I. Harrison, H. Goodell, H. G. Wolf, "Studies on Pain: Quantitative Measurements of Two Pain Sensations of the Skin, With Reference to the Nature of the Hyperalgesia of Peripheral Neuritis", *Journal of Clinical Investigation*, 1945, Vol. 24, pp 503-512.
48. A. K. Mehta, F. Wong and G. C. Williams, "*Measurement of Flammability and Burn Potential of Fabrics*", Summary Report to NSF-Grant #GI-31881; Fuels Research Laboratory, Massachusetts Institute of Technology: Cambridge, Massachusetts, 1973.
49. G. Mixer, "*The Empirical Relation Between Time and Intensity of Applied Thermal Energy in Production of 2+ Burns in Pigs*", No. UR-316, Contract W-7401-eng-49, University of Rochester REport, 1954.
50. FireWords, Glossary of Fire Science Terminology. "Flame length". http://www.firewords.net/definitions/flame_length.htm (accessed April 2017).
51. FireWords, Glossary of Fire Science Terminology. "Flame height". http://www.firewords.net/definitions/flame_height.htm (accessed April 2017).
52. Fire Behavior Field Reference Guide. "Observing Flame Length vs. Flame Height". <http://www.fbrg.org/fire-size-shape/observing-current-fire-behavior> (accessed April 2017).
53. P. H. Thomas, C. T. Webster and M. M. Raftery, "Some experiments on buoyant diffusion flames", *Combustion Flame*, 1961, Vol. 5, pp 359-367.



54. L. Jiao and L. Naian, "Scaling flame height of fully turbulent pool fires based on the turbulent transport properties", *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, Vol. 36, pp 3139-3140.
55. F. Tang, L. Li, Q. Wang and Q. Shi, "Effect of cross-wind on near-wall buoyant turbulent diffusion flame", *Fuel*, 2016, Vol. 186, pp 350-357.
56. S. Atallah and P. K. Raj, "*Radiation from LNG Fires*", American Gas Association, Project IS-3-I, LNG Safety Program-Interin Report on Phase II work: Battelle Columbus Laboratories, July 1, 1974.
57. E. Lois and J. Swithenbank, "Fuel storage tank fires in a crosswind", *First Specialist Meeting (International) of the Combustion Institute*; University of Bordeaux I-France, 20-24 July 1981, pp 634-643.
58. P. H. Thomas, "The Size of Flames from Natural Fires", *Ninth Int. Combustion Symposium*, 1963, pp 844-859.
59. J. Fang, R. Tu, J. Guan, J. Wang and Y. Zhang, "Influence of low air pressure on combustion characteristics and flame pulsation frequency of pool fires", *Fuel*, 2011, Vol. 90, pp 2760-2766.
60. L. H. Hu, F. Tang, Q. Wang and Z. W. Qiu, "Burning characteristics of conduction-controlled rectangular hydrocarbon pool fires in a reduced pressure atmosphere at high altitude in Tibet", *Fuel*, 2013, Vol. 111, pp 298-304.
61. R. Tu, J. Fang, Y. M. Zhang, J. Zhang and Y. Zeng, "Effects of low air pressure on radiation-controlled rectangular ethanol and n-heptane pool fires", *Proceedings Combustion Institute*, 2013, Vol. 34, pp 2591-2598.
62. E. E. Zukoski, B. M. Cetegen and T. Kubota, "Visible structure of buoyant diffusion flames", *Proceedings Combustion Institute*, 1985, Vol. 20, pp 361-366.
63. F. R. Stewart, "Prediction of the Height of Turbulent Diffusion Buoyant Flames", *Combustion Science Technology*, 1970, Vol. 2, pp 203-212.



64. P. K. Raj, K. S. Aravamudan and A. N. Moussa, "*Experiments Involving Pool and Vapour Fires from Spills of LNG on Water*"; Report # CG-D-55-79, NTIS AD 77073, U. S. Coast Guard, 1979.
65. "*LNG Safety Research Program*", Report IS 3-1, American Gas Association, 1974.
66. B. Hagglund and L. Persson, "*The Heat Radiation From Petroleum Fires*", FOA Raport: Forsvarets, Forskingsanstalt, Stockholm, 1976.
67. "*Report on burning of petroleum fires (in Japanese)*", Japan Institute for Safety Engineering, 1982.
68. G. A. Minzer and J. A. Eyre, "Large Scale LNG and LPG Pool Fires". I. Chem. E. Symposium Series # 71, 1982, pp 147-163.
69. R. S. Alger, R. C. Corlett, A. S. Gordon and F. A. Williams, "Some Aspects of Turbulent Pool Fires", *Fire Technology*, 1979, Vol. 15, Issue 2, pp 142-156.
70. J. R. Walker and C. M. Sliepcevick, "Bending of Wind-Blown Flames from Liquid Pools". *Fire Technology*, 1966, Vol. 2, No. 2, pp 127-135.
71. I. Emori and K. Saito, "Scaling Correlation and Smoke Observations of Oil Tank Fires Under Wind-Blown Conditions", *Chemical and Physical Process in Combustion, Fall Technical Meeting, Combustion Institute/Eastern States Section, Providence, RI*, 1983, Vol. 67, pp 1-4.
72. M. Munoz, J. Arnaldos, J. Casal and E. Planas, "Analysis of the geometric and radiative characteristics of hydrocarbon pool fires", *Combustion and Flame*, 2004, Vol. 139, pp 263-277.
73. J. A. Fay, "Model of large pool fires, *Journal of Hazardous Materials*", 2006, pp 219-232.
74. O. A. Pipkin and C. M. Sliepcevick, "The effect of wind on Buoyant Diffusion Flames", *Industry of Engineering Chemistry Fundamentals*, 1964, Vol. 3, pp 147.
75. T. Yumoto, "Radiation from Oil Tank Fire", *Journal of Japan Society for Safety Engineering*, 1971, Vol. 10, No. 3.



76. A.D. Johnson, "A model for predicting thermal radiation hazards from large scale, LNG fires". *I Chem E. Symposium Ser.*, 1992, Vol. 130, pp 507-524.
77. M. J. Pritchard and T. M. Binding, "Symposium on Major Hazards Onshore and Offshore", 1992, pp 491-505.
78. P.J. Rew., W.G. Hulbert, "Development of Pool-Fire Thermal Radiation Model", In *HSE Books*, Sudbury, Suffolk, 1996, pp 99.
79. P. H. Thomas, "The Size of Flames from Natural Fires", *Ninth Symposium (International) on Combustion*, Combustion Institute, Pittsburgh, 1962, pp 844-859.
80. T. Romen Singh et al, "A New Local Adaptive Thresholding Technique in Binarization", *JCSI International Journal of Computer Science Issues*, 2011, Vol. 8, Issue 6.
81. A. R. Lopez, L. A. Gritzo and M. P. Sherman, "*Risk Assessment Compatible Fire Models (RACFM)*", SAND Report 97-1562, Sandia National Laboratories: Albuquerque, 1998.
82. Longhua Hu et al, "A new mathematical quantification of wind-blown flame tilt angle of hydrocarbon pool fires with a new global correlation model", *Fuel*, 2013, Vol. 106, pp 730-736.
83. T. Steinhaus, S. Welch, R. Carvel and J. L.Torero, "Large-scale pool fires", *Thermal Science Journal* 2007, Vol. 11 (Issue 3), pp. 8-9, 10-11, 12, 13.
84. P. Joulain, "*Behavior of pool fires: State of the art and new insights*", Proceedings 27th Symposium (International) on Combustion, Boulder, CO, USA: Combustion Institute: Pittsburgh, PA, 1998.
85. N. Takahashi, M. Suzuki, R. Dobashi and T. Hirano, "Behavior of luminous zones appearing on plumes of large-scale pool fires of kerosene", *Fire Safety Journal*, 1999; Vol. 33, Issue 1, pp 1-10.
86. P. Smith, "*Large Eddy Simulations of Accidental Fires Using Massively Parallel Computers*", Proceedings 16th AIAA Computational Fluid Dynamics



- Conference, June 23-16, American Institute of Aeronautics and Astronautics: Orlando, Florida, 2003.
87. E. Λόης, Φ. Ζαννίκος, Δ. Καρώνης, "Θεωρία και Τεχνική της Καύσης", Ε.Μ.Π.: Αθήνα, 2009 σελ 22.
88. K. M. Leung, R. P. Lindstedt and W. P. Jones, "A Simplified Reaction Mechanism for Soot Formation in Nonpremixed Flames", *Combustion and Flame*, London, 1991, Vol. 87, Issues 3-4, pp 291-294.
89. S. J. Harris and A. M. Weiner, *Combustion Science Technology*, 1983, Vol. 32, pp 267-275.
90. K. B. Lee, M. W. Thring and J. M. Beer, "On the rate of combustion of soot in a laminar soot flame", *Combustion and Flame* 1962, Vol. 6, pp 137.
91. A. Garo, G. Prado and J. Lahaye, *Combustion Flame*, 1990, Vol. 79, pp 226-233.
92. R. Dobashi, Z. Kong, A. Toda, N. Takahashi, M. Suzuki and T. Hirano, "Mechanism of Smoke Generation in a Flickering Pool Fire", *Fire Safety Science-Proceeding of the Sixth International Symposium, Department of Chemical System Engineering, School of Engineering, The University of Tokyo*, Hong, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan, pp 256-262.
93. L. Waldmann, "On the motion of spherical particles in nonhomogeneous gases", *Rarefied Gas Dynamics (ed. by L. Talbot)*, Academic Press Inc. New York, pp 323-344.
94. G. Mulholland, W. Liggett, H. Koseki, "The effect of pool diameter on the properties of smoke produced by crude oil fires", *Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute*, 1996, pp 1446-1450.
95. H. Koseki and G. W. Mulholland, "Effect of Diameter on the Burning of Crude Oil Pool Fires", *Fire Technology*, 1991, pp 54-65.
96. W. Walton, W. Twilley, J. McElroy and D. Evans, "Proceedings of the Seventeenth Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar", *Ministry of Supply and Services Canada*, 1994, Vol. 2, pp 1083-1098.



97. D. Evans, W. Walton, H. Baum, K. Notarianni, J. Lawson, H. Tang, K. Keydel, R. Rehm, D. Madrzykowski, R. Zile, H. Koseki and E. Tennyson, "Proceedings of the Fifteenth Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar", *Ministry of Supply and Services Canada*, 1992, pp 593-657.
98. W. Walton, D. Evans, K. McGratton, H. Baum, W. Twilley, D. Madrzykowski, A. Putorti, R. Rehm, H. Koseki and E. Tennyson, "Proceedings of the Sixteenth Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar", *Ministry of Supply and Services Canada*, 1993, pp 679-734.
99. K. K. Laursen, R. J. Ferek, P. V. Hobbs and R. A. Rasmussen, "Emission factors for particles, elemental carbon, and trace gases from Kuwait oil fires", *Journal of Geophysical Research* 97, 1992, pp 14491-14497.
100. W. R. III Cofer, R. K. Steven, E. L. Winstead, J. P. Pinto, D. I. Sebacher, M. Y. Abdulraheem, M. Al-Sahari, M. A. Mazurek, R. A. Rasmussen, D. R. Cahoon and J. S. Levine, *Journal of Geophysical Research* 97, 1992, pp 14521-14525.
101. U. O. Koylu and G. M. Faeth, "Structure of overfire soot in buoyant turbulent diffusion flames at long residence times", *Combustion Flame*, 1992, Vol. 89, pp 140-156.
102. L. F. Radke, J. H. Lyons, P. V. Hobbs and R. E. Weiss, *Journal of Geophysical Research*, 1990, pp 14,071-14,076.
103. D. W. Johnson, C. G. Kilsby, D. S. McKenna, R. W. Saunders, G. J. Jeunkins, F. B. Smoith and J. S. Foot, *Nature*, 2001, pp 617-621.
104. R. A. Dobbins, R. A. Fletcher and W. Lu, *Combustion Flame*, "Laser microprobe analysis of soot precursor particles and carbonaceous soot", 1995, pp 301-309.
105. C. Shaddix, A. Palotas, C. Megaridis, M. Choi, N. Yang, "Soot graphitic order in laminar diffusion flames and a large-scale JP-8 pool fire", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, Vol. 48, pp 3604-3614.
106. J. M. Williams and L. A. Gritzio, "In situ sampling and transmission electron microscope analysis of soot in the flame zone of large pool fires", *Proceedings Combustion Institute*, 1998, Vol. 27, pp 2707-2714.



107. A. M. Ghasemi, F. Nourai, "A framework for minimizing domino effect through optimum spacing of storage tanks to serve in land use planning risk assessments", *Safety Science*, 2016, pp 1-7.
108. N. Ramsden and K. A. M. Abusaieda, "A Study of Water Cooling using Different Water Application Techniques to Protect Storage Tank Walls against Thermal Radiation", *Process Safety and Environment Protection*, 2017, pp 1-74.
109. "Fire Precautions at Petroleum Refineries and Bulk Storage Installations", Part 19 of the Institute of Petroleum Model Code of Safe Practice in the Petroleum Industry, IP 19, Institute of Petroleum: Wiley, 2012.
110. N. Jain and J. P. Gupta, "Water requirement in tank farm fire", *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2007, Vol. 55, pp 167-173.
111. National Fire Codes, "Water Spray Fixed Systems for Fire Protection", *National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts* 2003, Vol. 2.
112. API AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. "Application of Fixed Water Spray Systems for Fire-Protection in the Petroleum and Petrochemical Industries ", API Recommended Practice 2030 , 2014.
113. "Χαρακτηριστικά αναφλεξιμότητας".
<http://www.firesecurity.gr/bibliothiki/pyrox4.htm> (πρόσβαση Ιούνιος 2017).
114. "Επίδραση των προϊόντων μιας πυρκαγιάς στον άνθρωπο".
<http://www.firesecurity.gr/bibliothiki/pykat4.htm> (πρόσβαση Ιούνιος 2017).
115. "Thermophoresis".
https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-0-387-48998-8_1582 (accessed August 2017).
116. M. Shokri and C. L. Beyler, "Radiation from Large Pool Fires", *Journal of Fire Protection Engineering*, 1989;,Vol. 1, Issue 4, pp 141-149.
117. L. H. Hu, L. Wu and S. Liu, "Flame length elongation behavior of medium hydrocarbon pool fires in cross air flow", *Fuel*, 2013, Vol. 111, pp 613-620.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Μετάφραση αντίστοιχων όρων

ΑΓΓΛΙΚΟΣ ΟΡΟΣ	ΜΕΤΑΦΡΑΣΗ-ΕΡΜΗΝΕΙΑ
axial temperature	θερμοκρασία κατά μήκος του άξονα ή αξονική θερμοκρασία
plume	πλουμίο
buoyant	πλεύση
intemittent zone	διακοπτόμενη ζώνη
radiant heat flux	θερμότητα ακτινοβολίας
pan	λεκάνη
binary image	δυναμική εικόνα
grey image	γκρι εικόνα
pool fire	φωτιά λεκάνης υγρού καυσίμου
tank fire	φωτια δεξαμενής
view factor	συντελεστής ορατότητας
heat release rate	ταχύτητα απελευθέρωσης θερμότητας
near wall flame	φλόγα κοντά στο τοίχιο
free burning flame	ελεύθερη φλόγα
mass burning rate	ταχύτητα καύσης μάζας
point source model	σημειακό μαθηματικό μοντέλο
solid flame model	μαθηματικό μοντέλο φλόγας στερεού (καυσίμου)
turbulent diffusion flames	τυρβώδεις φλόγες διάχυσης
flame tilt angle	γωνία κλίσης της φλόγας
lateral wall	πλευρικό τοίχιο
dimensionless flame length	αδιάστατο μήκος φλόγας
binarization processing	η μετατροπή μιας εικονοστοιχίας εικόνας σε δυναμική εικόνα
flickering flame	ασταθής φλόγα



◇	thermophoretic force	ισχύς θερμοφόρησης
◇	thermophoresis	θερμοφόρηση
◇	tank farm	χώρος δεξαμενών
◇	water application rate	ταχύτητα ροής νερού
◇	overhead water application rate	ταχύτητα ροής νερού
◇	water film	υδάτινο φιλμ
◇	water curtain	κουρτίνα νερού
◇	water spray	εκνέφωμα νερού
◇	flame drag	οπισθέλκουσα φλόγας
◇	structure fires at outside storage tanks	δομικές φωτιές σε εξωτερικές δεξαμενές
◇	outside and other fires at outside storage tanks	εξωτερικές και άλλες φωτιές σε εξωτερικές δεξαμενές
◇	flashover	καθολική ανάφλεξη
◇	rollover	κυλώ, κύλισμα
◇	backdraft	οπίσθιο ρεύμα
◇	fireball	μπάλα φωτιάς
◇	flashback	επιστροφή φλόγας
◇	flammable liquids	εύφλεκτα υγρά
◇	combustible liquids	αναφλέξιμα υγρά
◇	rim	χείλος
◇	real	σφραγίζω, σφραγίδα, σφράγισμα
◇	pontoon	σχεδία
◇	unobstructed full liquid surface fires	πλήρης ανεμπόδιστη επιφανειακή φωτιά υγρού
◇	obstructed full liquid surface fires	πλήρης επιφανειακή φωτιά υγρού με εμπόδια
◇	overflow ground fires	επιφανειακές φωτιές που προέρχονται από ξεχύλισμα υγρού καυσίμου
◇	vent fires	φωτιές στον εξαερισμό (των δεξαμενών)



◇	rim-seal fires	φωτιές στο χείλος και σφράγισμα
◇	occupancy	πληρότητα χώρου
◇	dike	ανάχωμα