



*Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων
Σχολή Θετικών Επιστημών
Τμήμα Φυσικής
Τομέας Αστρογεωφυσικής*



Διασπορά επικίνδυνων ρύπων μέσα σε κτίριο – Εκτίμηση κινδύνου.

Ευαγγελία Κ. Λαδιά

Διδακτορική Διατριβή

Ιωάννινα, 2024



University of Ioannina
School of Sciences
Department of Physics
Section of Astro-geophysics



Dispersion of dangerous pollutants in a building – Risk Assessment.

Evangelia K. Ladia

PhD Thesis

Ioannina, 2024

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Πάυλος Κασσωμένος (Επιβλέπων),

Καθηγητής Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων

Αθανάσιος Αργυρίου

Καθηγητής Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Πατρών

Νικόλαος Μπάκας

Επίκουρος Καθηγητής Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή

Πάυλος Κασσωμένος (Επιβλέπων),

Καθηγητής Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων

Αθανάσιος Αργυρίου

Καθηγητής Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Πατρών

Νικόλαος Μπάκας

Επίκουρος Καθηγητής Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων

Νικόλαος Χατζηαναστασίου

Καθηγητής του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων

Αλέξανδρος Νίντος

Καθηγητής του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων

Χρήστος Λώλης

Αναπληρωτής Καθηγητής του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων

Θεοδόσιος Θεοδοσίου

Αναπληρωτής Καθηγητής του Τμήματος Συστημάτων Ενέργειας του Πανεπιστημίου

Θεσσαλίας

Πρόλογος

Η παρούσα διδακτορική διατριβή με τίτλο «Διασπορά επικίνδυνων ρύπων μέσα σε κτίριο – Εκτίμηση Κινδύνου», εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Μετεωρολογίας του Τομέα Αστρογεωφυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων κατά τη χρονική περίοδο 2016-2023.

Από τα αποτελέσματα της διατριβής προέκυψε μία δημοσίευση σε επιστημονικό περιοδικό και δύο ανακοινώσεις σε διεθνή συνέδρια. Ακολουθεί σχετική λίστα των δημοσιεύσεων:

Ladia E. On the dispersion of a light chemical agent in a semi-closed environment. A theoretical study. *MethodsX*. 2023 Apr 26; 10:102200. doi: 10.1016/j.mex.2023.102200.

Ladia E, Petrou I, Begou P, Kassomenos P, “Studying the Dispersion of a Chemical Agent in an Indoor Environment.” 15th International Conference on Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics, September 26-29, 2021, Ioannina, Greece, Conference Proceedings, 87-91 (2021).

Ladia E, Kyriopoulos F, Paschalidou An, Kassomenos P, “Studying the Dispersion of a Heavy Gas in a Venue”, 14th International Conference on Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics, October 15-17, 2018, Alexandroupolis, Greece, Conference Proceedings, 822-827 (2018).

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διδακτορικής διατριβής μου, θα ήθελα να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους όσους με βοήθησαν να φέρω σε πέρας αυτή μου την προσπάθεια.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διατριβής μου κ. Παύλο Κασσωμένο, Καθηγητή του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, για την επιστημονική υποστήριξη, την καθοδήγηση του και την συνολική του συμβολή στη διαμόρφωση του τρόπου σκέψης μου. Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω την ιδιαίτερη εκτίμησή μου προς το πρόσωπο του για την κατανόηση και την ηθική στήριξη που μου έδειξε σε δύσκολες στιγμές που αντιμετώπισα κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής μου, αποδεικνύοντας πως, εκτός από έναν εξαιρετο επιστήμονα, πρόκειται για έναν σπουδαίο άνθρωπο.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα Μέλη της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής κ. Αθανάσιο Αργυρίου, Καθηγητή του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Πατρών και κ. Νικόλαο Μπάκα, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, που με τις συμβουλές και τις παρατηρήσεις τους συνέβαλαν καθοριστικά στη λογική ροή και στη βελτιστοποίηση της δομής της διατριβής μου.

Ευχαριστώ επίσης όλα τα Μέλη Ακαδημαϊκού Προσωπικού του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων στα οποία απευθύνθηκα μέσα σε αυτά τα χρόνια ζητώντας τη βοήθεια τους, την οποία πάντα απλόχερα μου προσέφεραν, καθώς και τα Μέλη της Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής για την αποδοχή της πρότασης να αξιολογήσουν την διδακτορική διατριβή μου, για τον χρόνο που διέθεσαν, το ενδιαφέρον τους και τις ουσιαστικές τους παρατηρήσεις.

Τέλος, ευχαριστώ όλους εκείνους που στάθηκαν δίπλα μου στηρίζοντάς με ηθικά σε αυτή μου την προσπάθεια, φίλους, οικογένεια, όσους βρίσκονται κοντά και όσους βρίσκονται μακριά. Χωρίς αυτούς ένας δύσκολος δρόμος θα ήταν ακόμα δυσκολότερος και γι' αυτό θα τους χρωστάω παντοτινή ευγνωμοσύνη.

Περιεχόμενα

Ευρετήριο Σχημάτων	xι
Ευρετήριο Πινάκων	xv
Πίνακας Ακρωνυμίων	xvii
Περίληψη	xix
Abstract	xxi
Εισαγωγή	1
1 Χημικοί παράγοντες	7
1.1 Ορισμοί, μηχανισμοί έκθεσης και επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία	7
1.2 Χημικά περιστατικά	8
1.3 Οριακές Τιμές Έκθεσης σε Χημικούς Παράγοντες	9
1.3.1 Ιστορική Αναδρομή	9
1.3.2 Όρια Άμεσης Επικινδυνότητας για τη Ζωή και την Υγεία (IDLH)	11
1.3.3 Όρια Οξείας Έκθεσης (AEGIs)	12
1.4 Εξεταζόμενοι χημικοί παράγοντες	13
1.4.1 Αμμωνία	13
1.4.2 Φωσγένιο	17
2 Υπολογιστική Ρευστομηχανική	23
2.1 Εισαγωγή στις μεθόδους Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής	23
2.2 Γεωμετρία πεδίου ροής	25
2.3 Χωρική διακριτοποίηση	25
2.3.1 Μέθοδοι χωρικής διακριτοποίησης	26
2.3.2 Είδη πλεγμάτων	28
2.4 Μέθοδοι προσομοίωσης τυρβώδους ροής	29
2.4.1 Άμεση αριθμητική μοντελοποίηση (DNS)	30
2.4.2 Κατά Reynolds ολοκλήρωση των εξισώσεων Navier-Stokes (RANS)	30

Περιεχόμενα

2.4.3	Μοντελοποίηση μεγάλων δινών (LES).....	31
2.5	Γενικοί επιλύτες.....	32
3	Μεθοδολογία	37
3.1	Οι Χώροι μελέτης	38
3.1.1	Ο χώρος γραφείου	38
3.1.2	Η αίθουσα εκδηλώσεων «Μυλωνάς».....	38
3.2	Γεωμετρικά μοντέλα των πεδίων ροής	40
3.3	Υπολογιστικά πλέγματα των πεδίων ροής.....	42
3.3.1	Υπολογιστικό πλέγμα του χώρου γραφείου	43
3.3.2	Υπολογιστικό πλέγμα της αίθουσας εκδηλώσεων	47
3.4	Οριακές συνθήκες των πεδίων ροής.....	50
3.5	Παράμετροι προσομοίωσης ροών	51
3.5.1	Γενικός επιλύτης και αλγόριθμοι σύζευξης πίεσης – ταχύτητας.....	51
3.5.2	Σχήμα χωρικής διακριτοποίησης διαφορικών εξισώσεων	52
3.5.3	Μέθοδος και μοντέλο προσομοίωσης της τύρβης	52
3.5.4	Μοντέλο χημικής κινητικής.....	54
3.6	Λοιπές παράμετροι και σύνοψη	55
4	Αποτελέσματα.....	59
4.1	Ο χώρος γραφείου.....	59
4.1.1	Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων στο χώρο γραφείου	59
4.1.2	Η κυκλοφορία του περιβάλλοντος αέρα στο χώρο γραφείου	61
4.1.3	Η περίπτωση της αμμωνίας στο χώρο γραφείου	62
4.1.4	Η περίπτωση του φωσγενίου στο χώρο γραφείου	76
4.2	Η αίθουσα εκδηλώσεων «Γεώργιος Μυλωνάς»	90
4.2.1	Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων στην αίθουσα εκδηλώσεων	90
4.2.2	Η κυκλοφορία του περιβάλλοντος αέρα στην αίθουσα εκδηλώσεων ..	92
4.2.3	Η περίπτωση της αμμωνίας στην αίθουσα εκδηλώσεων	93
4.2.4	Η περίπτωση του φωσγενίου στην αίθουσα εκδηλώσεων	106

5	Συμπεράσματα	123
	Παραρτήματα	127
I.	Χημικά Περιστατικά ανθρωπογενούς προέλευσης	127
II.	Μέση Θανατηφόρος Συγκέντρωση	135
III.	Παράγοντες Αβεβαιότητας (Τοξικολογία)	137
	Αναφορές	141

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Αναπαράσταση Μεθόδων Χωρικής Διακριτοποίησης σε 2D δομημένο πλέγμα / Πηγή: (37)	27
Σχήμα 2.2: Αναπαράσταση Μεθόδων Χωρικής Διακριτοποίησης σε 2D μη δομημένο πλέγμα	28
Σχήμα 2.3: Δομημένο και μη δομημένο 3D πλέγμα σε τομή.	29
Σχήμα 2.4: Κατανομή ταχύτητας για τυρβώδες ρεύμα αέρα με τις μεθόδους RANS, LES και DNS / Πηγή εικόνας: [38], σελ. 199.	31
Σχήμα 2.5: Διάγραμμα ροής διαδικασιών αλγορίθμου SIMPLE για προβλήματα μόνιμης ροής.	35
Σχήμα 2.6: Διάγραμμα ροής διαδικασιών αλγορίθμου PISO για προβλήματα χρονικά μεταβαλλόμενης ροής.	36
Σχήμα 3.1: Κάτοψη χώρου γραφείου.	39
Σχήμα 3.2: Κάτοψη αίθουσας εκδηλώσεων «Γεώργιος Μυλωνάς».	40
Σχήμα 3.3: 3D γεωμετρικό μοντέλο του χώρου γραφείου.	41
Σχήμα 3.4: 3D γεωμετρικό μοντέλο της αίθουσας εκδηλώσεων "Γεώργιος Μυλωνάς".	41
Σχήμα 3.5: Υπολογιστικό πλέγμα του πεδίου ροής του χώρου γραφείου για την περίπτωση της αμμωνίας.	45
Σχήμα 3.6: Υπολογιστικό πλέγμα του πεδίου ροής του χώρου γραφείου για την περίπτωση του φωσγενίου.	46
Σχήμα 3.7: Υπολογιστικό πλέγμα του πεδίου ροής της αίθουσας εκδηλώσεων "Γεώργιος Μυλωνάς", για τις περιπτώσεις της αμμωνίας και του φωσγενίου.	49
Σχήμα 4.1: Οριζόντια επίπεδα 1.20m και 1.80m AGL, που οριοθετούν την ζώνη αναπνοής στο χώρο γραφείου.	60
Σχήμα 4.2: Κατακόρυφα επίπεδα x-z και y-z στη θέση της πηγής, στο χώρο γραφείου.	60
Σχήμα 4.3: Γραμμές ροής του ρεύματος αέρα πριν την εκπομπή των χημικών παραγόντων, στο χώρο γραφείου.	61
Σχήμα 4.4: Διανύσματα της ταχύτητας του ρεύματος αέρα στα επίπεδα αναπνοής πριν την εκπομπή των χημικών παραγόντων, στο χώρο γραφείου.	62
Σχήμα 4.5: Συγκεντρώσεις αμμωνίας στον χώρο γραφείου, στην θέση της πηγής κατά ύψος (z), σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωση της.	63
Σχήμα 4.6: Διασπορά αμμωνίας στο χώρο γραφείου σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωσή της.	64
Σχήμα 4.7: Συγκεντρώσεις του νέφους αμμωνίας σε διάφορα επίπεδα AGL της ζώνης αναπνοής στο χώρο γραφείου, τις χρονικές στιγμές 5, 10 και 15 λεπτά μετά την απελευθέρωσή της.	65
Σχήμα 4.8: Η κατανομή των συγκεντρώσεων αμμωνίας στο χώρο γραφείου 5 και 10 λεπτά μετά την απελευθέρωσή της, στο επίπεδο x-z που τέμνει κατακόρυφα την πηγή.	66
Σχήμα 4.9: Συγκεντρώσεις αμμωνίας στο χώρο γραφείου, σε διάφορα ύψη πάνω από τη θέση της πηγής, για διάφορες χρονικές στιγμές από την απελευθέρωσή της, συγκριτικά με το IDLH.	67

Σχήμα 4.10: Συγκεντρώσεις αμμωνίας μεγαλύτερες του IDLH στο χώρο γραφείου σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωσή της.	67
Σχήμα 4.11: Η κατανομή των συγκεντρώσεων της αμμωνίας στο χώρο γραφείου 15 λεπτά μετά την απελευθέρωσή της, στα επίπεδα x-z και y-z που τέμνουν κατακόρυφα την πηγή, συγκριτικά με το IDLH.	68
Σχήμα 4.12: Η κατανομή των συγκεντρώσεων αμμωνίας σε διάφορα οριζόντια επίπεδα AGL, τις χρονικές στιγμές 5,10 και 15 λεπτά μετά την απελευθέρωσή της, συγκριτικά με το IDLH, στο χώρο γραφείου.	69
Σχήμα 4.13: Νέφη συγκεντρώσεων μεγαλύτερων των οριακών τιμών AEGl για την αμμωνία στο χώρο γραφείου, για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτά.	71
Σχήμα 4.14: Οριακές τιμές AEGl για την αμμωνία στα επίπεδα αναπνοής 1.20m και 1.80m AGL, για χρόνο έκθεσης 10 λεπτά, στο χώρο γραφείου.	75
Σχήμα 4.15: Οριακές τιμές AEGl για την αμμωνία στα επίπεδα αναπνοής 1.20m και 1.80m AGL, για χρόνο έκθεσης 30 λεπτά, στο χώρο γραφείου.	75
Σχήμα 4.16: Συγκεντρώσεις φωσγενίου στον χώρο γραφείου, στην θέση της πηγής κατά ύψος (z), σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωσή του.	77
Σχήμα 4.17: Διασπορά φωσγενίου στο χώρο γραφείου σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωσή του.	78
Σχήμα 4.18: Συγκεντρώσεις του νέφους φωσγενίου σε διάφορα επίπεδα AGL μέχρι την οροφή του χώρου γραφείου, τις χρονικές στιγμές 5, 10, 15 και 20 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του.	79
Σχήμα 4.19: Η κατανομή των συγκεντρώσεων φωσγενίου στο χώρο γραφείου 5 και 10 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του, στο επίπεδο x-z που τέμνει κατακόρυφα την πηγή.	80
Σχήμα 4.20: Συγκεντρώσεις φωσγενίου στο χώρο γραφείου, σε διάφορα ύψη πάνω από τη θέση της πηγής, για διάφορες χρονικές στιγμές από την απελευθέρωσή του, συγκριτικά με το IDLH.	81
Σχήμα 4.21: Συγκεντρώσεις φωσγενίου μεγαλύτερες του IDLH στο χώρο γραφείου, σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωσή του.	81
Σχήμα 4.22: Η κατανομή των συγκεντρώσεων του φωσγενίου στο χώρο γραφείου 10 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του, στα επίπεδα x-z και y-z που τέμνουν κατακόρυφα την πηγή, συγκριτικά με το IDLH.	82
Σχήμα 4.23: Η κατανομή των συγκεντρώσεων φωσγενίου στα επίπεδα αναπνοής και πάνω από αυτά, τις χρονικές στιγμές 5,10,15 και 20 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του, στο χώρο γραφείου.	83
Σχήμα 4.24: Νέφη συγκεντρώσεων μεγαλύτερων των οριακών τιμών AEGl για το φωσγένιο στο χώρο γραφείου, για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτών.	86
Σχήμα 4.25: Οριακές τιμές AEGl για το φωσγένιο, στα επίπεδα αναπνοής 1.20m και 1.80m AGL, για χρόνο έκθεσης 10 λεπτά, στο χώρο γραφείου.	89
Σχήμα 4.26: Οριακές τιμές AEGl για το φωσγένιο, στα επίπεδα αναπνοής 1.20m και 1.80m AGL, για χρόνο έκθεσης 30 λεπτά, στο χώρο γραφείου.	89

Σχήμα 4.27: Οριζόντια επίπεδα 1.20m και 1.80m AGL, που οριοθετούν την ζώνη αναπνοής στην αίθουσα εκδηλώσεων.	90
Σχήμα 4.28: Κατακόρυφα επίπεδα x-z και y-z στη θέση της πηγής, στην αίθουσα εκδηλώσεων.	91
Σχήμα 4.29: Θέσεις εξέτασης των συγκεντρώσεων των χημικών παραγόντων στην αίθουσα εκδηλώσεων.	91
Σχήμα 4.30: Γραμμές ροής του ρεύματος αέρα πριν την εκπομπή των χημικών παραγόντων, στην αίθουσα εκδηλώσεων.	92
Σχήμα 4.31: Κατανομή ταχυτήτων των ρευμάτων αέρα στα επίπεδα αναπνοής, για την αίθουσα εκδηλώσεων.	93
Σχήμα 4.32: Συγκεντρώσεις αμμωνίας στην αίθουσα εκδηλώσεων, στην θέση της πηγής κατά ύψος (z), σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωση της.	94
Σχήμα 4.33: Διασπορά αμμωνίας στην αίθουσα εκδηλώσεων σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωσή της.	94
Σχήμα 4.34: Συγκεντρώσεις του νέφους αμμωνίας σε διάφορα επίπεδα AGL της ζώνης αναπνοής στην αίθουσα εκδηλώσεων, τις χρονικές στιγμές 5, 10 και 15 λεπτά μετά την απελευθέρωσή της.	96
Σχήμα 4.35: Συγκεντρώσεις αμμωνίας στην αίθουσα εκδηλώσεων, σε διάφορα ύψη πάνω από τη θέση της πηγής, για διάφορες χρονικές στιγμές από την απελευθέρωσή της, συγκριτικά με το IDLH.	97
Σχήμα 4.36: Συγκεντρώσεις αμμωνίας μεγαλύτερες του IDLH στην αίθουσα εκδηλώσεων, σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωσή της.	98
Σχήμα 4.37: Η κατανομή των συγκεντρώσεων της αμμωνία στην αίθουσα εκδηλώσεων 10 λεπτά μετά την απελευθέρωσή της, στα επίπεδα x-z και y-z που τέμνουν κατακόρυφα την πηγή, συγκριτικά με το IDLH.	99
Σχήμα 4.38: Η κατανομή των συγκεντρώσεων της αμμωνία στην αίθουσα εκδηλώσεων 10 λεπτά μετά την απελευθέρωσή της, στο επίπεδο y-z που βρίσκεται σε απόσταση 1.00m από την πηγή προς τον βορρά.	99
Σχήμα 4.39: Η κατανομή των συγκεντρώσεων αμμωνίας σε διάφορα οριζόντια επίπεδα AGL, τις χρονικές στιγμές 5, 10 και 15 λεπτά μετά την απελευθέρωσή της, συγκριτικά με το IDLH, στην αίθουσα εκδηλώσεων.	100
Σχήμα 4.40: Νέφη συγκεντρώσεων μεγαλύτερων των οριακών τιμών AEGl για την αμμωνία στην αίθουσα εκδηλώσεων, για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτά.	101
Σχήμα 4.41: Συγκεντρώσεις αμμωνίας σε διάφορα ύψη στη θέση "A" της αίθουσας εκδηλώσεων, συγκριτικά με τα AEGl-1 και AEGl-2, για χρόνο έκθεσης 10 λεπτά.	102
Σχήμα 4.42: Συγκεντρώσεις αμμωνίας σε διάφορα ύψη στη θέση "B" της αίθουσας εκδηλώσεων, συγκριτικά με τα AEGl-1 και AEGl-2, για χρόνο έκθεσης 10 λεπτά.	102
Σχήμα 4.43: Οριακές τιμές AEGl για την αμμωνία στα επίπεδα αναπνοής 1.20m και 1.80m AGL, για χρόνο έκθεσης 10 λεπτά, στην αίθουσα εκδηλώσεων.	105

Σχήμα 4.44: Οριακές τιμές AEGl για την αμμωνία στα επίπεδα αναπνοής 1.20m και 1.80m AGL, για χρόνο έκθεσης 30 λεπτά, στην αίθουσα εκδηλώσεων.	106
Σχήμα 4.45: Συγκεντρώσεις φωσγενίου στην αίθουσα εκδηλώσεων, στην θέση της πηγής κατά ύψος (z), σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωση του.	107
Σχήμα 4.46: Διασπορά φωσγενίου στην αίθουσα εκδηλώσεων σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωσή του.	107
Σχήμα 4.47: Συγκεντρώσεις του νέφους φωσγενίου σε διάφορα επίπεδα AGL της ζώνης αναπνοής στην αίθουσα εκδηλώσεων, τις χρονικές στιγμές 5, 10, 15 και 20 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του.	108
Σχήμα 4.48: Η κατανομή των συγκεντρώσεων φωσγενίου στην αίθουσα εκδηλώσεων 5, 10, 15 και 20 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του, στο επίπεδο x-z που τέμνει κατακόρυφα την πηγή.	109
Σχήμα 4.49: Συγκεντρώσεις του νέφους φωσγενίου σε διάφορα επίπεδα AGL πάνω από τη ζώνη αναπνοής στην αίθουσα εκδηλώσεων, τις χρονικές στιγμές 5, 10, 15 και 20 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του.	111
Σχήμα 4.50: Συγκεντρώσεις φωσγενίου στην αίθουσα εκδηλώσεων, σε διάφορα ύψη πάνω από τη θέση της πηγής, για διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωσή του, συγκριτικά με το IDLH.	112
Σχήμα 4.51: Συγκεντρώσεις φωσγενίου μεγαλύτερες του IDLH στην αίθουσα εκδηλώσεων, σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωσή του.	113
Σχήμα 4.52: Η κατανομή των συγκεντρώσεων του φωσγενίου στην αίθουσα εκδηλώσεων 5 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του, στα επίπεδα x-z και y-z που τέμνουν κατακόρυφα την πηγή.	113
Σχήμα 4.53: Η κατανομή των συγκεντρώσεων φωσγενίου στα οριζόντια επίπεδα της ζώνης αναπνοής, τις χρονικές στιγμές 5,10,15 και 20 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του, στην αίθουσα εκδηλώσεων.	114
Σχήμα 4.54: Νέφη συγκεντρώσεων μεγαλύτερων των οριακών τιμών AEGl για το φωσγένιο στην αίθουσα εκδηλώσεων, για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτά.	117
Σχήμα 4.55: Συγκεντρώσεις φωσγενίου σε διάφορα ύψη στη θέση "C" της αίθουσας εκδηλώσεων, συγκριτικά με τα AEGl-2 και AEGl-3, για χρόνο έκθεσης 10 λεπτά.	118
Σχήμα 4.56: Συγκεντρώσεις φωσγενίου σε διάφορα ύψη στη θέση "D" της αίθουσας εκδηλώσεων, συγκριτικά με τα AEGl-2 και AEGl-3, για χρόνο έκθεσης 10 λεπτά.	118
Σχήμα 4.57: Συγκεντρώσεις φωσγενίου σε διάφορα ύψη στη θέση "E" της αίθουσας εκδηλώσεων, συγκριτικά με τα AEGl-2 και AEGl-3, για χρόνο έκθεσης 30 λεπτά.	118
Σχήμα 4.58: Συγκεντρώσεις φωσγενίου σε διάφορα ύψη στη θέση "F" της αίθουσας εκδηλώσεων, συγκριτικά με τα AEGl-2 και AEGl-3, για χρόνο έκθεσης 30 λεπτά.	119
Σχήμα 4.59: Οριακές τιμές AEGl για το φωσγένιο, στα επίπεδα αναπνοής 1.20m και 1.80m AGL, για χρόνο έκθεσης 10 λεπτά, στην αίθουσα εκδηλώσεων.	122
Σχήμα 4.60: Οριακές τιμές AEGl για το φωσγένιο, στα επίπεδα αναπνοής 1.20m και 1.80m AGL, για χρόνο έκθεσης 30 λεπτά, στην αίθουσα εκδηλώσεων.	122

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1.1: Όριο IDLH για την αμμωνία (27).....	15
Πίνακας 1.2: Όρια AEGs για Αμμωνία (22)	17
Πίνακας 1.3: Όριο IDLH για Φωσγένιο (33).....	19
Πίνακας 1.4: Όρια AEGs για Φωσγένιο (21)	21
Πίνακας 1.5: Μη θανατηφόρες επιπτώσεις φωσγενίου στον άνθρωπο	22
Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά χώρου γραφείου.....	38
Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά της αίθουσας εκδηλώσεων "Γεώργιος Μυλωνάς"	39
Πίνακας 3.3: Διακυμάνσεις του τεστ ανεξαρτησίας της λύσης στο χώρο γραφείου για την αμμωνία..	44
Πίνακας 3.4: Χαρακτηριστικά πλέγματος του πεδίου ροής του χώρου γραφείου, για την περίπτωση της αμμωνίας.....	45
Πίνακας 3.5: Διακυμάνσεις του τεστ ανεξαρτησίας της λύσης στον χώρο γραφείου για το φωσγένιο.	46
Πίνακας 3.6: Χαρακτηριστικά πλέγματος του πεδίου ροής του χώρου γραφείου, για την περίπτωση του φωσγενίου.	47
Πίνακας 3.7: Διακυμάνσεις του τεστ ανεξαρτησίας της λύσης στην αίθουσα τελετών για την αμμωνία	48
Πίνακας 3.8: Διακυμάνσεις του τεστ ανεξαρτησίας της λύσης στην αίθουσα τελετών για το φωσγένιο.	49
Πίνακας 3.9: Χαρακτηριστικά πλέγματος του πεδίου ροής της αίθουσας τελετών «Γεώργιος Μυλωνάς», για τις περιπτώσεις της αμμωνίας και του φωσγενίου.	50
Πίνακας 3.10: Παράμετροι προσομοιώσεων ροής για την περίπτωση της αμμωνίας.....	56
Πίνακας 3.11: Παράμετροι προσομοιώσεων ροής για την περίπτωση του φωσγενίου	57
Πίνακας 4.1: Όριο IDLH για αμμωνία (τροποποιημένο).....	62
Πίνακας 4.2: Όρια AEGs για αμμωνία (τροποποιημένα).	63
Πίνακας 4.3: Επιφάνεια νέφους συγκέντρωσης μεγαλύτερης του IDLH σε διάφορα οριζόντια επίπεδα AGL στο χώρο γραφείου, τις χρονικές στιγμές 5, 10 και 15 λεπτά μετά την απελευθέρωσή της.....	70
Πίνακας 4.4: Επιφάνεια των επιπέδων αναπνοής που καταλαμβάνουν τα νέφη αμμωνίας συγκριτικά με τα AEGs, για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτά, στο χώρο γραφείου.	74
Πίνακας 4.5: Όριο IDLH για φωσγένιο (τροποποιημένο).	76
Πίνακας 4.6: Όρια AEGs για φωσγένιο (τροποποιημένα).....	76
Πίνακας 4.7: Αντιστοίχιση ορίων AEGL με άμεσες ήπιες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία.....	77
Πίνακας 4.8: Επιφάνεια νέφους φωσγενίου συγκέντρωσης μεγαλύτερης του IDLH σε διάφορα επίπεδα AGL, τις χρονικές στιγμές 5,10,15 και 20 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του, στο χώρο γραφείου.	84
Πίνακας 4.9: Επιφάνεια των επιπέδων αναπνοής που καταλαμβάνουν τα νέφη φωσγενίου συγκριτικά με τα AEGs, για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτά, στο χώρο γραφείου.	88

Ευρετήριο Πινάκων

<i>Πίνακας 4.10: Επιφάνεια νέφους συγκέντρωσης μεγαλύτερης του IDLH σε διάφορα οριζόντια επίπεδα AGL στην αίθουσα εκδηλώσεων, τις χρονικές στιγμές 5, 10 και 15 λεπτά μετά την απελευθέρωσή της.....</i>	<i>101</i>
<i>Πίνακας 4.11: Επιφάνεια των επιπέδων αναπνοής που καταλαμβάνουν τα νέφη αμμωνίας συγκριτικά με τα AEGIs, για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτά, στην αίθουσα εκδηλώσεων.</i>	<i>105</i>
<i>Πίνακας 4.12: Επιφάνεια νέφους φωσγενίου συγκέντρωσης μεγαλύτερης του IDLH σε διάφορα επίπεδα AGL, τις χρονικές στιγμές 5,10,15 και 20 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του, στην αίθουσα εκδηλώσεων.</i>	<i>115</i>
<i>Πίνακας 4.13: Επιφάνεια των επιπέδων αναπνοής που καταλαμβάνουν τα νέφη φωσγενίου συγκριτικά με τα AEGIs, για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτά, στην αίθουσα εκδηλώσεων.</i>	<i>121</i>

Πίνακας Ακρωνυμίων

<i>Ακρωνύμιο</i>	<i>Ερμηνεία</i>
<i>AEGL</i>	Acute Exposure Guideline Level
<i>AGL</i>	Above Ground Level
<i>CAD</i>	Computer Aided Design
<i>CFD</i>	Computational Fluid Dynamics
<i>DNS</i>	Direct Numerical Simulation
<i>FDM</i>	Finite Difference Method
<i>FEM</i>	Finite Element Method
<i>FVM</i>	Finite Volume Method
<i>HVAC</i>	Heating Ventilation and Air Conditioning
<i>IAQ</i>	Indoor Air Quality
<i>IDLH</i>	Immediately Dangerous to Life and Health
<i>IGES</i>	Initial Graphics Exchange Specification
<i>LCT</i>	Lethal Concentration Time
<i>LD</i>	Lethal Dose
<i>LES</i>	Large Eddy Simulation
<i>NIOSH</i>	National Institute for Occupational Safety and Health
<i>PISO</i>	Pressure-Implicit with Splitting of Operators
<i>RANS</i>	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
<i>SIMPLE</i>	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations
<i>UF</i>	Uncertainty Factor
<i>VOC</i>	Volatile Organic Compound

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής είναι η εκτίμηση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα μετά από ένα χημικό περιστατικό, σε χώρους που οι χρήστες τους δεν είναι εξοικειωμένοι με την παρουσία χημικών παραγόντων και επομένως δεν είναι κατάλληλα προετοιμασμένοι να εφαρμόσουν μέτρα έκτακτης ανάγκης. Για το σκοπό αυτό, έγινε προσομοίωση της διασποράς αμμωνίας, χημικού παράγοντα ελαφρύτερου του ξηρού αέρα με χαμηλή τοξικότητα και φωσγενίου, χημικού παράγοντα βαρύτερου του ξηρού αέρα και ιδιαίτερος τοξικού μέσα σε ένα τυπικό χώρο γραφείου και στην αίθουσα εκδηλώσεων «Γεώργιος Μυλωνάς», τον κύριο χώρο εκδηλώσεων του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Κάθε χημικός παράγοντας θεωρήθηκε πως απελευθερώνεται σε κάθε χώρο από πηγή που βρίσκεται στο κέντρο αυτού, στη θέση 1.00 m πάνω από το έδαφος (Above Ground Level –AGL). Η ποσότητα που χρησιμοποιήθηκε ήταν η μεγαλύτερη δυνατή που θα μπορούσε να μεταφερθεί στο χώρο από ένα και μόνο άτομο, το οποίο θα ήθελε να δημιουργήσει ένα χημικό περιστατικό χωρίς να γίνει αντιληπτό. Οι προσομοιώσεις έγιναν με τη βοήθεια του λογισμικού Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής ANSYS Fluent. Αρχικά δημιουργήθηκε για κάθε χώρο το τριδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο του πεδίου ροής του με χρήση εξωτερικού λογισμικού CAD, λαμβάνοντας υπόψιν τη δομή και τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες, τον εξοπλισμό, τις θέσεις των ανοιγμάτων, τις θέσεις συστημάτων εξαερισμού καθώς και κάθε άλλο στοιχείο που θα μπορούσε να λειτουργήσει σαν εμπόδιο στη ροή των χημικών παραγόντων. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε για κάθε πεδίο ροής μια σειρά από τριδιάστατα δομημένα πλέγματα και αφού έγινε έλεγχος ανεξαρτησίας της λύσης από το πλέγμα, επιλέχθηκε εκείνο που θα οδηγούσε σε αξιόπιστα αποτελέσματα με τη μικρότερη δυνατή απαίτηση σε υπολογιστικούς πόρους.

Η διασπορά κάθε χημικού παράγοντα έγινε υπό την επίδραση της κυκλοφορίας του περιβάλλοντος αέρα, χωρίς να τεθούν σε λειτουργία τα διαθέσιμα συστήματα εξαερισμού. Η διασπορά κάθε χημικού παράγοντα σε κάθε χώρο παρατηρήθηκε για 30 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του. Σκοπός ήταν η αξιολόγηση της συμβολής του φυσικού αερισμού στην αποσυμφόρηση του περιβάλλοντος αέρα από την παρουσία των χημικών παραγόντων και της αποκατάστασης της ποιότητας του εσωτερικού αέρα (Indoor Air Quality – IAQ), καθώς και η εκτίμηση της πιθανότητας δημιουργίας επικίνδυνων περιοχών, ιδιαίτερα κοντά στην ζώνη ανθρώπινης αναπνοής, όπου οι χρήστες των χώρων θα μπορούσαν να έχουν σοβαρές και πιθανώς μη αναστρέψιμες επιπτώσεις στην υγεία τους. Οι συγκεντρώσεις των χημικών παραγόντων, κυρίως στα επίπεδα αναπνοής, συγκρίθηκαν με τις οριακές τιμές IDLH

Περίληψη

(Immediately Dangerous for Life and Health) και AEGs (Acute Exposure Guideline Levels) για καθένα από αυτούς.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν πως στην περίπτωση της αμμωνίας, η ποσότητα που απελευθερώθηκε δεν είναι ικανή να δημιουργήσει ένα σοβαρό χημικό περιστατικό σε κανένα από τους δύο χώρους. Στους δύο χώρους δημιουργούνται κυρίως περιοχές χαμηλής επικινδυνότητας, όπου οι χρήστες μπορούν να αισθανθούν ήπια ενόχληση του αναπνευστικού, κυρίως 10 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του χημικού παράγοντα. Η κατάσταση είναι σαφώς πιο επιβαρυσμένη στον χώρο γραφείου, που για χρόνο έκθεσης 10 λεπτών οι περιοχές αυτές καταλαμβάνουν σημαντικό μέρος της επιφάνειας των επιπέδων αναπνοής. Στην αίθουσα εκδηλώσεων οι περιοχές χαμηλής επικινδυνότητας περιορίζονται κοντά στη θέση της πηγής, ενώ στο μεγαλύτερο μέρος της, οι χρήστες της είναι πιθανό να μην αντιληφθούν καθόλου την παρουσία της αμμωνίας. Σε κανένα από τους δύο χώρους δεν δημιουργούνται συνθήκες έκτακτης ανάγκης και επομένως οι χρήστες δεν κινδυνεύουν από σοβαρές, μη αναστρέψιμες επιπτώσεις στην υγεία τους ή θάνατο. Τα έπιπλα και ο εξοπλισμός των χώρων δεν φαίνεται να παίζουν ρόλο στην διασπορά του χημικού παράγοντα σε καμία από τις δύο περιπτώσεις. Ο φυσικός αερισμός κρίνεται αποτελεσματικός για την αποσυμφόρηση του περιβάλλοντος αέρα και την αποκατάσταση της IAQ και δεν θεωρείται απαραίτητη η συμβολή τεχνητού αερισμού.

Στην περίπτωση του φωσγενίου η ποσότητα που απελευθερώθηκε, αν και σημαντικά μικρότερη από εκείνη της αμμωνίας, είναι ικανή να δημιουργήσει σοβαρό χημικό περιστατικό και στους δύο εξεταζόμενους χώρους, αφού δημιουργούνται περιοχές όπου οι συγκεντρώσεις του φωσγενίου έχουν πιθανώς αδρανοποιητική ή και θανατηφόρα δράση. Η κατάσταση είναι σαφώς πιο επιβαρυσμένη στο χώρο γραφείου, που οι περιοχές αυτές για χρόνο έκθεσης 10 λεπτών καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο τμήμα της επιφάνειας των επιπέδων αναπνοής και παραμένει εξαιρετικά σοβαρή 30 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του. Στην αίθουσα εκδηλώσεων, η κατάσταση είναι πιο επικίνδυνη για χρόνο έκθεσης 10 λεπτά, που δημιουργούνται περιοχές που το νέφος φωσγενίου έχει αδρανοποιητική δράση, ενώ δεν εντοπίζονται αξιοσημείωτου μεγέθους περιοχές όπου η συγκέντρωση του νέφους έχει θανατηφόρα δράση. Η επίπλωση και ο εξοπλισμός των δύο χώρων που βρίσκονται κοντά στο έδαφος, φαίνεται να παίζουν ρόλο στη διασπορά του χημικού παράγοντα, εμποδίζοντάς τον να κινηθεί προς κατωφέρειες, με αποτέλεσμα νέφη επικίνδυνων συγκεντρώσεων να εντοπίζονται κοντά στην ζώνη αναπνοής. Ο φυσικός αερισμός κρίνεται μη αποτελεσματικός στην αποσυμφόρηση του περιβάλλοντος αέρα και την αποκατάσταση της IAQ και στους δύο χώρους και θεωρείται απαραίτητη η συμβολή και του τεχνητού αερισμού.

Abstract

The present Doctoral Dissertation examines the Indoor Air Quality (IAQ) after a chemical event in two semi-closed environments, in which their occupants are not familiar with the presence of chemical agents, therefore are not properly prepared to apply emergency measures. For this purpose, the dispersion of ammonia, a low toxicity chemical agent lighter than dry air, and the dispersion of phosgene, a highly toxic chemical agent heavier than dry air, were simulated separately in a typical office space and in the venue "Georgios Milonas" of the University of Ioannina.

The chemical agents were released from a source located in the center of each room, at 1.00 m AGL (Above Ground Level). The amount used for each agent, was the largest possible that could be carried into the space by a single person, who would attempt to cause a chemical event without being noticed. The CFD software ANSYS Fluent was used for the simulations. Initially, the three-dimensional geometric model of each flow field was created using an external CAD software, taking under consideration the structure and the constructive components, the layout of objects in each room, the position of doors and windows, the exhaust ventilation, as well as any other object that could act as an obstacle to the chemical agents' flow. Subsequently, different three-dimensional structured meshes were generated for each flow field, grid independence tests were performed in order to ensure the solution's independence from the mesh and finally the mesh that required the least computational power while ensuring reliable results was selected for each case.

The dispersion of each chemical agent was simulated separately in each space under the influence of ambient air's circulation and the available HVAC systems were not put into operation. The dispersion of each chemical agent was observed for 30 minutes after its release. The purpose was to evaluate the natural ventilation's contribution to the decongestion and decontamination of indoor air, as well as the possibility of forming dangerous areas, mainly near the "human breathing zone", where the occupants could develop serious and possibly irreversible effects to their health. For this, the chemical agents' concentrations were compared to the IDLH (Immediately Dangerous for Life and Health) index and the AEGLs (Acute Exposure Guideline Levels) for each chemical agent.

The simulations' results showed that in the case of ammonia, the amount released is incapable of creating a serious chemical event in either space. In both spaces are mainly created low-risk areas, where the occupants can feel mild respiratory irritation, mainly 10 minutes after the chemical agent's release. The case is clearly severest in the office, where for

Abstract

10 minutes exposure time, these areas occupy a significant part of the breathing levels' surface. In the venue, low-risk areas are noticed only around the source, while in the largest part of the space the occupants are unlikely to be aware of ammonia's presence. In neither space are detected areas where emergency conditions exist, therefore the occupants are unlikely to develop serious, irreversible health problems. The furniture and equipment of the two spaces do not seem to affect the dispersion of the chemical agent in either case. Natural ventilation is considered effective for decongesting the ambient air and restoring IAQ, and the contribution of artificial ventilation is not considered necessary.

In the case of phosgene, the amount released, although significantly smaller than that of ammonia, is capable of creating a serious chemical event in both examined spaces. In both spaces are formed dangerous areas in which phosgene's concentrations have disabling or even lethal effect. The case is clearly severest in the office, where for 10 minutes exposure time, these areas occupy the largest part of the breathing levels' surface and does not significantly improve 30 minutes after the release. In the venue, the case is severest 10 minutes after the release, when are mainly formed areas in which the phosgene cloud has disabling effect, while there are not formed significantly sized areas where the cloud's concentration is lethal. The furniture and the equipment, which are close to the ground in both spaces, seem to affect the chemical agent's flow, since they act as obstacles, preventing it from moving downhill, resulting in clouds of dangerous concentrations close to the breathing zone. Natural ventilation is considered inadequate in restoring the IAQ and the contribution of artificial ventilation is necessary.

Εισαγωγή

Ατμοσφαιρική ρύπανση είναι η ύπαρξη στην ατμόσφαιρα διαφόρων παραγόντων, χημικών, φυσικών ή βιολογικών, που αλλοιώνουν τα φυσικά χαρακτηριστικά της και έχουν αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία των έμβιων οργανισμών και στο περιβάλλον. Οι παράγοντες αυτοί με την γενική ονομασία «ρύποι», έχουν συνδεθεί με μια σειρά προβλημάτων υγείας, από απλές οχλήσεις μέχρι σοβαρές παθήσεις του αναπνευστικού συστήματος, καρκίνους κλπ. και μπορούν να μειώσουν σημαντικά το προσδόκιμο ζωής.

Στο παρελθόν, η ατμοσφαιρική ρύπανση αφορούσε σχεδόν αποκλειστικά την ποιότητα του εξωτερικού αέρα, με την κοινή γνώμη να ευαισθητοποιείται γύρω από το ζήτημα και τα κράτη να θεσπίζουν νόμους και να καθορίζουν δείκτες και όρια επιτρεπόμενων συγκεντρώσεων ρύπων. Η πρόοδος των κοινωνιών ωστόσο είναι συνδεδεμένη με την συνεχή επέκταση του ανθρωπογενούς περιβάλλοντος σε βάρος του φυσικού, με το μεγαλύτερο μέρος των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων πλέον να λαμβάνουν χώρα σε εσωτερικούς χώρους. Έτσι, η προσοχή στράφηκε και προς την ποιότητα αέρα των εσωτερικών χώρων, όπου σύμφωνα με την Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των Η.Π.Α., ο σύγχρονος άνθρωπος περνάει το 90% του χρόνου του και οι συγκεντρώσεις ορισμένων ρύπων μπορεί να είναι 2-5 φορές υψηλότερες σε σχέση με τους εξωτερικούς χώρους [1].

Ο όρος Ποιότητα Εσωτερικού Αέρα (Indoor Air Quality - IAQ) αναφέρεται στις συνθήκες που επικρατούν σε έναν εσωτερικό χώρο και εξαρτώνται από παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, ο αερισμός κ.λπ. Θεωρείται μία από τις βασικές παραμέτρους επίτευξης συνθηκών άνεσης σε ένα κλειστό περιβάλλον και συνδέεται άμεσα με την υγεία και την ευημερία των ατόμων που ζουν, εργάζονται ή περνούν χρόνο σε αυτό [2]. Η πιο συχνά παρατηρούμενη αιτία χαμηλής IAQ είναι η παρουσία σε ένα χώρο ρύπων που εισέρχονται ή παραμένουν αδρανείς σε αυτόν και συνδέονται με το «σύνδρομο του άρρωστου κτιρίου». Οι ρύποι αυτοί απελευθερώνονται σταδιακά, σε χαμηλές συγκεντρώσεις στο εσωτερικό των κτιρίων και οι επιπτώσεις τους στην ανθρώπινη υγεία προϋποθέτουν μακρά έκθεση των χρηστών των εσωτερικών χώρων σε αυτούς [3].

Η ρύπανση του εσωτερικού αέρα ωστόσο μπορεί να οφείλεται σε σύντομη διαρροή μεγάλης ποσότητας μιας χημικής ουσίας λόγω ατυχήματος ή εσκεμμένης ενέργειας. Ένα τέτοιο περιστατικό, ακόμα και αν η πιθανότητα να συμβεί στη ζωή ενός ατόμου είναι σχετικά μικρή, μπορεί να επιφέρει σημαντικότερες επιπτώσεις στην υγεία του. Οι επιπτώσεις αυτές μπορεί να εκδηλωθούν άμεσα, αφού νέφη υψηλής συγκέντρωσης του ρύπου σχηματίζονται κοντά στη ζώνη ανθρώπινης αναπνοής, εκτοπίζοντας πολλές φορές από αυτή το οξυγόνο ή

και μακροπρόθεσμα, έχοντας προκαλέσει χρόνια προβλήματα υγείας. Ο κίνδυνος από ένα τέτοιο περιστατικό αυξάνεται ραγδαία αν συμβεί σε ένα χώρο συνάθροισης κοινού κατά τη διάρκεια χρήσης του. Έτσι, η εκτίμηση της συγκέντρωσης ενός ρύπου και η περιγραφή του τρόπου διασποράς του σε ένα κλειστό περιβάλλον είναι μείζονος σημασίας και μπορεί να παρέχει χρήσιμες πληροφορίες σε μηχανικούς και αρχιτέκτονες για το σχεδιασμό, καθώς και σε υπεύθυνους ασφαλείας για την ανάπτυξη στρατηγικών ελέγχου και σχεδίων άμεσης απόκρισης σε περίπτωση κρίσης [4].

Μεταξύ των διαθέσιμων μεθόδων προσδιορισμού της συγκέντρωσής ρύπων σε εσωτερικό χώρο για την εκτίμηση της ΙΑQ, η επιτόπου μέτρηση σε πραγματικό χρόνο παραμένει η πιο αξιόπιστη. Πρόκειται ωστόσο για μια μέθοδο δαπανηρή, χρονοβόρα, πολλές φορές τοξική, που δεν εξυπηρετεί την διεξαγωγή εκτεταμένων παραμετρικών μελετών, παράγοντες που την καθιστούν δύσκολα εφαρμόσιμη [5]. Σήμερα, η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics - CFD) είναι η μέθοδος που χρησιμοποιείται πιο συχνά για τον προσδιορισμό της ΙΑQ, μόνη της ή σε συνδυασμό με τις επιτόπου μετρήσεις.

Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική είναι κλάδος της Μηχανικής Ρευστών που αξιοποιεί αριθμητικές μεθόδους και αλγορίθμους για την προσομοίωση της ροής, δίνοντας λύση σε σύνθετα προβλήματα που δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν διαφορετικά. Μπορεί να είναι επίσης χρονοβόρα, καθώς έχει υψηλές απαιτήσεις σε υπολογιστικούς πόρους, όμως έχει αποδειχτεί ένα ιδιαίτερα χρήσιμο και αποτελεσματικό εργαλείο περιγραφής της κίνησης ρευστών, λαμβάνοντας υπόψιν και την επίδραση σε αυτή αντικειμένων που μπορούν να λειτουργήσουν ως εμπόδια στη ροή και τη διασπορά τους [6].

Συγκρινόμενη με τις πειραματικές μεθόδους μελέτης του εσωτερικού περιβάλλοντος, η CFD είναι οικονομικότερη, ενώ καθώς ο κλάδος των ηλεκτρονικών υπολογιστών αναπτύσσεται ραγδαία, επιταχύνεται σημαντικά ο χρόνος προσομοίωσης. Οι μέθοδοι CFD θεωρούνται αποτελεσματικές τόσο για στρωτές όσο και για τυρβώδεις ροές, αφού έχουν αναπτυχθεί και συνεχώς βελτιστοποιούνται διάφορες τεχνικές προσομοίωσης της τύρβης. Τα αποτελέσματα των CFD μεθόδων ωστόσο δεν μπορούν να θεωρηθούν πάντα αξιόπιστα, εξαιτίας των υποθέσεων και παραδοχών που γίνονται κατά την μοντελοποίηση της τύρβης, αλλά και των προσεγγίσεων στους υπολογισμούς που αποσκοπούν στην απλοποίηση των συχνά πολύπλοκων προβλημάτων που καλούνται να επιλύσουν. Έτσι, ενώ το αποτέλεσμα μιας προσομοίωσης CFD μπορεί να απέχει από την πραγματική λύση, η συνεχής βελτίωση των μεθόδων περιορίζει σημαντικά τις αποκλίσεις.

Τα τελευταία χρόνια, οι μέθοδοι CFD έχουν ευρεία εφαρμογή στον σχεδιασμό εσωτερικών χώρων και ειδικότερα στους τομείς της επίτευξης συνθηκών άνεσης και της ασφάλειας. Ο Tsou (2001), ανέπτυξε ένα διαδικτυακό CFD εργαλείο διδασκαλίας για αρχιτέκτονες, το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για μελέτες απόδοσης κτιρίων, συμπεριλαμβανομένων ζητημάτων όπως η θερμική και ακουστική άνεση, ο εξαερισμός και η ποιότητα του εσωτερικού αέρα [7]. Οι Carrilho da Graça κ.α. (2002) χρησιμοποίησαν μέθοδο CFD για την προσομοίωση ρεύματος αέρα, στον σχεδιασμό φυσικού αερισμού μιας τυπικής εξαώροφης πολυκατοικίας στο Πεκίνο και στη Σαγκάη [8], ενώ οι Yeoh κ.α. (2003) για την προσομοίωση πυρκαγιάς σε μονώροφο κτίριο με πολλαπλούς εσωτερικούς χώρους και την πρόβλεψη σε αυτούς παρουσίας καπνού [9]. Οι Murakami κ.α. (2003) προσομοίωσαν την διασπορά πτητικών ενώσεων (Volatile organic compounds - VOCs) προερχόμενων από δομικά υλικά, στους εσωτερικούς χώρους κτιρίου [10]. Οι Bartak κ.α. (2002) εφάρμοσαν μεθόδους CFD για προσομοίωση της ροής ενέργειας σε κτίρια και την εξέταση επίτευξης ή μη σε αυτά συνθηκών θερμικής άνεσης [11]. Οι Κασσωμένος κ.ά. (2008) εξέτασαν μέσω CFD τη διασπορά τοξικής χημικής ουσίας σε χημική μονάδα πολυβινυλοχλωριδίου και να εκτιμήσουν την έκθεση των εργαζομένων στον χημικό παράγοντα [12]. Οι Παναγόπουλος κ.α. (2011) προσομοίωσαν τη ρύπανση του εσωτερικού αέρα διαμερίσματος από VOC και φορμαλδεΐδη [4]. Οι Jianfeng Li και Ya-Fei Zhou (2015) μελέτησαν την εξάπλωση του υδροχλωρικού οξέος που διαφεύγει από τον θάλαμο χάραξης μετάλλων κατά τη διάρκεια της συντήρησης σε μια μονάδα παραγωγής ημιαγωγών [13]. Οι Longxiang κ.α. (2017) χρησιμοποίησαν ανάλυση CFD για να προσομοιώσουν τη διασπορά εξαφθοριούχου θείου σε ένα τυπικό κτίριο βιομηχανικού εργοστασίου [14].

Η πλειοψηφία των μελετών που έχουν προηγηθεί στον τομέα της ασφάλειας αφορούν την σταδιακή απελευθέρωση μικρών ποσοτήτων χημικών ουσιών, σε εσωτερικούς χώρους που χρησιμοποιούνται από άτομα που ανήκουν στο γενικό πληθυσμό και οι οποίες επιφέρουν προβλήματα στην ανθρώπινη υγεία μετά από μακρά έκθεση των χρηστών των χώρων. Επιπλέον, έχουν γίνει μελέτες περιπτώσεων εργατικών ατυχημάτων και λοιπών εργασιακών κινδύνων, που έχουν πιο άμεσες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, στις περιπτώσεις αυτές ωστόσο οι χρήστες των χώρων είναι ενήμεροι για τους κινδύνους που μπορεί να αντιμετωπίσουν, καθώς και για τον ορθό τρόπο αντίδρασής τους.

Δεν έχει μελετηθεί επαρκώς η περίπτωση ενός χημικού περιστατικού με απελευθέρωση μεγάλης ποσότητας ενός τοξικού χημικού παράγοντα, σε ένα χώρο που χρησιμοποιείται από τον γενικό πληθυσμό και στον οποίο μπορεί να βρεθούν και άτομα που ανήκουν σε ευαίσθητες ομάδες (π.χ. παιδιά, ηλικιωμένοι, άτομα με προβλήματα του

Εισαγωγή

αναπνευστικού). Στις περιπτώσεις αυτές, αφενός ο κίνδυνος από την έκθεση στους χημικούς παράγοντες είναι πιο άμεσος και μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερος για τις ευαίσθητες ομάδες του πληθυσμού, αφετέρου οι χρήστες των χώρων δεν είναι συνήθως ενήμεροι για τον σωστό τρόπο αντίδρασης και ο βαθμός έκθεσής τους αυξάνεται.

Στην παρούσα εργασία γίνεται εκτίμηση της διάχυσης δύο χημικών παραγόντων, ενός ελαφρύτερου και ενός βαρύτερου του αέρα, σε χώρους όπου οι χρήστες δεν είναι εξοικειωμένοι με την παρουσία τους και κατά συνέπεια δεν είναι προετοιμασμένοι να εφαρμόσουν μέτρα έκτακτης ανάγκης. Οι χημικοί παράγοντες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η αμμωνία (NH_3) ως ελαφρύς και το φωσγένιο (Cl_2CO) ως βαρύς. Για καθένα από τους δύο χημικούς παράγοντες μελετήθηκε η απελευθέρωση και η διασπορά τους, κάτω από την επίδραση του φυσικού αερισμού, σε δύο διαφορετικούς εσωτερικούς χώρους: σε ένα τυπικό χώρο γραφείου και στην αίθουσα εκδηλώσεων «Γεώργιος Μυλωνάς», τον κύριο χώρο εκδηλώσεων του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Στο 1^ο Κεφάλαιο της διατριβής, γίνεται μια γενική αναφορά στους χημικούς παράγοντες και τους τρόπους έκθεσης του κοινού σε αυτούς. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι οριακές τιμές με τις οποίες συγκρίνονται οι συγκεντρώσεις των ρύπων στους δύο χώρους στα πλαίσια της παρούσας μελέτης. Τέλος, για τους δύο εξεταζόμενους χημικούς παράγοντες, την αμμωνία και το φωσγένιο, παρουσιάζονται οι φυσικές και χημικές τους ιδιότητες, οι μηχανισμοί έκθεσης του κοινού σε αυτούς, οι επιπτώσεις τους στην υγεία και οι οριακές τιμές έκθεσης.

Στο 2^ο Κεφάλαιο γίνεται αρχικά μια εισαγωγή στις μεθόδους Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής και στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποια βασικά στοιχεία των μεθόδων αυτών, όπως η γεωμετρία, η χωρική διακριτοποίηση και τα είδη πλεγμάτων του πεδίου ροής, οι μέθοδοι προσομοίωσης της τύρβης, καθώς και στοιχεία για τους γενικούς επιλύτες που χρησιμοποιούνται.

Το 3^ο Κεφάλαιο αφορά την Μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των δύο χώρων μελέτης, ο τρόπος δημιουργίας των γεωμετρικών τρισδιάστατων μοντέλων τους και των υπολογιστικών τους πλεγμάτων, οι οριακές συνθήκες των δύο πεδίων ροής και οι παράμετροι προσομοίωσης που εφαρμόστηκαν.

Στο 4^ο Κεφάλαιο χρησιμοποιούνται τα εργαλεία μετα-επεξεργασίας του CFD λογισμικού για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων ξεχωριστά για κάθε χημικό παράγοντα, σε καθένα από τους εξεταζόμενους χώρους.

Τέλος, το 5^ο Κεφάλαιο συνοψίζει τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις και συγκεντρώνει τα συμπεράσματα που εξήχθησαν.

Ακολουθούν τρία παραρτήματα τα οποία εντάσσονται στο περιεχόμενο του Κεφαλαίου 1. Στο Παράρτημα I γίνεται αναφορά σε γνωστά χημικά περιστατικά ανθρωπογενούς προέλευσης, τα οποία έχουν συμβεί σε καιρό ειρήνης, σε καιρό πολέμου ή οφείλονται σε ατύχημα. Στο Παράρτημα II γίνεται μια συνοπτική αναφορά στην Μέση Θανατηφόρο Δόση, μια οριακή τιμή η οποία δεν χρησιμοποιείται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, έχει αποτελέσει ωστόσο το βασικό μέσο καθορισμού της επικινδυνότητας των χημικών παραγόντων, για πολλές δεκαετίες μέχρι σχετικά πρόσφατα. Τέλος, στο Παράρτημα III παρουσιάζονται γενικά στοιχεία σχετικά με τους Παράγοντες Αβεβαιότητας που εφαρμόζονται ώστε να προκύψουν οι οριακές τιμές ενός χημικού παράγοντα.

1 Χημικοί παράγοντες

Οι χημικοί παράγοντες είναι ουσίες, ελεύθερες ή σε πρόσμιξη, που μπορεί να υπάρχουν στο περιβάλλον φυσικά ή να παράγονται βιομηχανικά και οι οποίες χρησιμοποιούνται ή απελευθερώνονται μέσω οποιασδήποτε εργασιακής ή μη δραστηριότητας. Ο πληθυσμός μπορεί να εκτεθεί σε αυτές κατά τη διάρκεια ενός χημικού περιστατικού, μέσω διαφόρων μηχανισμών και η έκθεση αυτή μπορεί να προκαλέσει από ήπιες ως εξαιρετικά σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία.

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια γενική αναφορά στους μηχανισμούς έκθεσης του πληθυσμού στους χημικούς παράγοντες και στις άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις τους στην υγεία, καθώς και στις οριακές τιμές έκθεσης IDLH (Immediately Dangerous to Life and Health) και AEGIs (Acute Exposure Guideline Levels). Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των χημικών παραγόντων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία, της αμμωνίας και του φωσγενίου. Πιο συγκεκριμένα, για καθένα από τους δύο εξεταζόμενους χημικούς παράγοντες παρουσιάζονται οι φυσικές και χημικές τους ιδιότητες, οι μηχανισμοί έκθεσης σε αυτούς και οι οριακές τιμές IDLH και AEGI.

1.1 Ορισμοί, μηχανισμοί έκθεσης και επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία

Ως **χημικός παράγοντας** ορίζεται κάθε χημικό στοιχείο ή ένωση, ελεύθερο ή σε πρόσμιξη, όπως υφίσταται σε φυσική κατάσταση ή όπως παράγεται, χρησιμοποιείται ή απελευθερώνεται, εκτός των άλλων υπό μορφή αποβλήτων, μέσω οποιασδήποτε εργασιακής ή μη δραστηριότητας, είτε παράγεται σκοπίμως είτε όχι και είτε διατίθεται στο εμπόριο είτε όχι [15].

Οι χημικοί παράγοντες χρησιμοποιούνται ευρύτατα στις χημικές και τις συναφείς αυτών βιομηχανίες (βιομηχανίες πετρελαίου, φαρμακοβιομηχανίες κλπ.), καθώς και σε μια γκάμα καθημερινών δραστηριοτήτων με τη μορφή λιπασμάτων, προϊόντων καθαρισμού, κολλητικών ουσιών, καλλυντικών κλπ.. Παράγονται επίσης από στρατιωτικούς οργανισμούς ή τρομοκρατικές οργανώσεις και χρησιμοποιούνται ως όπλα μαζικής καταστροφής (**χημικά όπλα**). Έτσι, ο γενικός πληθυσμός μπορεί να βρεθεί εκτεθειμένος σε χημικούς παράγοντες με διάφορους τρόπους.

Σαν **έκθεση** σε χημικό παράγοντα νοείται κάθε κατάσταση που χαρακτηρίζεται από την παρουσία ενός χημικού παράγοντα και την επαφή αυτού με κάποιο σημείο του σώματος των ατόμων του πληθυσμού. Οι μηχανισμοί έκθεσης είναι τέσσερις [16]:

- **Εισπνοή:** έκθεση μέσω της αναπνευστικής οδού, που είναι ο συνηθέστερος μηχανισμός έκθεσης.
- **Απορρόφηση:** έκθεση μέσω του δέρματος και των βλεννογόνων μεμβρανών του σώματος.
- **Κατάποση:** έκθεση μέσω της στοματικής κοιλότητας.
- **Ενέσιμα:** έκθεση με απευθείας έγχυση στην κυκλοφορία του αίματος.

Η έκθεση σε χημικούς παράγοντες επιφέρει αρνητικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, χωρίς ωστόσο όλοι οι χημικοί παράγοντες να έχουν τον ίδιο βαθμό επικινδυνότητας. Ως **εγγενής επικινδυνότητα** ενός χημικού παράγοντα νοείται η εγγενής ιδιότητά του να προξενήσει βλάβη, η οποία εξαρτάται από τις χημικές και τις φυσικές του ιδιότητες, καθώς και από το χρονικό διάστημα έκθεσης [17].

Οι χημικοί παράγοντες εμφανίζονται σε στερεά μορφή (πούδρα, αναθυμιάσεις, ίνες, σκόνη), υγρή μορφή (ατμοί, νέφη) ή αέρια μορφή. Η μορφή του χημικού παράγοντα καθορίζει σε ένα βαθμό και την εγγενή επικινδυνότητά του. Έτσι για παράδειγμα, ένας χημικός παράγοντας που είναι ακίνδυνος σε στερεή μορφή, μπορεί αν αλεστεί σε πούδρα ή σκόνη να γίνει επικίνδυνος κατά την εισπνοή [16].

Οι επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία μπορεί να είναι άμεσες ή έμμεσες. Οι άμεσες επιπτώσεις εκδηλώνονται σε σύντομο χρονικό διάστημα μετά την έκθεση, μπορεί να είναι οξείες, ανάλογα με την εγγενή επικινδυνότητα του χημικού παράγοντα και είναι συνήθως παροδικές, αφού υποχωρούν άμεσα ή σε μικρό χρονικό διάστημα μετά την διακοπή της έκθεσης. Συνήθεις άμεσες επιπτώσεις είναι ο δερματικός ερεθισμός, ο ερεθισμός των ματιών, που σε σοβαρές περιπτώσεις μπορεί να επιφέρει μερική ή ολική απώλεια όρασης, η ζάλη, η αστάθεια και σε περίπτωση έκθεσης σε μεγάλες συγκεντρώσεις τοξικών αναθυμιάσεων, η απώλεια των αισθήσεων. Οι έμμεσες επιπτώσεις είναι χρόνιες και εκδηλώνονται ετεροχρονισμένα και συνήθως μετά από επαναλαμβανόμενη έκθεση. Η πιο συχνά συναντώμενη από αυτές είναι το άσθμα, ενώ είναι πιθανή και η εμφάνιση διάφορων μορφών καρκίνων, με έμφαση σε αυτούς του αναπνευστικού [16].

1.2 Χημικά περιστατικά

Ως **χημικό περιστατικό** περιγράφεται η ανεξέλεγκτη απελευθέρωση ενός χημικού παράγοντα, η οποία μπορεί να προκαλέσει βλάβη στη δημόσια υγεία και στο περιβάλλον. Η προέλευση των χημικών περιστατικών μπορεί να είναι φυσική (εκρήξεις ηφαιστειών, πυρκαγιές κλπ.) ή ανθρωπογενής (ατυχήματα σε χώρους εργασίας, στρατιωτικές

επιχειρήσεις, τρομοκρατικές επιθέσεις κλπ.) και η εκδήλωσή τους μπορεί να είναι ξαφνική και οξεία ή να έχουν αργή έναρξη («σιωπηλή» απελευθέρωση ουσίας) [18].

Σε επίπεδο έντασης, τα χημικά περιστατικά κυμαίνονται από μικρές απελευθερώσεις έως μεγάλης κλίμακας συμβάντα, τα οποία χαρακτηρίζονται ως **καταστάσεις έκτακτης ανάγκης**. Οι καταστάσεις έκτακτης ανάγκης μπορεί να είναι, μεταξύ άλλων απόρροια χημικών, βιολογικών ή ραδιολογικών περιστατικών. Οι τρεις κατηγορίες παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες μεταξύ τους. Βασική διαφορά, που κάνει τα χημικά περιστατικά να ξεχωρίζουν, είναι πως σε αυτά τα θύματα αναπτύσσονται άμεσα συμπτώματα σχεδόν ταυτόχρονα, με αποτέλεσμα την άμεση και ταχεία επιφόρτιση των συστημάτων υγειονομικής περίθαλψης, τα οποία συχνά αδυνατούν να ανταποκριθούν [19].

Στην περίπτωση ενός χημικού περιστατικού σε εσωτερικό χώρο, ο κίνδυνος για τους χρήστες του αυξάνεται ραγδαία, αφού είναι πιο δύσκολο να επιτευχθεί αποσυμφόρηση του εσωτερικού αέρα. Έτσι, η εκτίμηση της συγκέντρωσης ενός χημικού παράγοντα σε εσωτερικό περιβάλλον και η περιγραφή του μηχανισμού διασποράς του είναι μείζονος σημασίας. Τέτοιου είδους πληροφορίες είναι απαραίτητες στους μηχανικούς και τους αρχιτέκτονες κατά το σχεδιασμό ενός νέου κτιρίου, προκειμένου να επιλέξουν κατάλληλα συστήματα εξαερισμού και στρατηγικές ελέγχου για τον περιορισμό της έκθεσης του πληθυσμού [4].

Τα μεγάλης κλίμακας χημικά περιστατικά έχουν ιστορικά χιλιάδες θύματα με συμπτώματα από μικρής μέχρι μεγάλης έντασης, ωστόσο συνήθως δεν συνοδεύονται από μεγάλο αριθμό απωλειών [19]. Παρόλα αυτά, οι απώλειες δεν μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες, αφού τα χημικά περιστατικά ανθρωπογενούς προέλευσης ευθύνονται για τον θάνατο 65.000 ανθρώπων μεταξύ 2009-2018 [18].

Μια ενδεικτική αναφορά σε σημαντικά χημικά περιστατικά ανθρωπογενούς προέλευσης, χωρισμένα σε τρεις κατηγορίες, ατυχήματα, περιστατικά σε καιρό ειρήνης και περιστατικά σε πολεμικές επιχειρήσεις, παρουσιάζεται στο Παράρτημα I.

1.3 Οριακές Τιμές Έκθεσης σε Χημικούς Παράγοντες

1.3.1 Ιστορική Αναδρομή

Στις αρχές του 1900, η τοξικότητα ενός χημικού παράγοντα εκφραζόταν ποσοτικά από την Ελάχιστη Θανατηφόρο Δόση (Minimal Lethal Dose). Ο όρος δεν ερμηνευόταν πάντα με τον ίδιο τρόπο από το σύνολο των τοξικολόγων της εποχής, η επικρατέστερη ερμηνεία όμως ήταν αυτή που προτάθηκε από τον J. W. Trevan το 1927, πως πρόκειται για την δόση ενός χημικού παράγοντα που μπορεί να σκοτώσει το 50% των οργανισμών ενός δεδομένου

πληθυσμού, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Ο όρος Ελάχιστη Θανατηφόρος Δόση αντικαταστάθηκε από τον όρο Μέση Θανατηφόρος Δόση (Lethal Dose 50 – LD50) και αποτέλεσε διαχρονικά ένα αμφιλεγόμενο ζήτημα μεταξύ βιολόγων και ηθικών δεοντολόγων, αφού για τον προσδιορισμό της θα έπρεπε να εξοντωθεί το 50% του πληθυσμού πειραματόζων ενός πειράματος [20].

Τα χημικά περιστατικά εκείνης της εποχής αφορούσαν κυρίως περιστατικά σε καιρό πολέμου, τα οποία θεωρούταν σε ένα βαθμό «αναγκαίο κακό» από τις κυβερνήσεις, ενώ η κοινή γνώμη θα άρχισε να ευαισθητοποιείται πολύ αργότερα γύρω από αυτά, στην περίοδο του πολέμου του Βιετνάμ. Το ζήτημα του προσδιορισμού οριακών τιμών έκθεσης ενδιέφερε κυρίως τους τοξικολόγους και την φαρμακοβιομηχανία. Το 1984, το χημικό ατύχημα στο Μπομπάλ της Ινδίας κατέστησε σαφές πως οι σύγχρονες βιομηχανικές εφαρμογές μπορούν να γίνουν αιτία χημικών περιστατικών ακόμα και σε καιρό ειρήνης και ευαισθητοποίησε την κοινή γνώμη πάνω στο ζήτημα της έκθεσης του γενικού πληθυσμού σε επικίνδυνες χημικές ουσίες. Με αφορμή το χημικό περιστατικό στο Μπομπάλ, οι κυβερνήσεις ξεκίνησαν μια διαδικασία αναλυτικής καταγραφής των επικίνδυνων χημικών ουσιών και θέσπισης οριακών τιμών έκθεσης σε αυτές, καθώς και κατάστροφης σχεδίων αντιμετώπισης κρίσεων.

Ήδη από την δεκαετία του '70, το Εθνικό Ινστιτούτο για την Ασφάλεια στην Εργασία και Υγεία (National Institute for Occupational Safety and Health - NIOSH) των Η.Π.Α. είχε ξεκινήσει την ανάπτυξη των ορίων άμεσης επικινδυνότητας για την ζωή και την υγεία IDLH (Immediately Dangerous to Life and Health) για μια σειρά χημικών ουσιών, μετά από πειράματα που διενεργήθηκαν σε πειραματόζωα. Το 1986, ο Οργανισμός Προστασίας του Περιβάλλοντος των Η.Π.Α. (United States Environmental Protection Agency – EPA) ξεκίνησε την διαδικασία συγκρότησης ενός μητρώου εξαιρετικά βλαβερών ουσιών βάση των IDLH τους, στο οποίο έγιναν αρχικά περίπου 400 καταγραφές.

Στα επόμενα χρόνια, αρκετοί δημόσιοι και ιδιωτικοί οργανισμοί καθόρισαν οριακές τιμές έκθεσης για χημικούς παράγοντες, με το ενδιαφέρον να επικεντρώνεται κυρίως στην έκθεση στους χώρους εργασίας. Ωστόσο, οι οριακές τιμές αφορούσαν μακροπρόθεσμη έκθεση σε χαμηλές συγκεντρώσεις και δεν ήταν εύκολη η αναγωγή τους σε όρια έκτακτης ανάγκης για ειδικές περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα για σύντομης διάρκειας έκθεση σε μεγάλες συγκεντρώσεις μιας ουσίας που συμβαίνει μόνο για μια φορά στη διάρκεια ζωής ενός ατόμου, έκθεση του γενικού πληθυσμού συμπεριλαμβανομένων βρεφών, παιδιών, ηλικιωμένων και ατόμων με υποκείμενες παθήσεις κλπ.. Η Επιτροπή Τοξικολογίας (Committee on Toxicology – COT) του Εθνικού Συμβουλίου Έρευνας των Η.Π.Α. είχε ήδη

δημοσιεύσει οδηγίες για αντιμετώπιση περιστατικών έκτακτης ανάγκης, για ειδικές κατηγορίες του πληθυσμού (π.χ. στρατιωτικό προσωπικό, αστροναύτες κλπ.). Λόγω αυτής της εμπειρίας της, της ανατέθηκε το 1991 από τον EPA η ανάπτυξη επιπέδων έκθεσης έκτακτης ανάγκης σε εξαιρετικά βλαβερές ουσίες για το γενικό πληθυσμό.

Τον Νοέμβριο του 1995 δημιουργήθηκε η Εθνική Συμβουλευτική Επιτροπή (National Advisory Committee -NAC). Την Επιτροπή αποτελούσαν μέλη του Οργανισμού Προστασίας του Περιβάλλοντος των Η.Π.Α. (EPA) του Υπουργείου Άμυνας των Η.Π.Α. (Department of Defense - DOD) και μια σειρά άλλων ομοσπονδιακών και κρατικών οργανισμών από τον ακαδημαϊκό χώρο, τον χώρο της βιομηχανίας κλπ.. Στόχος της ήταν ο καθορισμός επιπέδων οξείας έκθεσης (Acute Exposure Guideline Levels - AEGs) για υψηλής προτεραιότητας επικίνδυνα τοξικά χημικά. Ο μέχρι τότε χρησιμοποιούμενος όρος Community Emergency Exposure Levels (CEELs) αντικαταστάθηκε από τον όρο AEGs, ώστε να τονιστεί η εφαρμογή των ορίων στον σχεδιασμό, την πρόληψη και την αντιμετώπιση κρίσεων [21] [22].

Σήμερα υπάρχει μια πληθώρα δεικτών και κατευθυντήριων γραμμών για οξεία έκθεση σε χημικούς παράγοντες. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές Άμεσης Επικινδυνότητας για την Υγεία και την Ζωή (IDLH) και τα Όρια Οξείας Έκθεσης (AEGs), οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικότερα στις Ενότητες **1.3.2** και **1.3.3**. Στο Παράρτημα II γίνεται ειδική αναφορά στη Μέση Θανατηφόρα Συγκέντρωση, η οποία δεν χρησιμοποιείται στην παρούσα διατριβή λόγω της θεώρησής της ως αναχρονιστικής και της αντικατάστασής της, υπήρξε ωστόσο για πολλές δεκαετίες σημείο αναφοράς για την εκτίμηση επικινδυνότητας χημικών ουσιών.

1.3.2 Όρια Άμεσης Επικινδυνότητας για τη Ζωή και την Υγεία (IDLH)

Από την δεκαετία του '70, το NIOSH αναγνωρίζοντας τους αυξημένους κινδύνους έκθεσης σε χημικούς παράγοντες στους εργασιακούς χώρους, αναλαμβάνει για μια σειρά χημικών ουσιών, την ανάπτυξη των ορίων Άμεσης Επικινδυνότητας για τη Ζωή και την Υγεία (Immediately Dangerous to Life and Health – IDLH).

Τα όρια IDLH είναι όρια οξείας έκθεσης, τα οποία καθορίστηκαν με γνώμονα την διασφάλιση διαφυγής του εργαζόμενου από ένα μολυσμένο περιβάλλον, σε περίπτωση αστοχίας των ατομικών μέτρων προσωπικής προστασίας. Πιο συγκεκριμένα, το όριο IDLH εκφράζει την μέγιστη συγκέντρωση μιας τοξικής ουσίας στον αέρα στην οποία μπορεί να εκτεθεί ένας υγιής εργαζόμενος για διάστημα 30 λεπτών και στη συνέχεια να είναι σε θέση να διαφύγει από το μολυσμένο περιβάλλον, χωρίς να έχει υποστεί μη ανατάξιμες βλάβες στην υγεία του ή τραυματισμούς που θα μπορούσαν να τον αδρανοποιήσουν.

Τα όρια IDLH αρχικά χρησιμοποιήθηκαν για την υπόδειξη ενός επιπέδου πάνω από το οποίο η εργασία επιτρέπεται μόνο με την χρήση μιας εξαιρετικά αξιόπιστης αναπνευστικής συσκευής. Πέρα από τον αρχικό τους σκοπό ωστόσο, έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη σχεδίων εκτίμησης και διαχείρισης ρίσκου, για μη συνήθεις εργασιακές πρακτικές σε περιβάλλοντα υψηλού κινδύνου (π.χ. εργασία σε περιορισμένους χώρους), καθώς και για την ανάπτυξη σχεδίων αντιμετώπισης κρίσεων.

Η πρώτη θέσπιση και εφαρμογή των ορίων IDLH έγινε την δεκαετία του '70 και ακολούθησε η αναθεώρησή τους το 1994. Έκτοτε, το NIOSH συνεχίζει να εξετάζει τα νεότερα επιστημονικά δεδομένα και να διεξάγει σχετικές έρευνες, ώστε οι τιμές IDLH να είναι πάντα επικαιροποιημένες και να εξυπηρετούν τον σκοπό τους [23].

1.3.3 Όρια Οξείας Έκθεσης (AEGLS)

Τα Όρια Οξείας Έκθεσης (Acute Exposure Guideline Levels – AEGLS) μιας χημικής ουσίας είναι όρια έκθεσης κατωφλίου, επίπεδα έκθεσης δηλαδή κάτω από τα οποία δεν είναι πιθανές δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία των ατόμων. Για κάθε χημική ουσία ορίζονται συνήθως τρία επίπεδα οξείας έκθεσης¹ (AEG1-1, AEG1-2 και AEG1-3), καθένα από τα οποία αναπτύσσεται για πέντε συνολικά χρονικές περιόδους έκθεσης (10 λεπτά, 30 λεπτά, 1 ώρα, 4 ώρες και 8 ώρες).

Ανάλογα με το είδος της χημικής ουσίας, κάθε επίπεδο έχει διαφορετικό βαθμό σοβαρότητας και τοξικών επιδράσεων. Οι συγκεντρώσεις των AEGLS εκφράζονται σε mg/m³ ή σε μέρη ανά εκατομμύριο (parts per million - ppm) και αφορούν επιπτώσεις στην υγεία του συνόλου του γενικού πληθυσμού, συμπεριλαμβανομένων και των ατόμων με ευαισθησία (παιδιά, ηλικιωμένοι, άτομα με αναπνευστικές παθήσεις κλπ.).

Πιο αναλυτικά:

- Το **AEG1-1** είναι η αερομεταφερόμενη συγκέντρωση μιας ουσίας πάνω από την οποία προβλέπεται ότι κάποιος μπορεί να νιώσει από ήπια μέχρι αξιοσημείωτη ενόχληση και πιθανό ερεθισμό. Ανάλογα με την τοξικότητα και τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά της ουσίας, η συγκέντρωση επιπέδου AEG1-1 μπορεί να μην γίνει καν αντιληπτή από το άτομο, το οποίο παραμένει ασυμπτωματικό. Η έκθεση δεν προκαλεί αδυναμία αντίδρασης,

¹ Σημειώνεται πως για ορισμένες χημικές ουσίες δεν ορίζονται και τα τρία AEGLS, γεγονός που έχει να κάνει με παράγοντες όπως η αδυναμία προσδιορισμού του ορίου, η υψηλή τοξικότητα της ουσίας κλπ.

ενώ οι όποιες επιπτώσεις είναι αναστρέψιμες μετά την διακοπή έκθεσης στην ουσία και την αποσυμφόρηση του περιβάλλοντα αέρα.

- Το **AEGL-2** είναι η αερομεταφερόμενη συγκέντρωση πάνω από την οποία κάποιος μπορεί να υποστεί μη αναστρέψιμη βλάβη ή να αναπτύξει μελλοντικά σοβαρές και μακροχρόνιες επιπτώσεις στην υγεία του. Έκθεση σε τέτοια συγκέντρωση μπορεί να προκαλέσει μειωμένη ικανότητα αντίδρασης και διαφυγής.
- Το **AEGL-3** είναι η αερομεταφερόμενη συγκέντρωση πάνω από την οποία προβλέπεται κάποιος μπορεί να εκτεθεί σε εξαιρετικά απειλητικές για την υγεία του συνθήκες, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν ακόμα και στον θάνατο.

Οι αερομεταφερόμενες συγκεντρώσεις κάτω από το AEGL-1 αντιπροσωπεύουν τα επίπεδα έκθεσης στα οποία κάποιος είναι πιθανό να εντοπίσει την παρουσία μιας ουσίας στον περιβάλλοντα αέρα λόγω ήπιου ερεθισμού των αισθητηρίων οργάνων του (κυρίως δυσάρεστη οσμή ή γεύση), κάτι τέτοιο ωστόσο δεν είναι εύκολο να συμβεί, ενώ τυχόν οχλήσεις είναι παροδικές, χωρίς αισθητές παρενέργειες.

Όταν η συγκέντρωση μιας ουσίας αυξάνεται πάνω από κάθε AEGL, αυξάνεται προοδευτικά και η πιθανότητα εμφάνισης των επιπτώσεων που περιγράφονται σε κάθε επίπεδο. Επιπλέον, παρόλο που τα AEGLs αφορούν το σύνολο του γενικού πληθυσμού, αναγνωρίζεται πως τα άτομα μπορούν να βιώνουν πολύ διαφορετικά τις επιπτώσεις που περιγράφονται σε κάθε επίπεδο, με τις ευαίσθητες ομάδες του πληθυσμού να εμφανίζονται πιο ευάλωτες [21] [22].

1.4 Εξεταζόμενοι χημικοί παράγοντες

1.4.1 Αμμωνία

1.4.1.1 Φυσικές και Χημικές Ιδιότητες Αμμωνίας

Η αμμωνία (NH₃) είναι ένας χημικός παράγοντας που υπάρχει στο περιβάλλον φυσικά, σαν μέρος του κύκλου του αζώτου, μεγάλες ποσότητες της ωστόσο παρασκευάζονται κάθε χρόνο και βιομηχανικά, αφού έχει ευρεία γκάμα εφαρμογών, από τη γεωργία και τη βιομηχανία μέχρι σε καθημερινά προϊόντα οικιακής χρήσης.

Σε θερμοκρασία δωματίου, η αμμωνία είναι ένα άχρωμο, ερεθιστικό αέριο με αποπνικτική οσμή. Είναι ελαφρύτερη του ξηρού αέρα (μοριακό βάρος: 17.03 gr/mole) και σε καθαρή μορφή είναι γνωστή ως «άνυδρη αμμωνία». Το σημείο βρασμού της είναι -33.35 °C και το σημείο τήξης της -77.7 °C . Έχει αλκαλικές ιδιότητες και διαβρωτική δράση. Διαλύεται

εύκολα στο νερό, σχηματίζοντας ένα καυστικό διάλυμα και ασθενή βάση, το υδροξείδιο του αμμωνίου (NH_4OH). Είναι ευκολά συμπιέσιμο αέριο, σχηματίζοντας υπό πίεση ένα καθαρό υγρό, μορφή στην οποία συνήθως μεταφέρεται [24] [25].

Η αμμωνία είναι υγροσκοπικό αέριο, μπορεί δηλαδή να απορροφήσει και να διατηρήσει μόρια νερού από το περιβάλλον της. Έτσι, αν και η άνυδρη αμμωνία μετά την εκπομπή της από μια πηγή συνήθως διασπείρεται και δεν συσσωρεύεται σε χαμηλές περιοχές, κάτω από συνθήκες υψηλής σχετικής υγρασίας, σχηματίζει νέφη ατμού βαρύτερου του ξηρού αέρα, σε χαμηλές περιοχές με χαμηλής ταχύτητας ρεύματα αέρα.

Θεωρείται γενικά μη εύφλεκτο αέριο, ωστόσο τα βαρέλια στα οποία μεταφέρεται μπορούν να εκραγούν αν εκτεθούν σε υψηλές θερμοκρασίες και έτσι το Υπουργείο Μεταφορών των Η.Π.Α. καθώς και Εθνικός Οργανισμός Πυροπροστασίας των Η.Π.Α. το έχει κατατάξει στα εύφλεκτα αέρια και συνιστούν να αντιμετωπίζεται σαν τέτοιο [26].

1.4.1.2 Μηχανισμοί έκθεσης στην αμμωνία και επιπτώσεις στην υγεία

Η αμμωνία είναι τοξικό αέριο και έκθεση σε ικανές ποσότητες της μπορεί να αποβεί μοιραία. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μολύνει το νερό, ωστόσο τα πιο συχνά συναντώμενα χημικά περιστατικά που σχετίζονται με την αμμωνία αφορούν την απελευθέρωσή της στον εσωτερικό ή εξωτερικό αέρα, σαν υγρό σπρέι (αεροζόλ) ή σαν ατμό [26].

Ένα άτομο μπορεί να εκτεθεί στην αμμωνία εισπνέοντάς την ή μέσω επαφής με τα μάτια ή το δέρμα. Η έκθεση μέσω κατάποσης είναι αρκετά σπάνια. Οι επιπτώσεις της έκθεσης εξαρτώνται από την συγκέντρωση της ουσίας και τον χρόνο έκθεσης του ατόμου σε αυτή και κυμαίνονται από ήπιες ως πολύ σοβαρές.

Η εισπνοή υψηλών συγκεντρώσεων αμμωνίας προκαλεί άμεσο κάψιμο της μύτης, του λαιμού και της αναπνευστικής οδού. Μπορεί επίσης να προκαλέσει βρογχιολικό και κυψελιδικό οίδημα και καταστροφή των αεραγωγών, με αποτέλεσμα αναπνευστική δυσχέρεια ή ανεπάρκεια. Η έκθεση σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις μπορεί να προκαλέσει βήχα και ερεθισμό της μύτης και του λαιμού. Η χαρακτηριστική οσμή της μπορεί να παρέχει επαρκώς έγκαιρη προειδοποίηση για την παρουσία της ουσίας σε ένα περιβάλλον, αλλά η οσφρητική κόπωση ή η προσαρμογή στην οσμή μπορούν να περιορίσουν την επίγνωση των εκτιθέμενων [25] [26].

Η απορρόφηση μετά από επαφή με τα μάτια μπορεί να επιφέρει από ήπιο ερεθισμό και αίσθημα καψίματος μέχρι σοβαρό διαβρωτικό τραυματισμό των ματιών και

βλεφαρόσπασμο, φλεγμονή των μεμβρανών του οφθαλμού (επιπεφυκίτιδα), παραγωγή δακρύων (δακρύρροια), οίδημα, απολέπιση των επιφανειακών κυττάρων του ματιού, ακόμα και προσωρινή ή μόνιμη τύφλωση [25] [26].

Η έκθεση μέσω του δέρματος μπορεί να επιφέρει ήπιες επιπτώσεις όπως ερεθισμό, πρήξιμο και ήπιο τσούξιμο ή πόνο. Πιο σοβαρές επιπτώσεις είναι η φλεγμονή, η δημιουργία φυσαλίδων (φλύκταινες), η νέκρωση των ιστών του δέρματος και τα βαθιά διεισδυτικά εγκαύματα, ειδικά σε περιοχές του δέρματος με αυξημένη υγρασία [25] [26].

Τέλος, η λιγότερο συχνή, κατάποση μπορεί να προκαλέσει ναυτία, έμετο, κοιλιακό άλγος, εγκαύματα στο στόμα, το λαιμό, τον οισοφάγο και το στομάχι, πρήξιμο των χειλιών, του στόματος και του λάρυγγα, καθώς και σοβαρή διαβρωτική βλάβη ή εγκαύματα του στόματος, του λαιμού και του στομάχου [25] [26].

1.4.1.3 Οριακές τιμές έκθεσης στην αμμωνία

Το όριο IDLH για την αμμωνία ορίστηκε αρχικά στα 384 mg/m³ (500ppm), βάση της αναφοράς πως η μέγιστη ανοχή βραχείας έκθεσης βρίσκεται μεταξύ των συγκεντρώσεων 209mg/m³ και 384mg/m³ (300-500ppm) για χρονικό διάστημα έκθεσης 30-60 min. Η αναθεωρημένη τιμή IDLH είναι το κάτω όριο του αρχικού διαστήματος, δηλαδή 209mg/m³ (300ppm) και βρίσκεται σε ισχύ μέχρι σήμερα [27].

Πίνακας 1.1: Όριο IDLH για την αμμωνία (27)

IDLH (αναθεωρημένη τιμή)
209mg/m ³ (300 ppm)

Ο προσδιορισμό του AEG1-1 για την αμμωνία βασίστηκε στα αποτελέσματα μελέτης σε ανθρώπους, η οποία έδειξε πως 2 στους 6 εκτιθέμενους σε συγκέντρωση 21mg/m³ (30 ppm) του χημικού παράγοντα για διάστημα 10 λεπτών, παρουσίασαν ελαφρύ ερεθισμό του ανωτέρου αναπνευστικού συστήματος. Ο ερεθισμός περιορίζεται στην ανώτερη αναπνευστική οδό για όλους τους εκτιθέμενους, συμπεριλαμβανομένων ατόμων που ανήκουν σε ευπαθείς ομάδες (π.χ. ασθματικοί) και ανεξάρτητα από τη σωματική τους δραστηριότητα. Σε τόσο χαμηλή συγκέντρωση, ο ερεθισμός του ανωτέρου αναπνευστικού δεν αναμένεται να γίνει πιο σοβαρός σε μεγαλύτερο χρόνο έκθεσης, ενώ μετά από παρατεταμένη έκθεση το άτομο μπορεί να προσαρμοστεί στην παρουσία του παράγοντα. Έτσι, το όριο κατωφλιού AEG1-1 ορίζεται για όλες τις χρονικές περιόδους έκθεσης στα 21mg/m³ (30 ppm) [22].

Το όριο οξείας έκθεσης AEGL-2 προέκυψε από πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε ανθρώπους μη εξοικειωμένους με τη χημική ουσία, είτε λόγω προηγούμενης επαφής τους με αυτή είτε λόγω επίγνωσης των διαθέσιμων εργαστηριακών μελετών. Τα πειράματα περιλάμβαναν την έκθεση των συμμετεχόντων σε συγκεντρώσεις 77 mg/m^3 (110 ppm) για διάστημα 2 ωρών. Οι συμμετέχοντες μετά την έκθεσή τους ανέφεραν από καθόλου ως προσβλητικό ερεθισμό των οφθαλμών, βήχα, δυσφορία και από απλώς αντιληπτό ως προσβλητικό ερεθισμό του λαιμού. Η πνευμονική λειτουργία δεν επηρεάστηκε από την έκθεση, ενώ καμία υπολειμματική επίδραση δεν αναφέρθηκε μετά τον τερματισμό της. Στη συνέχεια, το πείραμα επαναλήφθηκε για μεγαλύτερη συγκέντρωση του παράγοντα, με ορισμένους από τους συμμετέχοντες να περιγράφουν τις επιπτώσεις της έκθεσης ως αφόρητες και να αποχωρούν από τον θάλαμο σε διάστημα μεταξύ 30 λεπτών και μιας ώρας. Κανένας από τους συμμετέχοντες δεν κατάφερε να παραμείνει στο θάλαμο για το συνολικό χρόνο του πειράματος, διάρκειας 2 ωρών. Ο καθορισμός του AEGL-2 βασίστηκε στις απαντήσεις των πλέον ευαίσθητων συμμετεχόντων. Για τον προσδιορισμό του δεν χρησιμοποιήθηκε κάποιος παράγοντας ενδοειδικής αβεβαιότητας² ($UF_{\text{intraspecies variation}}=1$), αφού η αμμωνία καθαρίζεται αποτελεσματικά στο ανώτερο αναπνευστικό σύστημα και δεν αναμένεται να εμφανιστεί εντονότερος ερεθισμός από αυτόν που περιγράφει η ομάδα των πλέον ευαίσθητων συμμετεχόντων. Έτσι, οι επιπτώσεις που περιγράφει η πιο ευαίσθητη ομάδα συμμετεχόντων, θεωρούνται αντιπροσωπευτικές για το γενικό πληθυσμό, συμπεριλαμβανομένων και των ειδικών κατηγοριών (άτομα με αναπνευστικά προβλήματα, παιδιά, ηλικιωμένοι κλπ.). Οι τιμές AEGL-2 για τις 8 χρονικές περιόδους έκθεσης προέκυψαν από μαθηματική σχέση που εμπλέκει την συγκέντρωση και τον χρόνο έκθεσης [22].

Οι τιμές των AEGL-3 βασίστηκαν στις τιμές $LCT1^3$ για ποντίκια [22]. Δεν εφαρμόστηκε παράγοντας αβεβαιότητας μεταξύ διαφορετικών ειδών ($UF_{\text{interspecies variety}}=1$), γιατί τα ποντίκια είναι το πιο ευαίσθητο είδος μεταξύ των θηλαστικών και θεωρούνται ιδιαίτερα ευαίσθητα σε ερεθιστικά του αναπνευστικού. Εφαρμόστηκε παράγοντας ενδοειδικής αβεβαιότητας 3 ($UF_{\text{intraspecies variety}}=3$), ώστε να ληφθούν υπόψιν τραχειοβρογχικές και πνευμονικές επιπτώσεις που μπορεί να εμφανιστούν σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις σε ηλικιωμένα άτομα, στα οποία έρευνες έδειξαν ότι η αντανακλαστική σύγκλιση της γλωττίδας είναι 3 φορές λιγότερο ευαίσθητη από ότι στα νεαρά άτομα. Οι τιμές AEGL-3 για τις 5 χρονικές περιόδους έκθεσης

² Στο Παράρτημα III γίνεται μια σύντομη αναφορά στους παράγοντες αβεβαιότητας που λαμβάνονται υπόψιν κατά την εκτίμηση τοξικότητας μιας χημικής ουσίας.

³ Βλ. Παράρτημα II

προέκυψαν από μαθηματική σχέση που εμπλέκει την συγκέντρωση και τον χρόνο έκθεσης (22). Τα όρια AEGLs για την αμμωνία συνοψίζονται στον **Πίνακας 1.2**.

Πίνακας 1.2: Όρια AEGLs για Αμμωνία (22)

Ταξινόμηση	10 min	30 min	1 h	4 h	8 h	Τελικό σημείο
AEGL-1 (μη αδρανοποιητικό)	30 ppm (21 mg/m ³)	30 ppm (21 mg/m ³)	30 ppm (21 mg/m ³)	30 ppm (21 mg/m ³)	30 ppm (21 mg/m ³)	Ήπια ενόχληση του ανώτερου αναπνευστικού συστήματος.
AEGL-2 (αδρανοποιητικό)	220 ppm (154 mg/m ³)	220 ppm (154 mg/m ³)	160 ppm (112 mg/m ³)	110 ppm (77 mg/m ³)	110 ppm (77 mg/m ³)	Ενόχληση των οφθαλμών και του λαϊμού, βήχας.
AEGL-3 (θανατηφόρο)	2,700 ppm (1,888 mg/m ³)	1,600 ppm (1,119 mg/m ³)	1,100 ppm (769 mg/m ³)	550 ppm (385 mg/m ³)	390 ppm (273 mg/m ³)	Θνητότητα.

1.4.2 Φωσγένιο

1.4.2.1 Φυσικές και χημικές ιδιότητες φωσγενίου

Το φωσγένιο (COCl₂) παρασκευάζεται εργαστηριακά από αντίδραση μονοξειδίου του άνθρακα και αερίου χλωρίου, παρουσία ενεργού άνθρακα. Συντέθηκε για πρώτη φορά το 1812. Χρησιμοποιήθηκε σαν χημικό όπλο από τον γερμανικό στρατό κατά την διάρκεια του 1^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου και έκτοτε έχει γίνει μέρος του χημικού οπλοστασίου πολλών χωρών. Επιπλέον, χρησιμοποιείται στην παρασκευή πολλών οργανικών χημικών ουσιών, ιδιαίτερα στις βιομηχανίες χρωστικών, φαρμακευτικών, ζιζανιοκτόνων, εντομοκτόνων και εξόρυξης μεταλλευμάτων. Στο περιβάλλον δεν συναντάται φυσικά, ωστόσο, μικρές ποσότητες εντοπίζονται στην ατμόσφαιρα λόγω της διάσπασης των χλωριωμένων ενώσεων [28].

Σε θερμοκρασία δωματίου, το φωσγένιο είναι ένα άχρωμο αέριο, το οποίο μπορεί να εμφανιστεί και σαν λευκό σύννεφο. Σε χαμηλές συγκεντρώσεις έχει οσμή που περιγράφεται σαν αυτή του φρεσκοκομμένου χορταριού ή του πράσινου καλαμποκιού. Σε υψηλές συγκεντρώσεις έχει μια έντονη αποπνικτική οσμή η οποία ωστόσο είναι ανιχνεύσιμη μόνο για ένα σύντομο χρονικό διάστημα μετά την απελευθέρωσή του και δεν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστος δείκτης υπερέκθεσης [28].

Το φωσγένιο είναι αέριο περίπου 3.4 φορές βαρύτερο από τον ξηρό αέρα (μοριακό βάρος: 98.92 gr/mole) και έτσι μετά την εκπομπή του είναι πιο πιθανό να βρεθεί σε χαμηλές περιοχές, ρέοντας σε κατωφύρεις. Επιπλέον, λόγω του μεγάλου μοριακού του βάρους, όταν

Χημικοί Παράγοντες

απελευθερώνεται σε εσωτερικούς χώρους, μπορεί να προκαλέσει μετατόπιση οξυγόνου σε υψηλότερες περιοχές και να οδηγήσει σε ασφυξία [26].

Το σημείο βρασμού του είναι 8.2°C και το σημείο τήξης του -118°C. Κάτω από τους 8.2°C σχηματίζει ένα ατμίζον υγρό. Όταν έρχεται σε επαφή με το νερό διασπάται γρήγορα σε υδροχλωρικό οξύ (HCl) και διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Συσκευάζεται και μεταφέρεται σε χαλύβδινα βαρέλια σαν υγροποιημένο, συμπιεσμένο αέριο. Είναι μη εύφλεκτο αλλά εξαιρετικά τοξικό και στη στρατιωτική ορολογία αναφέρεται με τα αρχικά "CG" (Chocking Gas) [29].

1.4.2.2 Μηχανισμοί έκθεσης στο φωσγένιο και επιπτώσεις στην υγεία

Το φωσγένιο μπορεί να απελευθερωθεί στον εσωτερικό ή τον εξωτερικό αέρα σαν αέριο. Λόγω της γρήγορης διάσπασής του σε υδροχλωρικό οξύ και διοξείδιο του άνθρακα όταν έρχεται σε επαφή με το νερό, είναι απίθανο να μολύνει το νερό ή τα τρόφιμα. Επιπλέον, θεωρείται πολύ απίθανο να μολύνει τα γεωργικά προϊόντα σε περίπτωση απελευθέρωσής του ως αέριο στον εξωτερικό αέρα [28].

Κατά τη διάρκεια ενός χημικού περιστατικού, οι άνθρωποι μπορούν να εκτεθούν στο φωσγένιο μέσω της εισπνοής, μέσω της επαφής με τα μάτια ή μέσω της επαφής με το δέρμα.

Η εισπνοή είναι ο πιο συνηθισμένος μηχανισμός έκθεσης στο φωσγένιο. Σε αντίθεση με άλλους πιο υδατοδιαλυτούς ρύπους, οι οποίοι εναποτίθενται κατά κύριο λόγο στους ανώτερους αναπνευστικούς αεραγωγούς, το φωσγένιο εναποτίθεται στο κατώτερο αναπνευστικό σύστημα [30]. Άτομα που εκτίθενται σε χαμηλές συγκεντρώσεις φωσγενίου μπορεί να εμφανίσουν από καθόλου έως ήπιο ερεθισμό των ανώτερων αεραγωγών. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την σχετικά ευχάριστη οσμή του έχει σαν αποτέλεσμα τα εκτιθέμενα άτομα να μην αντιλαμβάνονται εγκαίρως την παρουσία του και να μην αναζητούν διόδους διαφυγής, επιτρέποντας έτσι στον ρύπο να εγκατασταθεί βαθύτερα στους πνεύμονές τους [31] [32]. Το εισπνεόμενο φωσγένιο, σε επικίνδυνες συγκεντρώσεις, προκαλεί άμεσα κάψιμο στο λαιμό, επίμονο βήχα, ναυτία, εμετό, πόνο στο στήθος και δύσπνοια. Επιπλέον, μπορεί να οδηγήσει σε συσσώρευση υγρού στους πνεύμονες (πνευμονικό οίδημα) σε διάστημα δύο με έξι ωρών μετά την έκθεση, ενώ η πνευμονική βλάβη μπορεί να οδηγήσει σε καρδιακή ανεπάρκεια και θάνατο [26].

Η επαφή με τα μάτια δημιουργεί αίσθημα καύσου των οφθαλμών, δακρύρροια, καθώς επίσης φλεγμονή και θόλωμα του κερατοειδούς. Η επαφή με το δέρμα, ιδίως σε

περιοχές με αυξημένη υγρασία, μπορεί να προκαλέσει ερεθισμό και ερύθημα παρόμοια με αυτά που προκαλούνται από κρυοπαγήματα ή εγκαύματα [26].

Η έκθεση στο φωσγένιο μπορεί να επιφέρει επιπτώσεις που να μην γίνουν αντιληπτές για έως και 48 ώρες μετά την έκθεση, επομένως, τα άτομα που έχουν εκτεθεί στο φωσγένιο θα πρέπει να παρακολουθούνται ως και 48 ώρες μετά. Οι ετεροχρονισμένες αυτές επιπτώσεις περιλαμβάνουν δυσκολία στην αναπνοή, βήχα με ίχνη υγρού λευκού ως ροζ χρώματος στα πτύελα, σημάδι πνευμονικού οιδήματος, χαμηλή πίεση του αίματος και συγκοπή.

1.4.2.3 Οριακές τιμές έκθεσης στο φωσγένιο

Το όριο IDLH για το φωσγένιο ορίστηκε σε πρώτη φάση στα $8.37\text{mg}/\text{m}^3$ (2ppm) και δεν τροποποιήθηκε κατά την αναθεώρησή των IDLH από το NIOSH. Ο ορισμός του IDLH για το φωσγένιο βασίστηκε σε αναφορά πως συγκέντρωση $20.93\text{mg}/\text{m}^3$ (5ppm) του χημικού παράγοντα μπορεί να είναι θανατηφόρα για χρόνο έκθεσης μεγαλύτερο των 30 λεπτών, σε αναφορά πως έκθεση ποντικών για χρονικό διάστημα 2 ωρών σε μικρές συγκεντρώσεις της τάξης των $2.09\text{mg}/\text{m}^3$ (0.5ppm) είχε σαν αποτέλεσμα σαφείς παθολογικές αλλαγές στους πνεύμονες των πειραματόζων, τα οποία κατέληξαν 96 ώρες μετά την έκθεση, καθώς και σε αναφορά πως έκθεση ποντικών για χρονικό διάστημα 80 λεπτών σε $8.37\text{mg}/\text{m}^3$ (2ppm) φωσγενίου προκάλεσαν στα πειραματόζωα έμμεσες επιπτώσεις που εμφανίστηκαν 3 μήνες μετά την έκθεση [33].

Πίνακας 1.3: Όριο IDLH για Φωσγένιο [33]

IDLH
$8.37\text{mg}/\text{m}^3$ (2 ppm)

Σχετικά με τα όρια οξείας έκθεσης, για το φωσγένιο δεν υπάρχουν κατάλληλα δεδομένα για ορισμό της τιμής του AEGL-1. Η οσμή της ουσίας σε χαμηλές συγκεντρώσεις δεν μπορεί να ληφθεί σαν προειδοποίηση πιθανής παρουσίας της στο χώρο, ενώ επειδή είναι σχετικά ευχάριστη τα άτομα μπορούν να αναπτύξουν ανοχή σε αυτή. Το κατώφλι της συγκέντρωσης της ουσίας όπου η οσμή γίνεται ενοχλητική βρίσκεται μεταξύ των τιμών 0,5 ppm και 1,5 ppm, τιμές που πλησιάζουν ή υπερβαίνουν τα AEGL-2 και AEGL-3 [21].

Ο προσδιορισμός των ορίων AEGL-2 βασίστηκε σε πειράματα που έγιναν σε ποντίκια και πιο συγκεκριμένα, στη συγκέντρωση που τους προκαλεί χημική πνευμονία (έκθεση σε συγκέντρωση 2ppm για 90 λεπτά). Στα αποτελέσματα των πειραμάτων εφαρμόστηκε ένας

Χημικοί Παράγοντες

παράγοντας αβεβαιότητας για διαφοροποίηση μεταξύ των ειδών ίσος με 3 ($UF_{interspecies\ variety=3}$) για να εκφράσει την μεταβλητότητα που παρατηρείται μεταξύ μικρότερων και μεγαλύτερων ειδών αναφορικά με τα θανατηφόρα και μη θανατηφόρα τελικά σημεία έκθεσης στο φωσγένιο. Επιπλέον, εφαρμόστηκε ένας παράγοντας ενδοειδικής διαφοροποίησης ίσος με 3 ($UF_{intraspecies\ variety=3}$) ώστε να ληφθούν υπόψιν οι ειδικές κατηγορίες του γενικού πληθυσμού (άτομα με αναπνευστικά προβλήματα, παιδιά, ηλικιωμένοι κλπ.), δεδομένου πως ο μηχανισμός τοξικότητας του φωσγενίου αναμένεται να παρουσιάσει διαφοροποιήσεις στα άτομα αυτά, όχι όμως σημαντικές. Προέκυψε έτσι μια τιμή για χρόνο έκθεσης 90 λεπτών και βάση αυτής και μαθηματικής σχέσης που συνδέει την συγκέντρωση με τον χρόνο έκθεσης υπολογίστηκαν οι τιμές AEGL-2 για τις περιόδους έκθεσης των 30 λεπτών, 1 ώρας, 4 ωρών και 8 ωρών. Το όριο AEGL-2 για τα 30 λεπτά έκθεσης υιοθετήθηκε και για τα 10 λεπτά έκθεσης [21].

Ο προσδιορισμός των ορίων AEGL-3 βασίστηκε επίσης σε πειράματα σε ποντίκια. Οι τιμές AEGL-3 για χρόνους έκθεσης 30 λεπτών, 1 ώρας, 4 ωρών και 8 ωρών προσδιορίστηκαν βάση της μέγιστης συγκέντρωσης που δεν προκαλεί θάνατο σε ποντίκια για χρόνο έκθεσης 30 λεπτών, δηλαδή 15ppm. Εφαρμόστηκε ένας παράγοντας αβεβαιότητας για διαφοροποίηση μεταξύ των ειδών ίσος με 3 ($UF_{interspecies\ variety=3}$) για να εκφράσει την μεταβλητότητα μεταξύ μικρότερων και μεγαλύτερων ειδών σχετικά με τα θανατηφόρα και μη θανατηφόρα τελικά σημεία έκθεσης στο φωσγένιο, καθώς και ένας παράγοντας ενδοειδικής διαφοροποίησης ίσος με 3 ($UF_{intraspecies\ variety=3}$) για να εκφράσει την διαφοροποίηση στις ειδικές ομάδες του γενικού πληθυσμού, όμοια με τους παράγοντες αβεβαιότητας που εφαρμόστηκαν για τον προσδιορισμό των AEGL-2. Προέκυψε έτσι το όριο AEGL-3 για χρόνο έκθεσης 30 λεπτών και βάση αυτού και μαθηματικής σχέσης που συνδέει την συγκέντρωση με τον χρόνο έκθεσης υπολογίστηκαν οι τιμές AEGL-3 για τις περιόδους έκθεσης 1 ώρας, 4 ωρών και 8 ωρών. Το όριο AEGL-3 για χρόνο έκθεσης 10 λεπτών βασίστηκε στην μέγιστη συγκέντρωση που δεν προκαλεί θάνατο σε ποντίκια μετά από έκθεση 10 λεπτών, που είναι ίση με 36 ppm. Για τον προσδιορισμό του AEGL-3 για χρόνο έκθεσης 10 λεπτών εφαρμόστηκαν οι παράγοντες αβεβαιότητας που εφαρμόστηκαν και στις υπόλοιπες χρονικές περιόδους έκθεσης ($UF_{interspecies\ variety=3}$ και $UF_{intraspecies\ variety=3}$) [21].

Τα όρια AEGLs για το φωσγένιο, για τις 5 χρονικές περιόδους έκθεσης παρουσιάζονται στον **Πίνακα 1.4**.

Πίνακας 1.4: Όρια AEGLs για Φωσγένιο (21)

Ταξινόμηση	10 min	30 min	1 h	4 h	8 h	Τελικό σημείο
AEGL-1 (μη αδρανοποιητικό)	NR*	NR*	NR*	NR*	NR*	NR*
AEGL-2 (αδρανοποιητικό)	2.51mg/m ³ (0.60 ppm)	2.51mg/m ³ (0.60 ppm)	1.25mg/m ³ (0.30ppm)	0.33mg/m ³ (0.08 ppm)	0.16mg/m ³ (0.04 ppm)	Χημική πνευμονία σε πειραματόζωα ποντίκια.
AEGL-3 (θανατηφόρο)	15 mg/m ³ (3.6 ppm)	6.2 mg/m ³ (1.5 ppm)	3.1 mg/m ³ (0.75 ppm)	0.82mg/m ³ (0.20 ppm)	0.34mg/m ³ (0.09 ppm)	Μέγιστη συγκέντρωση που δεν προκαλεί θάνατο σε ποντίκια, μετά από 10 ή 30 λεπτά έκθεσης.

* NR = Not recommended due to insufficient data

1.4.2.4 Μη θανατηφόρες επιπτώσεις φωσγενίου στον άνθρωπο

Το φωσγένιο είναι ένας εξαιρετικά τοξικός χημικός παράγοντας, που μπορεί να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα στην ανθρώπινη υγεία, ακόμα και για σύντομη έκθεση σε μικρές συγκεντρώσεις. Οι σοβαρότερες επιπτώσεις προκαλούνται στο κατώτερο αναπνευστικό σύστημα, αφού οι πνεύμονες είναι το κύριο όργανο-στόχος του χημικού παράγοντα, ενώ μπορεί να προκαλέσει ενοχλήσεις στα μάτια και στο δέρμα.

Η σύντομη έκθεση στο φωσγένιο (μέχρι 8 ώρες) μπορεί να προκαλέσει προβλήματα επιδρώντας στις πρωτεΐνες του σώματος, ενώ επίσης αντιδρά με το νερό των ιστών του αναπνευστικού συστήματος και παράγει διοξείδιο του άνθρακα και υδροχλωρικό οξύ. Το υδροχλωρικό οξύ διαλύει τις μεμβράνες των πνευμόνων, οι οποίοι γεμίζουν με νερό και έτσι το άτομο μπορεί να πάθει πνευμονικό οίδημα, αιμορραγία και βρογχιολίτιδα. Η βλάβη των πνευμόνων μπορεί να οδηγήσει σε καρδιακή ανεπάρκεια και τελικά σε θάνατο. Ο ερεθισμός των ματιών και του ανώτερου αναπνευστικού συστήματος μπορεί να είναι ιδιαίτερα ήπιος και εμφανίζεται άμεσα. Οι επιπτώσεις στα κύτταρα των κατώτερων αεραγωγών και των πνευμόνων ωστόσο είναι ιδιαίτερα σοβαρές και εκδηλώνονται μεταγενέστερα, αφού το άτομο μπορεί να μην παρουσιάσει σοβαρά συμπτώματα ασφυξίας παρά μόνον αρκετές ώρες μετά την αρχική έκθεση (έως και 72 ώρες μετά).

Τα όρια AEGLs για το φωσγένιο έχουν καθοριστεί από πειράματα σε ποντίκια, εφαρμόζοντας παράγοντες αβεβαιότητας, όπως περιεγράφηκε αναλυτικά παραπάνω. Λόγω της υψηλής τοξικότητας του χημικού παράγοντα τα όρια AEGL είναι σχετικά χαμηλά, ενώ δεν καθορίζεται όριο AEGL-1 λόγω μη ικανοποιητικής επάρκειας δεδομένων που θα οδηγούσε σε ασφαλή αποτελέσματα. Οι χαμηλές τιμές των AEGLs σε συνδυασμό με την απουσία άμεσων σοβαρών συμπτωμάτων, κάνει δύσκολη την περιγραφή των επιπτώσεων σύντομης έκθεσης στον άνθρωπο. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι συγκεντρώσεις που μπορούν

Χημικοί Παράγοντες

να προκαλέσουν ήπια όχληση, ακόμα και αν δεν έχουν άμεσα θανατηφόρα αποτελέσματα, αφού διαπιστώνεται έτσι η έκθεση των ατόμων στον χημικό παράγοντα, που μπορεί να επιφέρει σοβαρότατες επιπτώσεις ως 72 ώρες μετά.

Για τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων που προκαλούν ήπια όχληση, το NIOSH πραγματοποίησε το 1976 δύο μελέτες με σκοπό να προσδιορίσει την οριακή συγκέντρωση στην οποία η οσμή του φωσγενίου γίνεται αντιληπτή. Στην πρώτη μελέτη 56 στρατιωτικοί εκτέθηκαν σε σταδιακά αυξανόμενες συγκεντρώσεις του χημικού παράγοντα, μέχρι όλα τα εκτιθέμενα άτομα να μπορέσουν να ανιχνεύσουν την οσμή του. Η χαμηλότερη συγκέντρωση στην οποία η οσμή του παράγοντα έγινε αντιληπτή ήταν τα 0.4ppm. Το 39% του δείγματος δήλωσε πως αντιλαμβάνεται την οσμή του φωσγενίου σε συγκέντρωση 1.2ppm και το 50% σε συγκέντρωση 1.5 ppm. Στη δεύτερη μελέτη, τέσσερα άτομα δήλωσαν πως η χαμηλότερη συγκέντρωση στην οποία η παρουσία του παράγοντα γίνεται αντιληπτή μέσω οσμής είναι το 1.0 ppm και παρομοίασαν την χαρακτηριστική οσμή του με αυτή του «φρεσκοκομμένου σανού».

Οι Diller και Zante (1986) [34] πραγματοποίησαν μια εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με την έκθεση ανθρώπων στο φωσγένιο, από την οποία συγκέντρωσαν πληροφορίες για τις θανατηφόρες και τις μη θανατηφόρες επιπτώσεις του χημικού παράγοντα. Οι πληροφορίες για τις μη θανατηφόρες επιπτώσεις συνδυάστηκαν με δεδομένα σχετικά με την «αρχή πνευμονικής βλάβης» σε ζώα και οδήγησαν στον καθορισμό συγκεντρώσεων που επιφέρουν μη θανατηφόρες επιπτώσεις στον άνθρωπο, οι οποίες συνοψίζονται στον **Πίνακα 1.5**. Σε γενικές γραμμές, η βιβλιογραφική έρευνα έδειξε πως έκθεση σε συγκεντρώσεις από 3 ως 5 ppm προκαλεί ερεθισμό των ματιών και του λαιμού, συνοδευόμενο από βήχα. Η έκθεση σε 25 ppm, για χρόνο 30-60 λεπτά χαρακτηρίζεται ως επικίνδυνη, ενώ άμεσα θανατηφόρα είναι η έκθεση σε 50 ppm ακόμα και για πολύ μικρό χρόνο έκθεσης.

Πίνακας 1.5: Μη θανατηφόρες επιπτώσεις φωσγενίου στον άνθρωπο

Είδος επίπτωσης	Συγκέντρωση
Αντίληψη οσμής	$> 1.67\text{mg}/\text{m}^3$ ($> 0,4$ ppm)
Αναγνώριση οσμής	$> 6.28\text{mg}/\text{m}^3$ ($>1,5$ ppm)
Ερεθισμός των οφθαλμών, ρινικός ερεθισμός, ερεθισμός του λαιμού, βρογχιολικός ερεθισμός	$> 12.55\text{mg}/\text{m}^3$ ($>3,0$ ppm)
Βλάβη πνευμόνων αρχικού σταδίου	$> 125.55\text{mg}/\text{m}^3 \cdot \text{min}$ (>30 ppm · min)
Κλινικό πνευμονικό οίδημα	$> 627.78\text{mg}/\text{m}^3 \cdot \text{min}$ (>150 ppm · min)

2 Υπολογιστική Ρευστομηχανική

Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics – CFD) είναι κλάδος της Μηχανικής Ρευστών που αξιοποιεί την χρήση υπολογιστικών μεθόδων και αλγορίθμων για την επίλυση προβλημάτων ροής τα οποία δεν μπορούν να επιλυθούν αναλυτικά. Ξεκίνησε να αναπτύσσεται από την δεκαετία του '50, με την εμφάνιση των πρώτων ηλεκτρονικών υπολογιστών και η εξέλιξή της συμβαδίζει με την εξέλιξη της τεχνολογίας τους. Έχει ευρύ φάσμα εφαρμογών στους τομείς της έρευνας, του σχεδιασμού και της βιομηχανίας, με τις σύγχρονες μεθόδους CFD να μπορούν να επιλύσουν σχεδόν κάθε πρόβλημα ροής, ανεξαρτήτως του βαθμού δυσκολίας του.

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια εισαγωγή στην Υπολογιστική Ρευστοδυναμική και τα προβλήματα που καλείται να αντιμετωπίσει και στη συνέχεια γίνεται ειδική αναφορά στα βασικά πεδία της, όπως η χωρική διακριτοποίηση του πεδίου ροής, τα μοντέλα προσομοίωσης της τύρβης και τους γενικούς επιλύτες που χρησιμοποιούν τα CFD λογισμικά.

2.1 Εισαγωγή στις μεθόδους Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής

Οι εξισώσεις που περιγράφουν και διέπουν τη ροή είναι γνωστές για περισσότερο από 100 χρόνια και είναι γενικά αποδεκτό πως μπορούν να περιγράψουν με ακρίβεια όλες τις ροές, από τις πιο απλές μέχρι τις πιο περίπλοκες. Ωστόσο, πρόκειται για εξισώσεις μη γραμμικές, τρισδιάστατες, ασταθείς και τυρβώδεις, με τα χαρακτηριστικά τους αυτά να καθιστούν αδύνατη την αναλυτική τους λύση για τα περισσότερα εφαρμοσμένα προβλήματα Ρευστομηχανικής [35].

Οι αναλυτικές λύσεις των εξισώσεων ροής είναι εφικτές μόνο για ένα περιορισμένο αριθμό προβλημάτων στοιχειωδών ροών μέσα σε απλές γεωμετρίες, στις οποίες μπορούν να εφαρμοστούν οριακές συνθήκες. Οι ροές ωστόσο που έχουν ενδιαφέρον για τον σχεδιασμό και τις βιομηχανικές εφαρμογές είναι σύνθετες και συμβαίνουν μέσα σε γεωμετρικά περίπλοκα πεδία ροής. Η ανάγκη για ποσοτική πληροφορία στους τομείς αυτούς οδήγησε σε συστηματικές πειραματικές μελέτες, τα αποτελέσματα των οποίων σε συνδυασμό με την αδιάστατη ανάλυση και τις αρχές της Ρευστοδυναμικής αξιοποιήθηκαν για την παραγωγή χρήσιμων διαγραμμάτων, πινάκων κλπ., όπου αποτυπώνονται πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τις δυνάμεις και τις αντιστάσεις ροής.

Μέχρι σήμερα, οι πειραματικές μέθοδοι παραμένουν οι πιο αξιόπιστες, αφού είναι οι μόνες που μπορούν να δώσουν ακριβή πληροφορία για τις περίπλοκες διαδικασίες της μετάβασης ροής και της τύρβης. Ωστόσο, έχουν μεγάλο κόστος, είναι πολύ χρονοβόρες και

στην περίπτωση της μελέτης διασποράς ρύπων, τοξικές. Επιπλέον, έχουν τον σοβαρό περιορισμό ότι δεν επιτρέπουν την ταυτόχρονη προσομοίωση πολλών αδιάστατων αριθμών που χαρακτηρίζουν τη ροή και επομένως δεν επιτρέπουν τη διεξαγωγή εκτεταμένων παραμετρικών μελετών [36].

Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics – CFD) είναι κλάδος της Μηχανικής Ρευστών που βασίζεται στην χρήση αριθμητικών μεθόδων και αλγορίθμων για την επίλυση προβλημάτων ροής με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή. Οι μέθοδοι CFD ξεκίνησαν να εφαρμόζονται από την δεκαετία του '50, ωστόσο η μικρή διαθέσιμη υπολογιστική ισχύς κατά τα πρώτα χρόνια δεν επέτρεπε την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων. Η εξέλιξη του κλάδου συμβαδίζει με την εξέλιξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών και είναι τις τελευταίες δεκαετίες ραγδαία, επιτρέποντας την λύση σχεδόν κάθε παρουσιαζόμενου προβλήματος ροής, ανεξαρτήτως του βαθμού δυσκολίας του.

Οι μέθοδοι CFD δίνουν τη δυνατότητα της προσομοίωσης μιας ροής κάτω από φυσικές συνθήκες που δεν μπορούν να αναπαραχθούν πειραματικά. Βασικά πλεονεκτήματά τους είναι η εύκολη και γρήγορη προσομοίωση διαφορετικών σεναρίων με κατάλληλη τροποποίηση των παραμέτρων του προβλήματος, καθώς και η δραστική μείωση του χρόνου και του κόστους διεξαγωγής μιας μελέτης.

Με τις μεθόδους CFD η ροή αναπαρίσταται προσεγγιστικά (προσομοιώνεται). Αυτό πρακτικά σημαίνει πως δεν υπολογίζεται η αναλυτική λύση ενός προβλήματος ροής, αλλά διακριτές τιμές της λύσης, σε ένα δεδομένο αριθμό διακριτών σημείων και μόνο σε διακριτά χρονικά διαστήματα. Οι τιμές της λύσης που υπολογίζονται απέχουν από τις πραγματικές, λόγω απώλειας πληροφορίας από τις τιμές που δεν υπολογίζονται. Ωστόσο, οι σύγχρονες μέθοδοι CFD χρησιμοποιούν μεγάλο αριθμό υπολογιστικών κόμβων και συναρτήσεις παρεμβολής, ώστε το σφάλμα λόγω απώλειας πληροφορίας να ελαχιστοποιείται και η υπολογιζόμενη λύση να θεωρείται ικανοποιητική.

Για την επίλυση ενός ροϊκού πεδίου με CFD, ο χρήστης του λογισμικού θα πρέπει αρχικά να αναπτύξει το μοντέλο του συστήματος. Το μοντέλο είναι η πολύ καλά ορισμένη περιγραφή του συστήματος που προκύπτει από τον καθορισμό μιας σειράς παραμέτρων, όπως η γεωμετρία και οι οριακές συνθήκες του πεδίου ροής, τα υπό μελέτη ρευστά και οι ιδιότητές τους, οι αρχικές συνθήκες του συστήματος, το είδος της ροής, το μοντέλο της τύρβης κλπ. Στη συνέχεια το λογισμικό αναπαριστά τη λειτουργία του συστήματος, προσομοιώνει δηλαδή τη ροή μέσα στην ορισμένη γεωμετρία του πεδίου ροής. Την

ολοκλήρωση της διαδικασίας ακολουθεί η μετα-επεξεργασία των δεδομένων (post-process), η παρουσίαση δηλαδή των αποτελεσμάτων με τη μορφή γραφημάτων, όπως καμπύλες, ρευματογραμμές, διανύσματα, αποδόσεις όγκου, ακόμα και κινούμενες εικόνες.

Η εφαρμογή των μεθόδων CFD απαιτεί διαθεσιμότητα πολλών υπολογιστικών πόρων και γι' αυτό μπορεί να είναι αρκετά χρονοβόρα, σε κάθε περίπτωση ωστόσο είναι πολύ πιο σύντομη και εύκολη διαδικασία από την πειραματική διερεύνηση του προβλήματος. Στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του συστήματος που θα πρέπει να καθορίσει το χρήστης του CFD λογισμικού για την επίλυση προβλημάτων ροής.

2.2 Γεωμετρία πεδίου ροής

Ανάλογα με τις ανάγκες του προβλήματος η γεωμετρία μπορεί να είναι διδιάστατη (2D) ή τριδιάστατη (3D). Στα προβλήματα εκτίμησης της IAQ και εφόσον υπάρχει διαθεσιμότητα υπολογιστικών πόρων, τα πεδία ροής είναι συνήθως 3D. Στο γεωμετρικό μοντέλο του πεδίου ροής αποτυπώνεται εκτός από την μορφολογία του χώρου και ο εξοπλισμός του, καθώς και οποιοδήποτε στοιχείο θα μπορούσε να θεωρηθεί εμπόδιο στη ροή του ρευστού.

Ο σχεδιασμός της γεωμετρίας του πεδίου ροής μπορεί να γίνει με τα σχεδιαστικά εργαλεία που διαθέτει το ίδιο το CFD λογισμικό ή με χρήση εξωτερικών CAD (Computer Aided Design) λογισμικών. Τα σχεδιαστικά εργαλεία που βρίσκονται ενσωματωμένα στα CFD λογισμικά είναι επαρκή και μπορούν να αποδώσουν με ικανοποιητική λεπτομέρεια την γεωμετρία των ροϊκών πεδίων, ενώ εξελίσσονται και αναβαθμίζονται συνεχώς, παρέχοντας όλο και περισσότερες επιλογές στο κομμάτι του σχεδιασμού. Ωστόσο, τα εξωτερικά CAD λογισμικά διαθέτουν ακόμα περισσότερα σχεδιαστικά εργαλεία και συνήθως προτιμώνται για την επίτευξη μεγαλύτερης λεπτομέρειας.

Θα πρέπει να σημειωθεί πως η λεπτομέρεια στο σχεδιασμό είναι σαφώς επιθυμητή, σε περιπτώσεις ωστόσο μεγάλων χωρικών πεδίων ροής, όπως αυτά των προβλημάτων εκτίμησης IAQ, είναι προτιμότερο να γίνονται κάποιες απλοποιήσεις στην γεωμετρία αποφεύγοντας τις πολλές κατασκευαστικές λεπτομέρειες, με σκοπό να δημιουργηθεί στη συνέχεια ένα όσο το δυνατό «ελαφρύτερο» πλέγμα, το οποίο θα διευκολύνει τους υπολογισμούς.

2.3 Χωρική διακριτοποίηση

Η χωρική διακριτοποίηση αφορά την δημιουργία του **πλέγματος**, δηλαδή του δικτύου κελιών στα οποία διακριτοποιείται το πεδίο ροής. Από το πλέγμα εξαρτάται ο

ορισμός του χρονικού βήματος σε χρονικά μεταβαλλόμενο πεδίο ροής, αλλά και η σύγκλιση της λύσης του προβλήματος. Η κατασκευή του πλέγματος δεν είναι εύκολη διαδικασία, ειδικά για χωρικά πλέγματα μεγάλων πεδίων ροής, όπου αντιμετωπίζονται δυσκολίες λόγω της γεωμετρίας του χώρου.

Είναι σαφές πως όσο λεπτομερέστερο είναι το πλέγμα τόσο ακριβέστερη είναι η λύση. Ωστόσο, για την επίλυση ενός πεδίου ροής που έχει διακριτοποιηθεί χωρικά σε πλέγμα με μεγάλο αριθμό κελιών, απαιτείται μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύς και περισσότερος χρόνος επεξεργασίας. Ακόμα και αν η υπολογιστική ισχύς είναι επαρκής, επειδή υπάρχει κίνδυνος υπερσχεδιασμού με μικρή συνεισφορά στην ακρίβεια της τελικής λύσης, για την επιλογή του κατάλληλου πλέγματος θα πρέπει να γίνεται έλεγχος της ανεξαρτησίας της λύσης από το πλέγμα (**grid independence test**). Στόχος είναι η δημιουργία ενός πλέγματος που θα εξασφαλίζει ακρίβεια, με τις μικρότερες δυνατές απαιτήσεις από πλευράς υπολογιστικών πόρων και χρόνου.

2.3.1 Μέθοδοι χωρικής διακριτοποίησης

Για τη χωρική διακριτοποίηση έχουν προταθεί τρεις βασικές μεθοδολογίες: Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (**Finite Difference Method – FDM**), η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (**Finite Element Method – FEM**) και η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων (**Finite Volume Method – FVM**). Παρακάτω περιγράφεται συνοπτικά καθεμία από αυτές.

2.3.1.1 Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (FDM)

Πρόκειται για την παλαιότερη μέθοδο χωρικής διακριτοποίησης, η οποία βασίζεται στην εφαρμογή πολυωνύμων, πολυωνύμων Legendre και επεκτάσεων των σειρών Taylor και Fourier για την αναπαράσταση των διαφορικών εξισώσεων. Η μέθοδος εφαρμόζεται απευθείας στη διαφορική μορφή των εξισώσεων κίνησης, με όλες τις μερικές παραγώγους να προσεγγίζονται με τιμές των μεταβλητών στους κόμβους του πλέγματος.

2.3.1.2 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM)

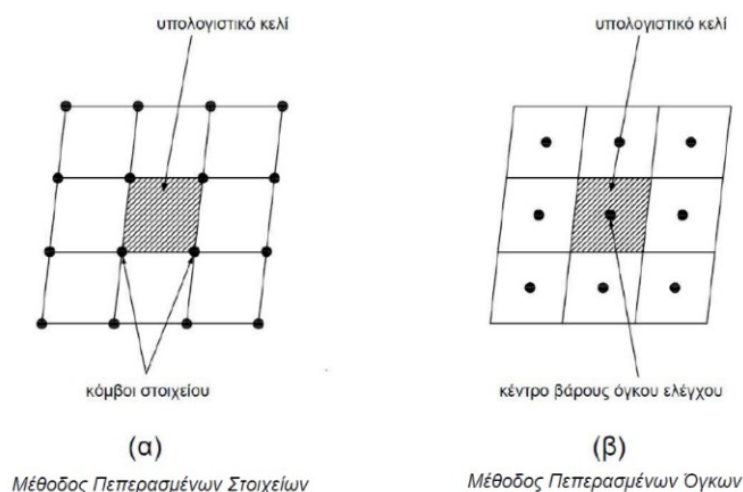
Θεμελιώδης αρχή της μεθόδου είναι η διαίρεση του γεωμετρικά σύνθετου πεδίου ροής σε ένα σύνολο απλούστερων υποπεδίων, τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Τα στοιχεία αυτά συνδέονται μεταξύ τους σε διακριτά σημεία, τους κόμβους, σχηματίζοντας ένα πλέγμα. Κάθε πεπερασμένο στοιχείο είναι ουσιαστικά ένα υπολογιστικό κελί του πλέγματος, στους κόμβους του οποίου προσεγγίζεται αριθμητικά η λύση, με μια γραμμική ή ανώτερης τάξης μεταβολή των άγνωστων ποσοτήτων που ονομάζεται συνάρτηση μορφής (**Σχήμα 2.1 και Σχήμα 2.2, Περίπτωση α**). Οι λύσεις των μερικών διαφορικών

εξισώσεων προκύπτουν χρησιμοποιώντας μια ασθενή διατύπωση των εξισώσεων διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας, ενώ αναμεσα στα γειτονικά πεπερασμένα στοιχεία θα πρέπει να εξασφαλίζεται συνέχεια της λύσης.

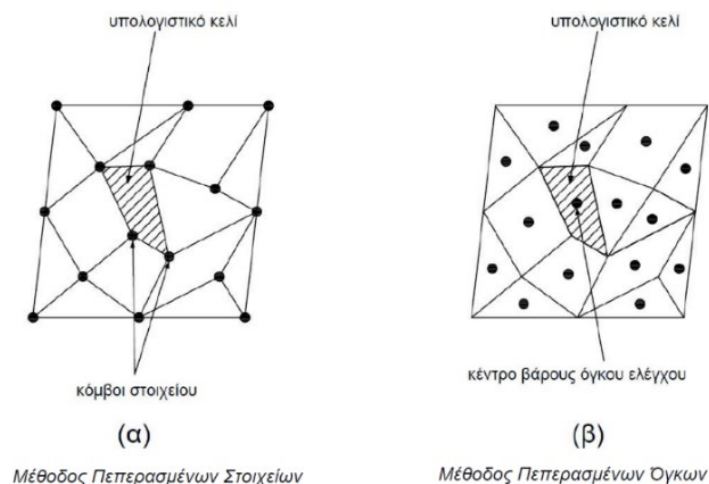
2.3.1.3 Η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων (FVM)

Σε αντιστοιχία με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, το πεδίο ροής διαιρείται σε ένα πεπερασμένο αριθμό όγκων ελέγχου που δεν αλληλεπικαλύπτονται, οι οποίοι αποτελούν τα υπολογιστικά κελιά του πλέγματος. Στο κέντρο κάθε όγκου ελέγχου βρίσκεται ένας κόμβος, στον οποίο υπολογίζεται η τιμή της ζητούμενης μεταβλητής, αξιοποιώντας την ολοκληρωτική μορφή των νόμων διατήρησης (**Σχήμα 2.1** και **Σχήμα 2.2, Περίπτωση β**). Μετά τη διακριτοποίηση και την αριθμητική ολοκλήρωση προκύπτει ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων για κάθε όγκο ελέγχου, στο οποίο εμφανίζονται και τιμές μεταβλητών από τους γειτονικούς κόμβους.

Από τις τρεις μεθόδους χωρικής διακριτοποίησης, η FDM είναι η πιο απλή. Θεωρείται γενικά αποτελεσματική μέθοδος, ωστόσο δεν μπορεί να διαχειριστεί περίπλοκες γεωμετρίες και γι' αυτό δε χρησιμοποιείται στα σύγχρονα CFD λογισμικά. Οι δύο άλλες μέθοδοι (FEM και FVM) εφαρμόζονται ευρέως στα προβλήματα ρευστοδυναμικής, με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων να συγκρίνονται με πειραματικά δεδομένα και να κρίνονται ικανοποιητικά. Βασική τους διαφορά είναι πως η FVM οδηγεί σε διακριτές λύσεις, ενώ η FEM σε μια συνεχή μέχρι ενός σημείου λύση [37]. Συνήθως, στα προβλήματα ρευστομηχανικής προτιμάται η μέθοδος FVM, γιατί εμπεριέχει πολύ καλά τις εξισώσεις διατήρησης και ορμής μέσα σε ένα στοιχειώδη όγκο ελέγχου.



Σχήμα 2.1: Αναπαράσταση Μεθόδων Χωρικής Διακριτοποίησης σε 2D δομημένο πλέγμα / Πηγή: (37)



Σχήμα 2.2: Αναπαράσταση Μεθόδων Χωρικής Διακριτοποίησης σε 2D μη δομημένο πλέγμα

2.3.2 Είδη πλεγμάτων

Τα υπολογιστικά πλέγματα, ανάλογα με την μορφή των στοιχείων από τα οποία δημιουργούνται, μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τα **δομημένα (structured grid)** και τα **μη δομημένα (unstructured grid)**, ενώ υπάρχει και μια ενδιάμεση κατηγορία, τα **υβριδικά πλέγματα (hybrid grid)**, που συνδυάζουν στοιχεία δομημένων και μη δομημένων πλεγμάτων. Ακολουθεί η παρουσίαση των δύο βασικών κατηγοριών πλεγμάτων.

2.3.2.1 Δομημένο πλέγμα (Structured grid)

Ένα δομημένο πλέγμα μοιάζει τυπολογικά με ένα διδιάστατο ή τριδιάστατο καρτεσιανό δίκτυο. Βασίζεται στις καμπυλόγραμμες συντεταγμένες οι οποίες προσδιορίζονται στα όρια του πεδίου ροής [35]. Κάθε κόμβος του πλέγματος μπορεί να εκφραστεί βάσει των καμπυλόγραμμων συντεταγμένων ως (i,j) για 2D πλέγματα ή ως (i,j,k) για 3D, με τις συντεταγμένες κάθε κόμβου να είναι μοναδικές και να εκφράζουν μόνο αυτόν.

Το πλέγμα αποτελείται από επαναλαμβανόμενα δομικά στοιχεία, τα οποία είναι **τετράπλευρα** σε 2D πλέγμα (**Σχήμα 2.1**) και **εξάεδρα** σε 3D (**Σχήμα 2.3**). Τα στοιχεία αυτά επιτρέπουν σε μεγάλο βαθμό τη στρέψη και την παραμόρφωση χωρίς να επηρεάζεται σημαντικά η λύση, πλην ιδιαίτερων σημείων γεωμετρίας. Η ιδιότητά τους αυτή τα καθιστά πολύ αποδοτικά στην πλήρωση του χώρου, αφού μπορούν να παραμορφωθούν κατάλληλα ώστε να προσαρμοστούν στη γεωμετρία του πεδίου ροής.

Οι παραμορφώσεις των δομικών στοιχείων του πλέγματος αφορούν τη γεωμετρία τους, ενώ η τοπολογία τους παραμένει σταθερή. Ο χρήστης του CFD προγράμματος έχει τη δυνατότητα να πυκνώσει το πλέγμα γύρω από περιοχές ενδιαφέροντος και να το αραιώσει

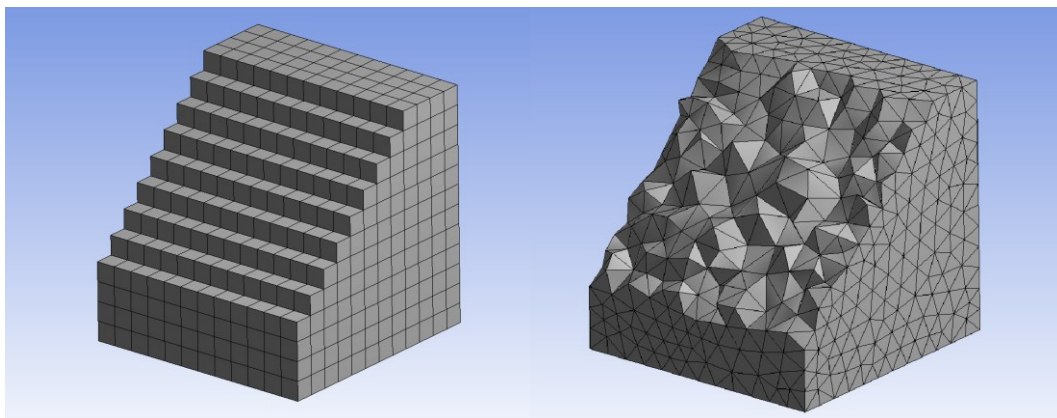
μακριά από αυτές, με αποτέλεσμα να απαιτούνται λιγότεροι υπολογιστικοί πόροι για την δημιουργία του, ενώ η επίλυση του φυσικού προβλήματος απαιτεί λιγότερο χρόνο.

2.3.2.2 Μη Δομημένο πλέγμα (Unstructured Grid)

Σε ένα μη δομημένο πλέγμα τα δομικά στοιχεία δεν διατάσσονται με συγκεκριμένο τρόπο. Κατά κανόνα τα δομικά στοιχεία των 2D πλεγμάτων είναι *τρίγωνα* (**Σχήμα 2.2**) και των 3D *τετράεδρα* (**Σχήμα 2.3**), για τα 2D πλέγματα ωστόσο υπάρχουν κώδικες που μπορούν να παράγουν μη δομημένα τετράπλευρα δομικά στοιχεία.

Τα τρίγωνα και στα τετράπλευρα στοιχεία έχουν δυνατότητα στρέψης και παραμόρφωσης αλλά σε περιορισμένο βαθμό, με αποτέλεσμα όλα τα δομικά στοιχεία του πλέγματος να έχουν κατά προσέγγιση το ίδιο μέγεθος και την ίδια μορφή. Αν λοιπόν ο χρήστης του CFD προγράμματος χρειάζεται να πυκνώσει το πλέγμα του σε μια περιοχή που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, θα πρέπει να πυκνώσει όλο το πλέγμα, με αποτέλεσμα να προκύπτουν «βαριά» πλέγματα που απαιτούν πολλούς υπολογιστικούς πόρους και κατ' επέκταση μεγαλύτερο υπολογιστικό χρόνο.

Η διαδικασία κατασκευής μη δομημένων πλεγμάτων είναι σε μεγάλο βαθμό αυτοματοποιημένη, επομένως ακόμα και χρήστες με μικρή εμπειρία στα CFD λογισμικά μπορούν να παράγουν μη δομημένα πλέγματα σε σχετικά μικρό χρόνο. Αντιθέτως, στα δομημένα πλέγματα ο ρόλος του χρήστη του CFD λογισμικού είναι πιο ενεργός και χρειάζεται περισσότερος χρόνος για τη δημιουργία τους.



Σχήμα 2.3: Δομημένο και μη δομημένο 3D πλέγμα σε τομή.

2.4 Μέθοδοι προσομοίωσης τυρβώδους ροής

Στις τυρβώδεις ροές εμφανίζεται ένα ευρύ φάσμα χωρικών και χρονικών κλιμάκων. Πιο συγκεκριμένα, η βασική δομή της τύρβης αποτελείται από δίνες διαφόρων μεγεθών και διάρκειας, οι οποίες αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους και ανταλλάσσουν ενέργεια. Οι

μεγαλύτερες δίνες, οι οποίες μεταφέρουν το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής ενέργειας του συστήματος, έχουν την τάση να διασπώνται σε μικρότερες. Έτσι μεταβαίνοντας σταδιακά από τις μακροκλίμακες στις μικροκλίμακες χάνεται ενέργεια από το σύστημα. Η διάσπαση συνεχίζεται μέχρι την δημιουργία πολύ μικρών δινών που δεν μπορούν να διασπαστούν περαιτέρω. Οι μικρότερες κλίμακες τυρβώδους ροής λέγονται κλίμακες ή μήκη Kolmogorov και χαρακτηρίζουν τις μικρότερες δίνες της τύρβης, όπου η τυρβώδης κινητική ενέργεια εκφυλίζεται σε θερμότητα μέσω της δράσης του ιξώδους.

Η επίλυση ενός προβλήματος ροής με CFD μεθόδους προϋποθέτει την κατασκευή του πλέγματος του πεδίου ροής, το οποίο θα έπρεπε θεωρητικά να είναι τόσο πυκνό όσο και η μικρότερη διαταραχή που δημιουργείται στη ροή. Στην πράξη κάτι τέτοιο είναι αδύνατο ακόμα και για τους σύγχρονους υπερυπολογιστές και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται μέθοδοι προσομοίωσης της τύρβης. Υπάρχουν τρεις επικρατούσες μεθοδολογίες προσομοίωσης της τυρβώδους ροής, η άμεση αριθμητική μοντελοποίηση (**Direct Numerical Simulation – DNS**), η κατά Reynolds ολοκλήρωση των εξισώσεων Navier – Stokes (**Reynolds-Averaged Navier-Stokes – RANS**) και η μοντελοποίηση μεγάλων δινών (**Large Eddy Simulation – LES**). Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε κατηγορίας.

2.4.1 Άμεση αριθμητική μοντελοποίηση (DNS)

Στην μέθοδο DNS οι εξισώσεις ροής επιλύονται απευθείας από τις αριθμητικές μεθόδους. Η εφαρμογή της μεθόδου απαιτεί ένα εξαιρετικά πυκνό υπολογιστικό πλέγμα, καθώς και πολύ μικρό χρονικό βήμα, επομένως η DNS είναι κατάλληλη μόνο για την μελέτη πολύ μικρών κλίμακων, της τάξης των $10^{-3} m$. Έτσι, αν και η προσέγγιση του ροϊκού πεδίου μέσω αυτής είναι η καλύτερη δυνατή, η εφαρμογή της περιορίζεται σε προβλήματα όπου μελετάται η φύση των πραγμάτων.

2.4.2 Κατά Reynolds ολοκλήρωση των εξισώσεων Navier-Stokes (RANS)

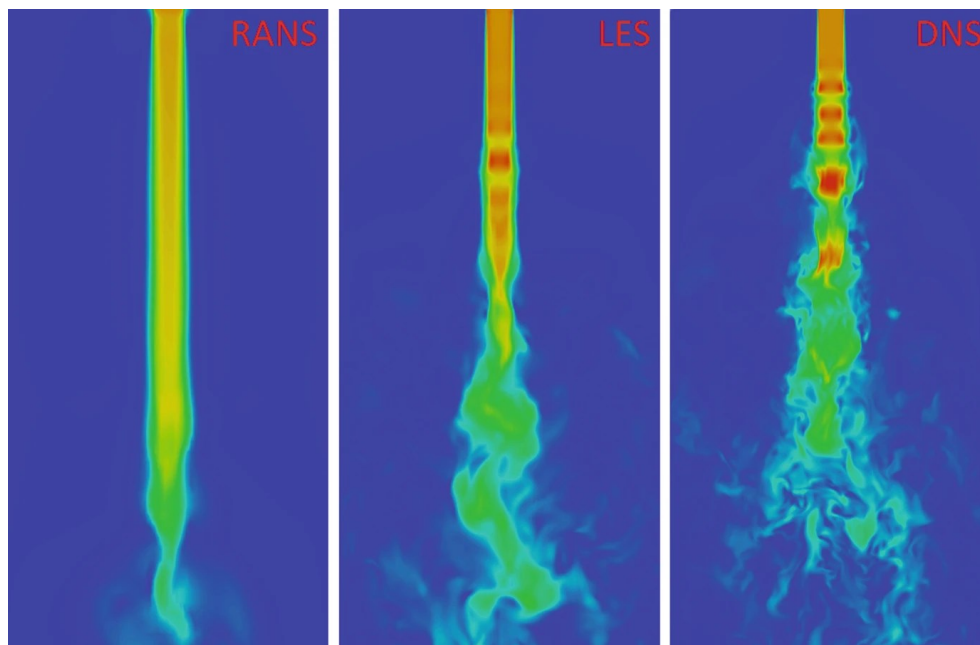
Στη μέθοδο RANS οι εξισώσεις ροής μετατρέπονται μέσω μιας μαθηματικής διαδικασίας σε μέσες χρονικές εξισώσεις ροής. Πιο συγκεκριμένα, τα βασικά μεγέθη του πεδίου ροής αποσυντίθενται σε δύο μέρη: στη μέση τιμή τους, που είναι ανεξάρτητη του χρόνου και στην διακύμανση τους, που είναι χρονικά μεταβαλλόμενη. Τα μεγέθη στις εξισώσεις Navier-Stokes αντικαθίστανται από τη μέση τιμή και την διακύμανσή τους και στη συνέχεια ολοκληρώνονται ως προς τον χρόνο. Η διαδικασία έχει σαν αποτέλεσμα στις εξισώσεις RANS που προκύπτουν να περιλαμβάνονται επιπλέον όροι, οι οποίοι λέγονται τάσεις Reynolds (Reynolds stresses). Στη μέθοδο RANS οι μέσες τιμές των μεγεθών

υπολογίζονται αριθμητικά, ενώ οι τάσεις Reynolds προσομοιώνονται μέσω μοντέλων τύρβης.

2.4.3 Μοντελοποίηση μεγάλων δινών (LES)

Η μέθοδος LES βασίζεται στη διάκριση μεταξύ μεγάλων και μικρών δινών της τυρβώδους ροής. Οι μεγάλες δίνες περιέχουν το μεγαλύτερο μέρος της κινητικής ενέργειας του συστήματος (~ 80%) και είναι υπεύθυνες για τις περισσότερες διεργασίες διάχυσης που περιλαμβάνουν μάζα ορμή και ενέργεια, ενώ καθορίζονται από τη γεωμετρία του πεδίου ροής και τις οριακές συνθήκες. Οι μικρές δίνες, για μεγάλους αριθμούς Reynolds είναι στατιστικά ισότροπες, επομένως πιο ανεξάρτητες από τις οριακές συνθήκες και την μέση ταχύτητα ροής από ότι οι μεγάλες [38].

Στη μέθοδο LES οι εξισώσεις ροής φιλτράρονται μέσω μιας μαθηματικής διαδικασίας, ώστε δίνες που είναι πολύ μικρότερες από το υπολογιστικό κελί του πλέγματος να εξαιρούνται. Η λογική της μεθόδου είναι πως το φιλτράρισμα των μικρότερων δινών μειώνει το σφάλμα που εισάγεται στο μοντέλο τύρβης. Η διαδικασία φιλτραρίσματος έχει σαν αποτέλεσμα οι εξισώσεις ροής να γίνονται πιο περίπλοκες, αποκτώντας επιπλέον όρους που εκφράζουν την επίδραση των μικρών δινών, που φιλτραρίστηκαν, στις μεγάλες. Οι μεγάλες δίνες υπολογίζονται απευθείας από τις εξισώσεις Navier-Stokes, ενώ οι μικρές μοντελοποιούνται μέσω κλασικών μοντέλων τύρβης.



Σχήμα 2.4: Κατανομή ταχύτητας για τυρβώδες ρεύμα αέρα με τις μεθόδους RANS, LES και DNS / Πηγή εικόνας: [38], σελ. 199.

Οι μέθοδοι LES και RANS επιτρέπουν την επίλυση προβλημάτων σε μεγάλες κλίμακες και είναι οι επικρατέστερες για την προσομοίωση ροής σε κτίρια. Ανάμεσα στις δύο, η LES θεωρείται ακριβέστερη, με πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, που αναπαριστούν τι μεταβολές συμβαίνουν σε κάθε χρονικό βήμα της ροής. Στις εφαρμογές μηχανικού ωστόσο, συνήθως έχει μεγαλύτερο ενδιαφέρον η μέση κατάσταση και όχι τόσο το τι συμβαίνει σε κάθε χρονικό βήμα. Επιπλέον, η LES είναι γενικά πιο περίπλοκη και απαιτεί μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ από την RANS. Έτσι, αν και τις τελευταίες δεκαετίες η πεποίθηση ήταν πως η LES θα αντικαθιστούσε πλήρως την RANS, κάτι τέτοιο δεν συνέβη και η μέθοδος RANS είναι σήμερα η πιο διαδεδομένη μέθοδος για την προσομοίωση της τύρβης [39].

2.5 Γενικοί επιλύτες

Οι επιλύτες που διαθέτουν τα λογισμικά CFD μπορεί να βασίζονται στην πίεση (**pressure - based**) ή στην πυκνότητα (**density - based**). Αρχικά οι επιλύτες πίεσης δημιουργήθηκαν για να αντιμετωπίσουν προβλήματα ασυμπίεστης ροής με χαμηλές ταχύτητες, ενώ οι επιλύτες πυκνότητας για προβλήματα συμπιεστής ροής με υψηλές ταχύτητες. Σήμερα και οι δύο τύποι επιλυτών έχουν επεκταθεί ώστε να μπορούν να αντιμετωπίσουν αποτελεσματικά ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων, υπάρχουν ωστόσο ακόμη ροϊκά πεδία που η μια μέθοδος θεωρείται επικρατέστερη της άλλης, με την έννοια πως αποτυπώνει καλύτερα τα χαρακτηριστικά της ροής ή πως επιλύει το πρόβλημα σε πιο σύντομο χρονικό διάστημα.

Η επίλυση του πεδίου της ταχύτητας γίνεται και στους δύο επιλύτες από τις εξισώσεις ορμής, ο τρόπος υπολογισμού του πεδίου των πιέσεων ωστόσο διαφέρει. Οι επιλύτες πυκνότητας χρησιμοποιούνται κυρίως για συμπιεστές ροές, όπου η πυκνότητα είναι μεταβαλλόμενη και εξαρτάται από την πίεση. Σε αυτούς το πεδίο πυκνότητας υπολογίζεται από την εξίσωση συνέχειας και στη συνέχεια το πεδίο πίεσης υπολογίζεται από την καταστατική εξίσωση.

Οι επιλύτες πίεσης χρησιμοποιούνται κυρίως για ασυμπίεστες ροές, όπου η πυκνότητα είναι σταθερή και δεν εξαρτάται από την πίεση. Εδώ αξιοποιούνται **αλγόριθμοι σύζευξης πίεσης και ταχύτητας (pressure-velocity coupling)** ώστε να προκύψει μια εξίσωση για την πίεση (ή τη διόρθωση πίεσης). Η εξίσωση πίεσης προκύπτει από τις εξισώσεις συνέχειας και ορμής με τρόπο τέτοιο ώστε το πεδίο ταχυτήτων διορθωμένο από την πίεση να ικανοποιεί την εξίσωση συνέχειας. Υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι σύζευξης πίεσης και ταχύτητας, όπως οι SIMPLE, SIMPLEC, PISO, Coupled κλπ.. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής χρησιμοποιήθηκαν οι αλγόριθμοι **SIMPLE** και **PISO**.

Ο αλγόριθμος **SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)** χρησιμοποιείται για την προσομοίωση μόνιμων ροών [40]. Η διαδικασία επίλυσης ξεκινά από τις διακριτές εξισώσεις ορμής και την διακριτή εξίσωση συνέχειας, η οποία λειτουργεί σαν περιορισμός, από τις οποίες εξάγεται μια εξίσωση Poisson για την πίεση. Η λειτουργία του αλγορίθμου προϋποθέτει αρχικά την θεώρηση ενός υποθετικού πεδίου πίεσης $p_0 = p^*$. Στη συνέχεια, επιλύεται η διακριτή εξίσωση ορμής, χρησιμοποιώντας το υποθετικό πεδίο πίεσης p^* , και προκύπτουν έτσι οι συνιστώσες της ταχύτητας u^* , v^* και w^* . Επειδή το αρχικό πεδίο πίεσης είναι υποθετικό, το πεδίο ταχύτητας που προκύπτει από αυτό το βήμα ικανοποιεί μεν την εξίσωση ορμής, όχι όμως κατ' ανάγκη και την εξίσωση συνέχειας (περιορισμός). Στη συνέχεια, επιλύεται η εξίσωση Poisson για την πίεση, από την οποία προκύπτει μια διόρθωση πίεσης p' , στην οποία αντιστοιχούν διορθώσεις ταχύτητας u' , v' και w' . Το ορθό πεδίο πίεσης είναι το άθροισμα του αρχικού υποθετικού πεδίου πίεσης p^* και της διόρθωσης πίεσης p' , επομένως $p = p^* + p'$. Αντίστοιχα, για τις συνιστώσες της ταχύτητας ισχύει $u = u^* + u'$, $v = v^* + v'$ και $w = w^* + w'$. Οι διορθωμένες ταχύτητες που προκύπτουν από αυτό το βήμα ικανοποιούν τώρα την εξίσωση συνέχειας, όχι όμως κατ' ανάγκη και τις εξισώσεις ορμής. Έτσι, στην περίπτωση που οι εξισώσεις ορμής δεν ικανοποιούνται, ο αλγόριθμος επαναλαμβάνει τη διαδικασία θέτοντας $p_0 = p$ μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση της λύσης. Στο **Σχήμα 2.5** παρουσιάζεται ένα διάγραμμα ροής που περιγράφει σχηματικά τα βήματα του αλγορίθμου SIMPLE.

Για τις χρονικά μεταβαλλόμενες ροές χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος **PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators)**, ο οποίος ανήκει στην οικογένεια των αλγορίθμων SIMPLE και επαναλαμβάνει την διαδικασία επίλυσης της εξίσωσης διόρθωσης πίεσης εντός ενός οριζόμενου από τον χρήστη χρονικού βήματος [40]. Ο αλγόριθμος PISO έχει καλύτερο βαθμό προσέγγισης των σχέσεων διόρθωσης πίεσης και ταχύτητας. Παράλληλα, εκτελεί δύο επιπλέον διορθώσεις, την διόρθωση γειτονικού κελιού και την διόρθωση λοξότητας, αντιμετωπίζοντας έτσι μια από τις αδυναμίες του αλγορίθμου SIMPLE: το γεγονός οι διορθωμένες ταχύτητες και οι αντίστοιχες ροές δεν ικανοποιούν πάντα την εξίσωση της διατήρησης της ορμής μετά την επίλυση της εξίσωσης διόρθωσης πίεσης, με αποτέλεσμα η διαδικασία επίλυσης να απαιτεί περισσότερες επαναλήψεις.

Στον αλγόριθμο PISO, όπως και στον SIMPLE, η διαδικασία επίλυσης ξεκινά από τις διακριτές εξισώσεις ορμής και την διακριτή εξίσωση συνέχειας, η οποία λειτουργεί σαν περιορισμός, από τις οποίες εξάγεται μια εξίσωση Poisson για την πίεση. Την χρονική στιγμή t_n θεωρείται το υποθετικό πεδίο πίεσης $p_0 = p^*$, και βάση αυτού επιλύεται η διακριτή εξίσωση ορμής, οπότε προκύπτουν έτσι οι συνιστώσες της ταχύτητας u^* , v^* και w^* . Επειδή

το αρχικό πεδίο πίεσης είναι υποθετικό, το πεδίο ταχύτητας που προκύπτει από αυτό το βήμα ικανοποιεί μεν την εξίσωση ορμής, όχι όμως κατ' ανάγκη και την εξίσωση συνέχειας (περιορισμός). Επιλύεται έτσι η εξίσωση διόρθωσης πίεσης, από την οποία προκύπτει μια διόρθωση πίεσης p' , στην οποία αντιστοιχούν διορθώσεις ταχύτητας u' , v' και w' . Το ορθό πεδίο πίεσης είναι το άθροισμα του αρχικού υποθετικού πεδίου πίεσης p^* και της διόρθωσης πίεσης p' , επομένως $p^{**} = p^* + p'$. Αντίστοιχα, για τις συνιστώσες της ταχύτητας ισχύει $u^{**} = u^* + u'$, $v^{**} = v^* + v'$ και $w^{**} = w^* + w'$.

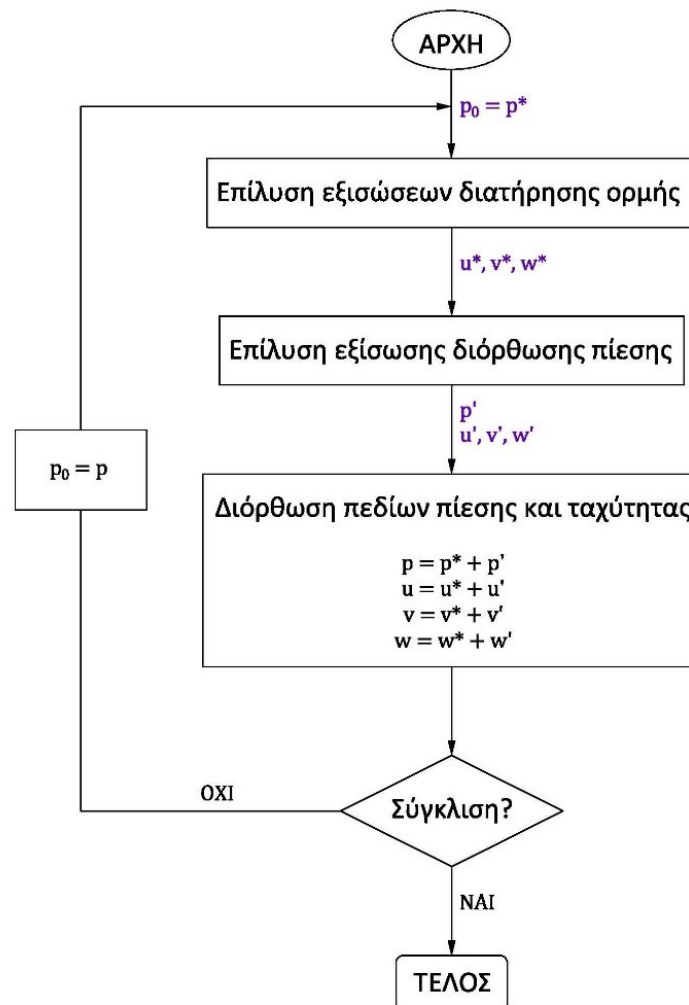
Οι διορθωμένες ταχύτητες u^{**} , v^{**} και w^{**} ικανοποιούν την εξίσωση συνέχειας, όχι όμως κατ' ανάγκη και τις εξισώσεις ορμής, αφού το αρχικό πεδίο πίεσης ήταν υποθετικό. Στο σημείο αυτό, ο αλγόριθμος PISO αντί να επαναλάβει την διαδικασία με την διορθωμένη πίεση, όπως συμβαίνει στον SIMPLE, επιλύει για δεύτερη φορά την εξίσωση διόρθωσης πίεσης, χρησιμοποιώντας τις ταχύτητες u^{**} , v^{**} και w^{**} . Από την επίλυση αυτή προκύπτει μια δεύτερη διόρθωση για την πίεση p'' , στην οποία αντιστοιχούν οι δεύτερες διορθώσεις ταχύτητας u'' , v'' και w'' . Το ορθό πεδίο πίεσης είναι τώρα το άθροισμα της πρώτης διορθωμένης πίεσης p^{**} και της δεύτερης διόρθωσης πίεσης p'' , επομένως $p = p^{**} + p''$. Αντίστοιχα για την διόρθωση της ταχύτητας ισχύει $u = u^{**} + u''$, $v = v^{**} + v''$ και $w = w^{**} + w''$.

Οι ταχύτητες που προκύπτουν από τη δεύτερη διόρθωση ικανοποιούν την εξίσωση συνέχειας και πλέον ικανοποιούν και τις εξισώσεις ορμής. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος ελέγχει αν τα κριτήρια σύγκλισης ικανοποιούνται και αν κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει επαναλαμβάνει την διαδικασία θέτοντας $p_0 = p$. Όταν η λύση συγκλίνει, η διαδικασία επαναλαμβάνεται για την χρονική στιγμή $t_{n+1} = t_n + \Delta t$, όπου Δt είναι το χρονικό βήμα που ορίζεται από τον χρήστη. Στο **Σχήμα 2.6** παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής που περιγράφει σχηματικά τα βήματα του αλγόριθμου PISO.

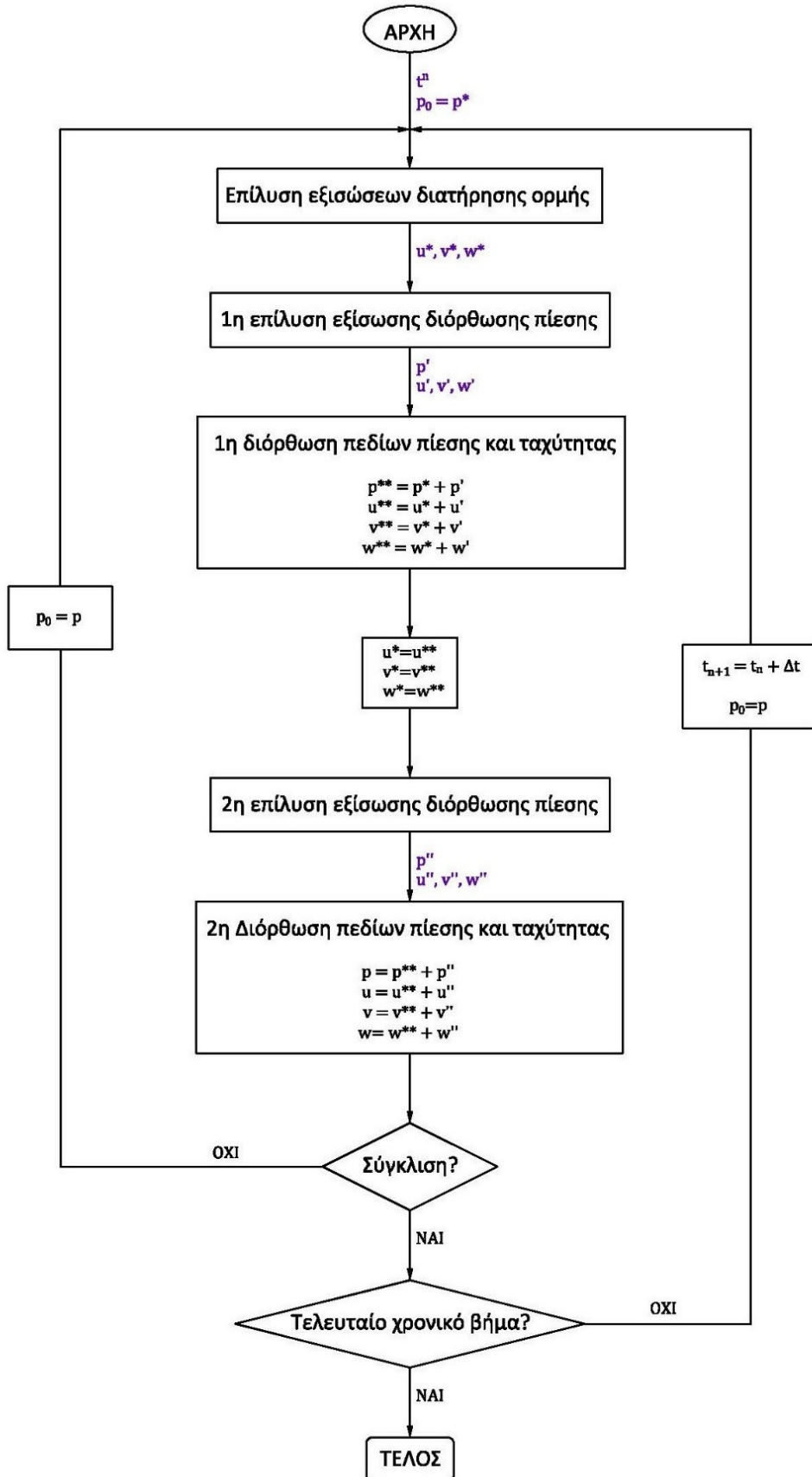
Σύγκλιση της λύσης συνεπάγεται πως σε ολόκληρο το πεδίο ροής, αλλά και σε κάθε κελί του πλέγματος ξεχωριστά ικανοποιείται η ολοκληρωτική διατήρηση της μάζας, της ορμής και της ενέργειας. Για να επιτευχθεί αυτό, οι επιλύτες επιλύουν το σύστημα των εξισώσεων ροής επαναληπτικά. Ανάμεσα σε δυο διαδοχικές επιλύσεις υπάρχουν διαφορές στις υπολογιζόμενες τιμές των εξαρτημένων μεταβλητών, τα υπόλοιπα (residuals). Καθώς οι επαναλήψεις συνεχίζονται, τα υπόλοιπα μειώνονται και οι υπολογιζόμενες τιμές μεταβάλλονται όλο και λιγότερο. Σε έναν ιδεατό υπολογιστή με άπειρη ακρίβεια, σύγκλιση της λύσης θα σήμαινε πως τα υπόλοιπα τείνουν στο μηδέν. Σε πραγματικό υπολογιστή,

σημαίνει πως ανάμεσα σε δύο διαδοχικές επαναλήψεις υπάρχουν πολύ μικρές μεταβολές στις εξαρτημένες μεταβλητές και τα υπόλοιπα τείνουν σε πολύ μικρές τιμές.

Ο χρήστης του CFD λογισμικού καθορίζει τα κριτήρια σύγκλισης ανάλογα με την φύση του προβλήματος και τον επιθυμητό βαθμό ακρίβειας. Στο λογισμικό ANSYS Fluent, για προσομοιώσεις μονής ακρίβειας τα υπόλοιπα μπορεί να φτάνουν μέχρι και 6 τάξεις μεγέθους, ενώ για προσομοιώσεις διπλής ακρίβειας ως και 12 τάξεις μεγέθους [40]. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται στον καθορισμό των κριτηρίων σύγκλισης, αφού η απαίτηση υπερβολικά μεγάλου βαθμού ακρίβειας μπορεί να αυξήσει σημαντικά τον αριθμό των επαναλήψεων, καθυστερώντας ή και αποτρέποντας τη σύγκλιση, χωρίς κάτι τέτοιο να είναι απαραίτητο, σε σχέση πάντα με τη φύση του προβλήματος. Οι επαναληπτικές επιλύσεις συνεχίζονται μέχρι την ικανοποίηση των κριτηρίων σύγκλισης ή μέχρι να ολοκληρωθεί ο αριθμός επαναλήψεων που έχει ορίσει ο χρήστης του CFD λογισμικού, ακόμα κι αν δεν έχει επιτευχθεί σύγκλιση.



Σχήμα 2.5: Διάγραμμα ροής διαδικασιών αλγορίθμου SIMPLE για προβλήματα μόνιμης ροής.



Σχήμα 2.6: Διάγραμμα ροής διαδικασιών αλγορίθμου PISO για προβλήματα χρονικά μεταβαλλόμενης ροής

3 Μεθοδολογία

Κύριος σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εκτίμηση της διάχυσης δύο χημικών παραγόντων, ενός ελαφρύτερου και ενός βαρύτερου του αέρα, σε χώρους όπου οι χρήστες τους δεν είναι εξοικειωμένοι με την παρουσία χημικών παραγόντων και κατά συνέπεια δεν είναι προετοιμασμένοι να εφαρμόσουν μέτρα έκτακτης ανάγκης. Για τον σκοπό αυτό επιλέχθηκαν δύο χημικοί παράγοντες, η αμμωνία (NH_3) και το φωσγένιο (Cl_2CO), για καθένα από τους οποίους μελετήθηκε ξεχωριστά η απελευθέρωση και η διασπορά τους, κάτω από την επίδραση του φυσικού αερισμού, σε δύο διαφορετικούς εσωτερικούς χώρους: σε ένα τυπικό χώρο γραφείου και στην αίθουσα εκδηλώσεων «Γεώργιος Μυλωνάς», τον κύριο χώρο εκδηλώσεων του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Το ενδιαφέρον της μελέτης εστιάζεται κυρίως στην αίθουσα εκδηλώσεων «Γεώργιος Μυλωνάς». Οι αίθουσες εκδηλώσεων ανήκουν στους χώρους συνάθροισης κοινού που παρουσιάζουν αρκετές κοινές προδιαγραφές ως προς τον σχεδιασμό τους (ύψος, συστήματα εξαερισμού, οδούσεις διαφυγής κλπ.), επομένως τα συμπεράσματα που προκύπτουν μπορούν να αποκτήσουν ένα γενικευμένο χαρακτήρα. Ωστόσο, οι περιορισμένοι διαθέσιμοι υπολογιστικοί πόροι, οδήγησαν στην επιλογή να εξεταστεί αρχικά η διασπορά των χημικών παραγόντων μέσα σε ένα μικρότερου μεγέθους εσωτερικό χώρο, με παρόμοια χαρακτηριστικά (θέση της πηγής, κυκλοφορία του εσωτερικού αέρα κλπ.) και οι ρυθμίσεις που εφαρμόστηκαν σε αυτόν, να μπορούν στη συνέχεια να εφαρμοστούν και στον αρκετά μεγαλύτερο χώρο της αίθουσας εκδηλώσεων.

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της απελευθέρωσης και διασποράς των δύο χημικών παραγόντων ξεχωριστά, σε καθένα από τους δύο εξεταζόμενους χώρους. Σε ακολουθία με τα όσα αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2 σχετικά με την εφαρμογή των μεθόδων CFD, η μεθοδολογία για κάθε περίπτωση περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

- ✓ Δημιουργία της γεωμετρίας του πεδίου ροής
- ✓ Χωρική διακριτοποίηση του πεδίου ροής
- ✓ Καθορισμός οριακών συνθηκών του προβλήματος
- ✓ Καθορισμός λοιπών παραμέτρων του προβλήματος (επιλύτες, μοντέλο προσομοίωσης τύρβης κλπ.).

Μεθοδολογία

3.1 Οι Χώροι μελέτης

3.1.1 Ο χώρος γραφείου

Ο εξεταζόμενος χώρος γραφείου έχει συνολικό εμβαδόν 26.00m² και ύψος 3.00m (V=78.00 m³). Στην νότια πλευρά του υπάρχει πόρτα διαστάσεων 1.00m×2.20m (F=2.20m²) και στο μέσο του βόρειου τοίχου του, παράθυρο διαστάσεων 1.50m×1.00m (F=1.50m²). Μέσω των δύο αυτών ανοιγμάτων επιτυγχάνεται ο φυσικός αερισμός του χώρου. Το γραφείο διαθέτει επίσης σύστημα HVAC με μια επιτοίχια υποδοχή στην δυτική πλευρά. Τα βασικά χαρακτηριστικά του χώρου γραφείου συνοψίζονται στον **Πίνακα 3.1**, ενώ η κάτοψη του παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.1**.

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά χώρου γραφείου

Χώρος γραφείου			
Εμβαδόν (F)	26.00 m ²		
Ύψος (H)	3.00 m		
Όγκος (V)	78.00 m ³		
Ανοιγματα			
Είδος	Αριθμός	Εμβαδόν	Προσανατολισμός
πόρτες	1	2.20 m ²	Νότιος
παράθυρα	1	1.50 m ²	Βόρειος
Σύστημα εξαερισμού			
Θέση υποδοχών	Αριθμός υποδοχών	Εμβαδόν υποδοχών (καθαρό)	Προσανατολισμός
τοίχος	1	0,04 m ²	Δυτικός
οροφή	-	-	-

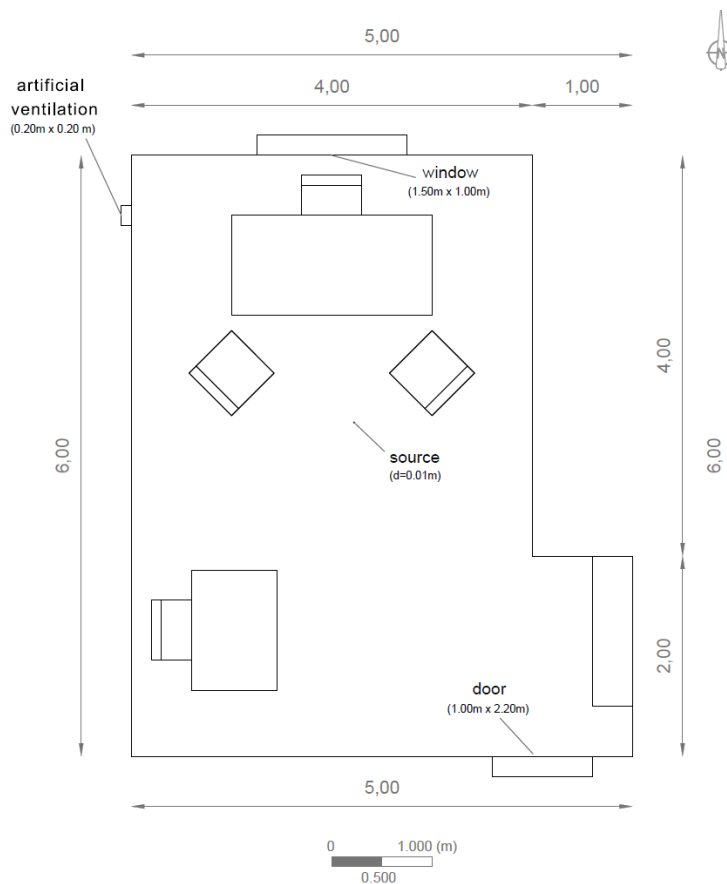
3.1.2 Η αίθουσα εκδηλώσεων «Μυλωνάς»

Η αίθουσα εκδηλώσεων «Γεώργιος Μυλωνάς» αποτελεί τον κύριο χώρο εκδηλώσεων του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων. Έχει επιφάνεια 548.00 m², είναι κατασκευασμένη σε ένα επίπεδο και το ύψος της είναι εσωτερικά 6.60 m (V=3616.80 m³). Η πρόσβαση σε αυτή γίνεται μέσω των τριών εισόδων – εξόδων που διαθέτει στην νότια πλευρά της, διαστάσεων 2.20x2.15m (F=3x4.73m²), ενώ υπάρχει και μία έξοδος κινδύνου στην δυτική πλευρά με διαστάσεις 1.80x2.15m (F=3.78m²). Επιπλέον, διαθέτει εκτεταμένα σταθερά και ανοιγόμενα υαλοστάσια, που οδηγούν στον υπαίθριο περιβάλλοντα χώρο της, στην βόρεια πλευρά της. Τα ανοιγόμενα υαλοστάσια, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν σαν έξοδοι για το ρεύμα αέρα στην παρούσα μελέτη είναι δύο, με διαστάσεις 3.35x2.20 m το καθένα (F=2x7.37m²). Μέσω των θυρών στην νότια πλευρά και των ανοιγόμενων υαλοστασίων στην βόρεια επιτυγχάνεται ο φυσικός αερισμός του χώρου, ενώ η έξοδος κινδύνου στην δυτική πλευρά θεωρείται πως

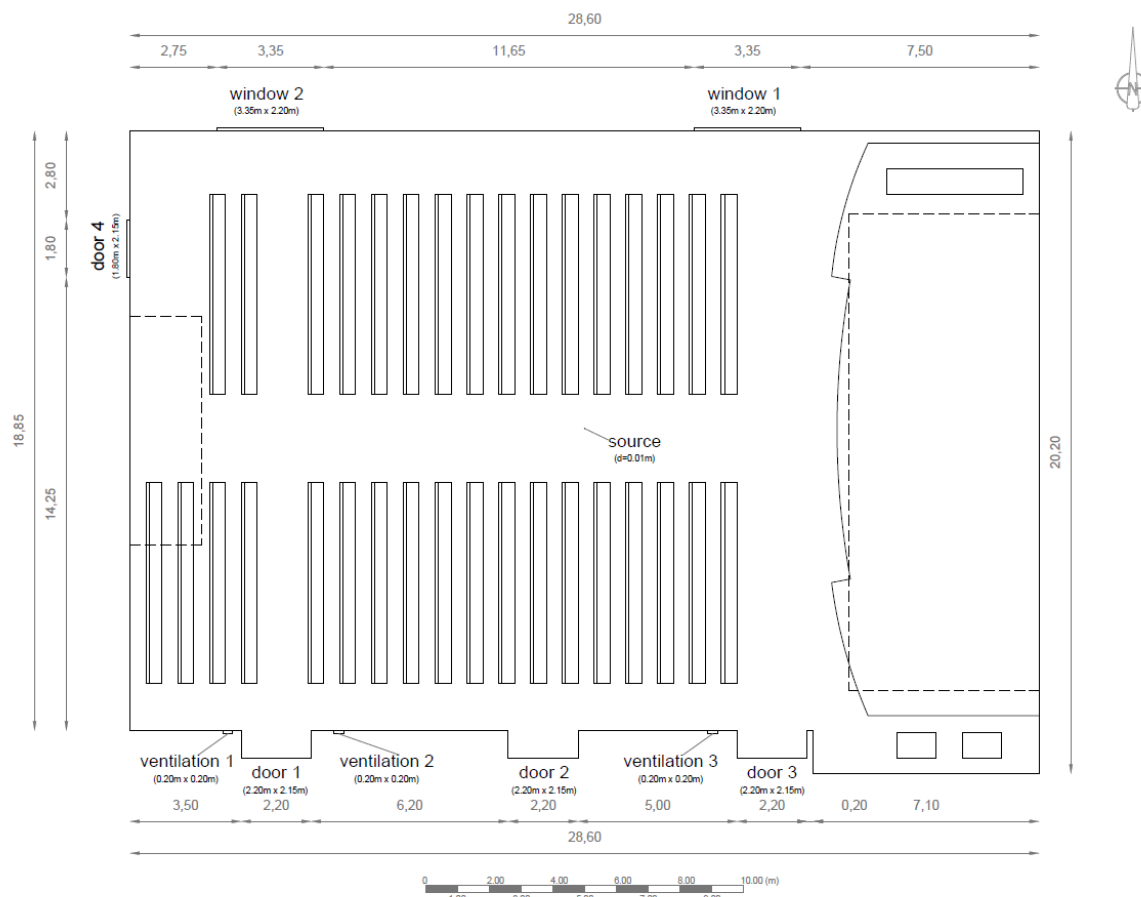
μένει κλειστή. Τέλος, η αίθουσα διαθέτει σύστημα HVAC με τρεις εισόδους-εξόδους του αέρα στον νότιο τοίχο της. Τα βασικά χαρακτηριστικά της αίθουσας εκδηλώσεων «Μυλωνάς» συνοψίζονται στον **Πίνακα 3.2**, ενώ η κάτοψη του παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.2**.

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά της αίθουσας εκδηλώσεων "Γεώργιος Μυλωνάς"

Αίθουσα εκδηλώσεων «Γεώργιος Μυλωνάς»			
Εμβαδόν (F)	548.00 m ²		
Ύψος (H)	6.60 m		
Όγκος (V)	3616.80 m ³		
Ανοίγματα			
Είδος	Αριθμός	Εμβαδόν	Προσανατολισμός
πόρτες	3	3 x 4.73 m ²	Νότιος
πόρτες	1	3.87 m ²	Δυτικός
παράθυρα	2	2 x 7.37 m ²	Βόρειος
Σύστημα εξαερισμού			
Θέση υποδοχών	Αριθμός υποδοχών	Εμβαδόν υποδοχών (καθαρό)	Προσανατολισμός
τοίχος	3	3 x 0,04 m ²	Νότιος
οροφή	-	-	-



Σχήμα 3.1: Κάτοψη χώρου γραφείου.



Σχήμα 3.2: Κάτοψη αίθουσας εκδηλώσεων «Γεώργιος Μυλωνάς».

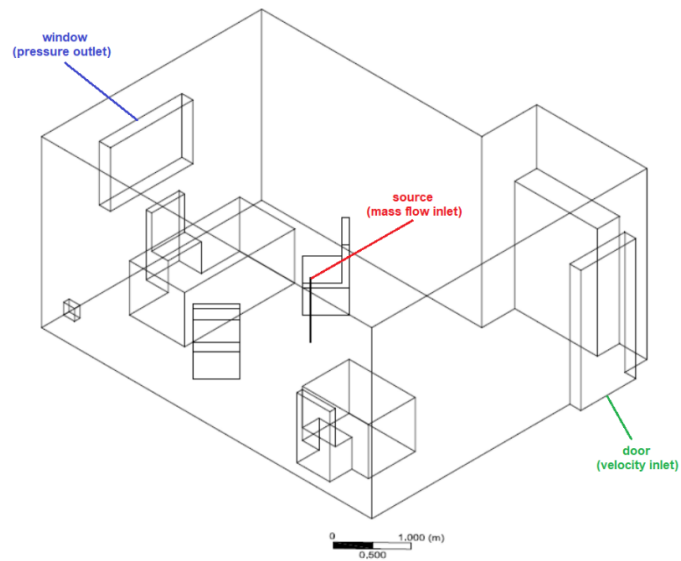
3.2 Γεωμετρικά μοντέλα των πεδίων ροής

Για καθένα από τους δύο εξεταζόμενους χώρους, κατασκευάστηκε το τριδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο του, χρησιμοποιώντας ένα εξωτερικό Computer Aided Design (CAD) λογισμικό, βάση των πραγματικών του διαστάσεων, σε κλίμακα 1:1. Για τις ανάγκες της μελέτης, μία πηγή κυκλικής διατομής, με διάμετρο $D=0.01\text{m}$ τοποθετήθηκε στο κέντρο κάθε χώρου, με την θέση της κατά τον άξονα ύψους z να βρίσκεται και στις δύο περιπτώσεις 1.00m πάνω από το επίπεδο του εδάφους (Above Ground Level – AGL).

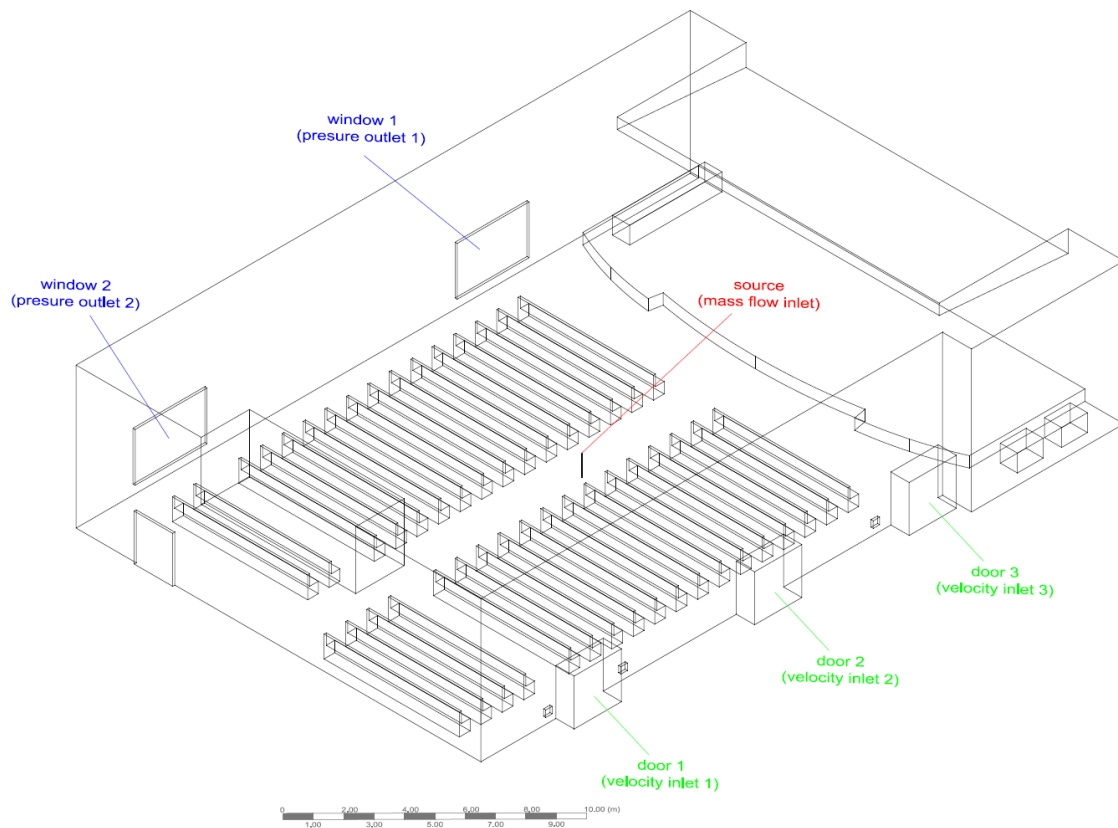
Στα τριδιάστατα μοντέλα συμπεριλήφθηκαν απλοποιημένες εκδοχές του εξοπλισμού των δύο χώρων, καθώς και οποιοδήποτε άλλο στοιχείο θα μπορούσε να αποτελέσει εμπόδιο στην κίνηση των χημικών παραγόντων. Το τριδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο του γραφείου παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.3** και αυτό της αίθουσας εκδηλώσεων «Γεώργιος Μυλωνάς» στο **Σχήμα 3.4**.

Τα δύο 3D μοντέλα αναπαριστούν τον περιβάλλοντα αέρα κάθε χώρου. Για αυτά, έγινε εξαγωγή τους (export) από το λογισμικό CAD ως IGES αρχεία (Initial Graphics Exchange

Specification), μορφή με την οποία στη συνέχεια εισήχθησαν ως γεωμετρία στο CFD λογισμικό και ορίστηκαν ως ρευστά.



Σχήμα 3.3: 3D γεωμετρικό μοντέλο του χώρου γραφείου.



Σχήμα 3.4: 3D γεωμετρικό μοντέλο της αίθουσας εκδηλώσεων "Γεώργιος Μυλωνάς".

3.3 Υπολογιστικά πλέγματα των πεδίων ροής

Μετά την δημιουργία του 3D γεωμετρικού μοντέλου κάθε πεδίου ροής, ακολούθησε η δημιουργία του 3D υπολογιστικού πλέγματός του. Για την δημιουργία του πλέγματος, καθώς και των προσομοιώσεων που ακολούθησαν χρησιμοποιήθηκε το CFD λογισμικό ANSYS Fluent, Έκδοση 14.0 (ANSYS Inc., Canonsburg, Pennsylvania, USA <https://www.ansys.com>).

Για τα δύο εξεταζόμενα πεδία ροής έγινε χωρική διακριτοποίηση με δομημένο πλέγμα (structured grid). Οι περιοχές γύρω από την πηγή, τις εισόδους και τις εξόδους των ρευμάτων αέρα, καθώς και οι ακμές των χώρων και των στοιχείων εξοπλισμού τους θεωρήθηκαν περιοχές αυξημένου ενδιαφέροντος, αφού εκεί οι συγκεντρώσεις των χημικών παραγόντων ή/και οι εγκάρσιες μεταβολές της ταχύτητας είναι μεγαλύτερες [41]. Το δομημένο πλέγμα δίνει στον χρήστη του CFD λογισμικού την δυνατότητα πύκνωσής του σε περιοχές αυξημένου ενδιαφέροντος, σε αντίθεση με το μη δομημένο πλέγμα, όπου η πύκνωση εφαρμόζεται στο σύνολο του πλέγματος και όχι σε συγκεκριμένες περιοχές του (βλ. Ενότητα **2.3.2**). Για τον λόγο αυτό, επιλέχθηκε το δομημένο πλέγμα για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις, επιβλήθηκε στις περιοχές αυξημένου ενδιαφέροντος ένα συγκεκριμένο μέγεθος κελιού (element size) και το πλέγμα δημιουργήθηκε ξεκινώντας από το μέγεθος αυτό και ακολουθώντας έναν ορισμένο ρυθμό ανάπτυξης. Έτσι, το πλέγμα που προέκυψε για κάθε πεδίο ροής ήταν λεπτομερέστερο στις περιοχές ενδιαφέροντος σε σχέση με τον υπόλοιπο χώρο, έχοντας παράλληλα τις μικρότερες δυνατές απαιτήσεις σε υπολογιστικούς πόρους.

Κατάλληλο πλέγμα θεωρείται αυτό που οδηγεί σε λύση, η οποία δεν μεταβάλλεται σημαντικά περνώντας σε πυκνότερο πλέγμα (λύση ανεξάρτητη του πλέγματος). Για τον λόγο αυτό, για κάθε χώρο και για κάθε χημικό παράγοντα εξετάστηκε ένας αριθμός υπολογιστικών πλεγμάτων και στη συνέχεια επιλέχθηκε αυτό που θα εξασφάλιζε αξιοπιστία με την μικρότερη δυνατή απαίτηση σε υπολογιστικούς πόρους. Καθένα από τα εξεταζόμενα πλέγματα αποτελείται περίπου από τον διπλάσιο αριθμό κελιών συγκριτικά με το προηγούμενό του. Μεταξύ των ελεγχόμενων πλεγμάτων, μια απόκλιση της τάξης του 10% στα ελεγχόμενα μεγέθη θεωρήθηκε αποδεκτή.

Σε κάθε πλέγμα έγινε αρχικά προσομοίωση της ροής του ρεύματος αέρα, που εξυπηρετεί στον φυσικό αερισμό κάθε χώρου. Μετά από παρατήρηση στην αίθουσα εκδηλώσεων «Γεώργιος Μυλωνάς», προέκυψε το συμπέρασμα πως ο φυσικός αερισμός επιτυγχάνεται μέσω ενός νότιας διεύθυνσης ρεύματος αέρα, το οποίο εισέρχεται στον χώρο

από τις τρεις πόρτες στη νότια πλευρά και εξέρχεται από τα δύο ανοιγόμενα υαλοστάσια της βόρειας πλευράς. Αντίστοιχες συνθήκες εφαρμόστηκαν και για τον τυπικό χώρο γραφείου, όπου θεωρήθηκε πως νότια διεύθυνσης ρεύμα αέρα εισέρχεται στον χώρο από την νότια πόρτα και εξέρχεται από το βόρειο παράθυρο.

Στη συνέχεια, προσομοιώθηκε η μόνιμη ροή και διασπορά κάθε χημικού παράγοντα, ξεχωριστά σε κάθε πεδίο ροής και τα αποτελέσματα που αντιστοιχούν σε 100 επαναλήψεις συγκρίθηκαν μεταξύ τους. Η επιφάνεια του παραθύρου στον χώρο γραφείου και των δύο ανοιγόμενων υαλοστασίων στην αίθουσα εκδηλώσεων χρησιμοποιήθηκαν σαν επιφάνειες ελέγχου για τον ρυθμό ροής μάζας (mass flow rate), τη σταθμισμένη κατά επιφάνεια μέγιστη τιμή του μεγέθους της ταχύτητας (facet maximum of velocity magnitude) και τη σταθμισμένη κατά επιφάνεια μέγιστη τιμή του κλάσματος μάζας του κάθε χημικού παράγοντα (facet maximum of mass fraction). Επιπλέον, η σταθμισμένη κατά επιφάνεια μέγιστη τιμή του κλάσματος μάζας κάθε χημικού παράγοντα ελέγχθηκε σε δύο ακόμα επιφάνειες ελέγχου: δύο οριζόντια επίπεδα τοποθετημένα 1.20m και 1.80m AGL, τα οποία αντιπροσωπεύουν το εύρος της ζώνης αναπνοής. Τέλος, ελέγχθηκε η σταθμισμένη κατά όγκο μέση τιμή του κλάσματος μάζας των χημικών παραγόντων (volume-weighted mass fraction) σε κάθε πεδίο ροής.

Σημειώνεται πως οι οριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν για την προσομοίωση της ροής του ρεύματος αέρα και της μόνιμης ροής των χημικών παραγόντων, καθώς και όλες οι ρυθμίσεις που έγιναν για τον ορισμό των μοντέλων περιγράφονται αναλυτικότερα, στις Ενότητες **3.4**, **3.5** και **3.6**.

Ακολουθεί η περιγραφή των υπολογιστικών πλεγμάτων του κάθε πεδίου ροής, καθώς και των διακυμάνσεων των τεστ ανεξαρτησίας της λύσης (grid independence tests) που έγιναν για κάθε χημικό παράγοντα ώστε να επιλεγεί το καταλληλότερο από αυτά.

3.3.1 Υπολογιστικό πλέγμα του χώρου γραφείου

Για την επιλογή του κατάλληλου υπολογιστικού πλέγματος στον χώρο γραφείου εξετάστηκαν συνολικά τέσσερα δομημένα πλέγματα. Οι ρυθμοί ανάπτυξης που ορίστηκαν στην περίπτωση κάθε χημικού παράγοντα ήταν διαφορετικοί. Το μέγιστο επιτρεπόμενο μέγεθος κελιού και για τις δύο περιπτώσεις (αμμωνία και φωσγένιο) ήταν 0.25m, σε καμία περίπτωση όμως από τις δύο περιπτώσεις δεν δημιουργήθηκαν τόσο μεγάλα κελιά.

Μεθοδολογία

3.3.1.1 Η περίπτωση της αμμωνίας στο χώρο γραφείου

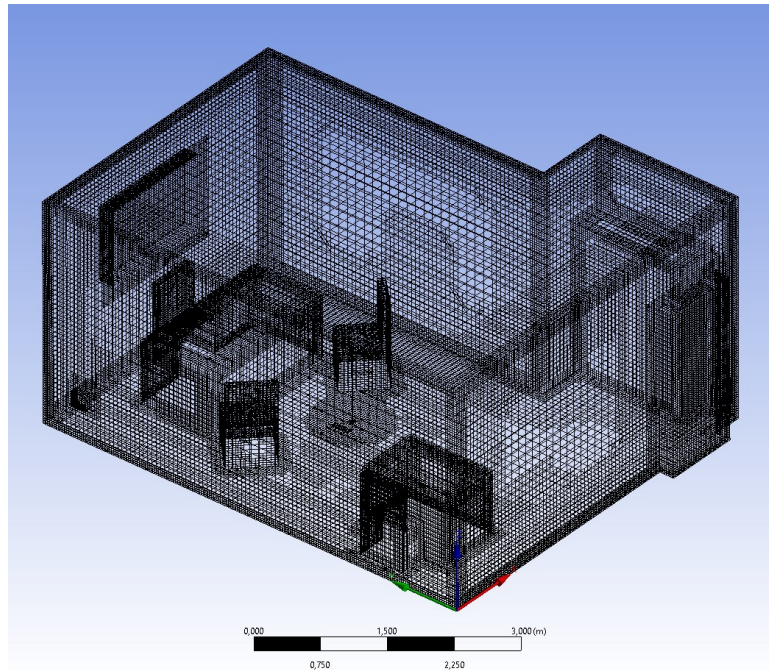
Ο ρυθμός ανάπτυξης που χρησιμοποιήθηκε για τα κελιά των εξεταζόμενων πλεγμάτων ήταν 1.10. Όλα τα εξεταζόμενα πλέγματα είχαν το ίδιο επιτρεπόμενο μέγιστο μέγεθος κελιού και τον ίδιο ρυθμό ανάπτυξης αλλά διαφορετικό επιβαλλόμενο μέγεθος κελιού στις περιοχές αυξημένου ενδιαφέροντος. Ο αριθμός κελιών και το επιβαλλόμενο μέγεθος κελιού στις περιοχές αυξημένου ενδιαφέροντος για κάθε πλέγμα παρουσιάζονται στην πρώτη και δεύτερη στήλη του **Πίνακας 3.3** αντίστοιχα.

Για την διενέργεια του τεστ ανεξαρτησίας της λύσης, έγινε σε καθένα από τα τέσσερα πλέγματα προσομοίωση σταθερής εκροής της αμμωνίας από την πηγή ροής μάζας στο κέντρο του χώρου, 1.00m AGL, με παροχή 100 mg/sec. Τα αποτελέσματα που αντιστοιχούν σε 100 επαναλήψεις συγκρίθηκαν μεταξύ τους και μια απόκλιση της τάξης του 10% θεωρήθηκε αποδεκτή.

Στον **Πίνακας 3.3** παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις των μεγεθών που ελέγχθηκαν κατά τον έλεγχο ανεξαρτησίας της λύσης για την περίπτωση της αμμωνίας. Βάσει αυτών και με δεδομένους τους διαθέσιμους υπολογιστικούς πόρους, επιλέχθηκε ως καταλληλότερο το πλέγμα των **545036 κελιών**, το οποίο παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.5**, ενώ τα βασικά του χαρακτηριστικά συνοψίζονται στον **Πίνακας 3.4**.

Πίνακας 3.3: Διακυμάνσεις του τεστ ανεξαρτησίας της λύσης στο χώρο γραφείου για την αμμωνία.

Grid independence test variations for the office domain - Ammonia (NH ₃)							
Structured grid							
Growth rate: 1,10							
Q = 0.0001 kg/sec							
Grid Elements	Element size	Mass flow rate on pressure outlet	Velocity Magnitude (Facet max on pressure outlet)	Mass fraction of NH ₃ (Facet max on pressure outlet)	Mass fraction of NH ₃ (Volume weighted average)	Mass fraction of NH ₃ (max) 1.20 m AGL	Mass fraction of NH ₃ (max) 1.80 m AGL
292312	0.0550	0.10%	2.87%	9.77%	10.08%	8.26%	9.73%
545036	0.0450						
1002279	0.0275	0.07%	0.71%	5.66%	5.27%	4.62%	5.43%
2046409	0.0175	0.01%	3.25%	5.39%	5.59%	3.91%	5.20%



Σχήμα 3.5: Υπολογιστικό πλέγμα του πεδίου ροής του χώρου γραφείου για την περίπτωση της αμμωνίας.

Πίνακας 3.4: Χαρακτηριστικά πλέγματος του πεδίου ροής του χώρου γραφείου, για την περίπτωση της αμμωνίας.

Mesh - NH3 (office domain)	
Grid	Structured
Growth rate	1.10
Elements	545036
Volume statistics	
Minimum element volume (m ³)	6.70 e-10
Maximum element volume (m ³)	2.40 e-03
Surface statistics	
Minimum element surface (m ²)	7.79 e-07
Maximum element surface (m ²)	1.96 e-02

3.3.1.2 Η περίπτωση του φωσγενίου στον χώρο γραφείου

Για την περίπτωση του φωσγενίου, στις περιοχές αυξημένου ενδιαφέροντος επιβλήθηκε μέγεθος κελιού όμοιο με αυτό της περίπτωσης της αμμωνίας, χρησιμοποιήθηκε όμως μικρότερος ρυθμός ανάπτυξης, δηλαδή 1.09. Ο αριθμός κελιών του κάθε εξεταζόμενου πλέγματος και το επιβαλλόμενο μέγεθος κελιού στα στοιχεία ενδιαφέροντος παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3.5**, στην πρώτη και δεύτερη στήλη αντίστοιχα.

Για τον έλεγχο της ανεξαρτησίας της λύσης από το πλέγμα, έγινε σε κάθε πλέγμα προσομοίωση σταθερής εκροής του φωσγενίου από την πηγή ροής μάζας στο κέντρο του χώρου, 1.00m AGL, με παροχή 10 mg/sec και τα αποτελέσματα που αντιστοιχούν σε 100

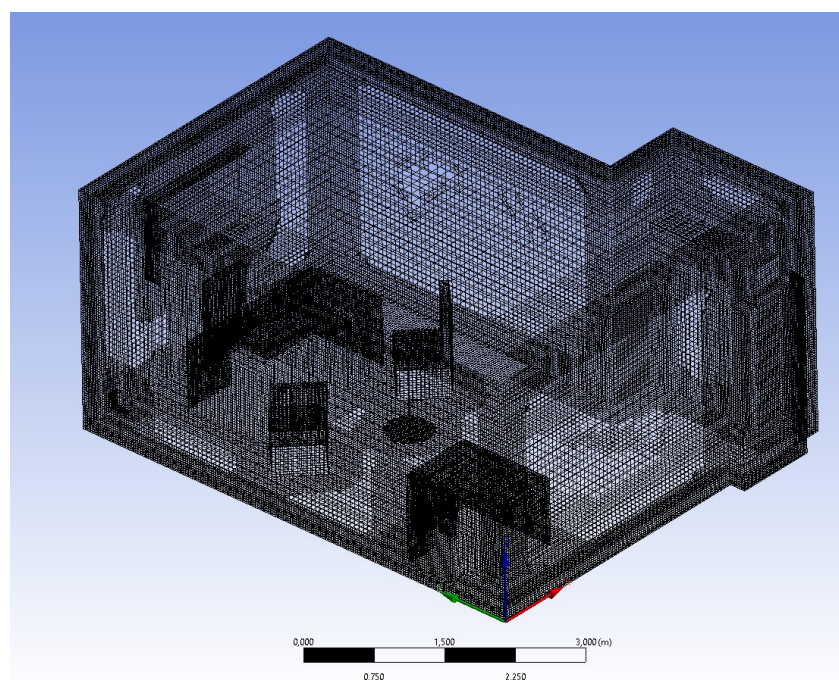
Μεθοδολογία

επαναλήψεις συγκρίθηκαν μεταξύ τους. Μεταξύ των ελεγχόμενων πλεγμάτων, μια απόκλιση της τάξης του 10% θεωρήθηκε αποδεκτή.

Στον **Πίνακα 3.5** παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις των μεγεθών που ελέγχθηκαν κατά τον έλεγχο ανεξαρτησίας της λύσης για την περίπτωση του φωσγενίου. Βάσει αυτών και των διαθέσιμων υπολογιστικών πόρων, επιλέχθηκε ως καταλληλότερο το πλέγμα του **1173727 κελιών**, το οποίο παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.6** και τα βασικά του χαρακτηριστικά συνοψίζονται στον **Πίνακα 3.6**.

Πίνακας 3.5: Διακυμάνσεις του τεστ ανεξαρτησίας της λύσης στον χώρο γραφείου για το φωσγένιο.

Grid independence test variations for the office domain - Phosgene (COCl ₂)							
Structured grid							
Growth rate: 1,09							
Q = 0.00001 kg/sec							
Grid Elements	Element size	Mass flow rate on pressure outlet	Velocity Magnitude (Facet max on pressure outlet)	Mass fraction of COCl ₂ (Facet max on pressure outlet)	Mass fraction of COCl ₂ (Volume weighted average)	Mass fraction of COCl ₂ (max) 1.20 m AGL	Mass fraction of COCl ₂ (max) 1.80 m AGL
292535	0.0550	0.02%	3.46%	47.12%	47.12%	55.31%	48.05%
564033	0.0450		1.71%	0.60%	0.60%	1.29%	0.54%
1173727	0.0275	0.01%	0.78%	0.76%	2.80%	1.01%	2.55%
2288734	0.0175	0.00%					



Σχήμα 3.6: Υπολογιστικό πλέγμα του πεδίου ροής του χώρου γραφείου για την περίπτωση του φωσγενίου.

Πίνακας 3.6: Χαρακτηριστικά πλέγματος του πεδίου ροής του χώρου γραφείου, για την περίπτωση του φωσγενίου.

Mesh – COCl ₂ (office domain)	
Grid	Structured
Growth rate	1.09
Elements	1173727
Volume statistics	
Minimum element volume (m ³)	6.18 e-10
Maximum element volume (m ³)	2.40 e-03
Surface statistics	
Minimum element surface (m ²)	6.92 e-07
Maximum element surface (m ²)	1.96 e-02

3.3.2 Υπολογιστικό πλέγμα της αίθουσας εκδηλώσεων

Για την επιλογή του κατάλληλου υπολογιστικού πλέγματος στην αίθουσα εκδηλώσεων «Γεώργιος Μυλωνάς» εξετάστηκαν και για τους δύο χημικούς παράγοντες συνολικά πέντε πλέγματα. Όπως και στον χώρο γραφείου, όλα τα πλέγματα ήταν δομημένα (structured grid), έτσι ώστε να μπορεί να γίνει πύκνωσή τους στα σημεία ενδιαφέροντος, χωρίς να προκύψει τελικά ένα εξαιρετικά «βαρύ» πλέγμα, που θα είχε πολλαπλάσιες απαιτήσεις σε υπολογιστικούς πόρους. Σε όλα τα εξεταζόμενα πλέγματα και για τις δύο περιπτώσεις χημικών παραγόντων χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος ρυθμός ανάπτυξης και το ίδιο μέγιστο επιτρεπόμενο μέγεθος κελιού (1.04m), χωρίς ωστόσο να δημιουργηθούν κελιά τέτοιας τάξης μεγέθους.

3.3.2.1 Η περίπτωση της αμμωνίας στην αίθουσα εκδηλώσεων

Η χωρική διακριτοποίηση του πεδίου ροής για κάθε πλέγμα έγινε ξεκινώντας από το επιβεβλημένο μέγεθος κελιού στις περιοχές αυξημένου ενδιαφέροντος και ακολουθώντας βαθμό ανάπτυξης 1.10. Ο αριθμός των κελιών κάθε εξεταζόμενου πλέγματος παρουσιάζεται στην πρώτη στήλη του **Πίνακας 3.7**, ενώ στη δεύτερη στήλη του ίδιου πίνακα παρουσιάζεται το επιβαλλόμενο μέγεθος κελιού στις περιοχές ενδιαφέροντος.

Για την διενέργεια του ελέγχου ανεξαρτησίας της λύσης, έγινε σε καθένα από τα πέντε πλέγματα προσομοίωση σταθερής εκροής της αμμωνίας από την πηγή ροής μάζας στο κέντρο του χώρου, 1.00m AGL, με παροχή 100 mg/sec, όπως και στην περίπτωση του χώρου γραφείου και τα αποτελέσματα που αντιστοιχούν σε 100 επαναλήψεις συγκρίθηκαν μεταξύ τους. Μεταξύ των ελεγχόμενων πλεγμάτων, μια απόκλιση της τάξης του 10% θεωρήθηκε αποδεκτή.

Μεθοδολογία

Στον **Πίνακα 3.7** παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις των μεγεθών που ελέγχθηκαν κατά τον έλεγχο ανεξαρτησίας της λύσης για την περίπτωση της αμμωνίας. Βάσει αυτών και με δεδομένους τους διαθέσιμους υπολογιστικούς πόρους επιλέχθηκε ως καταλληλότερο το πλέγμα των **3092357 κελιών**, το οποίο παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.7** και στον **Πίνακα 3.9** συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του.

Πίνακας 3.7: Διακυμάνσεις του τεστ ανεξαρτησίας της λύσης στην αίθουσα τελετών για την αμμωνία

Grid independence test variations for the venue domain - Ammonia (NH ₃)										
Structured grid										
Growth rate: 1.10										
Q = 0.00001 kg/sec										
Grid Elements	Element size	Mass flow rate on pressure outlet		Velocity Magnitude (Facet max on pressure outlets)		Mass fraction of NH ₃ (Facet max on pressure outlets)		Mass fraction of NH ₃ (Volume weighted average)	Mass fraction of NH ₃ (max) 1.20 m AGL	Mass fraction of NH ₃ (max) 1.80 m AGL
		pressure outlet 1	pressure outlet 2	pressure outlet 1	pressure outlet 2	pressure outlet 1	pressure outlet 2			
392938	0.200									
		5,89%	5,54%	7,83%	17,64%	2,41%	0,35%	5,59%	8,76%	1,62%
752686	0.115	0,41%	0,36%	4,42%	3,88%	23,27%	22,58%	21,21%	23,64%	37,65%
1652807	0.095	0,8%	0,80%	0,58%	1,70%	6,17%	6,70%	7,19%	0%	5,76%
3092357	0.051	0,21%	0,19%	2,50%	2,50%	7,63%	8,26%	7,51%	1,15%	10,01%
5979785	0.044									

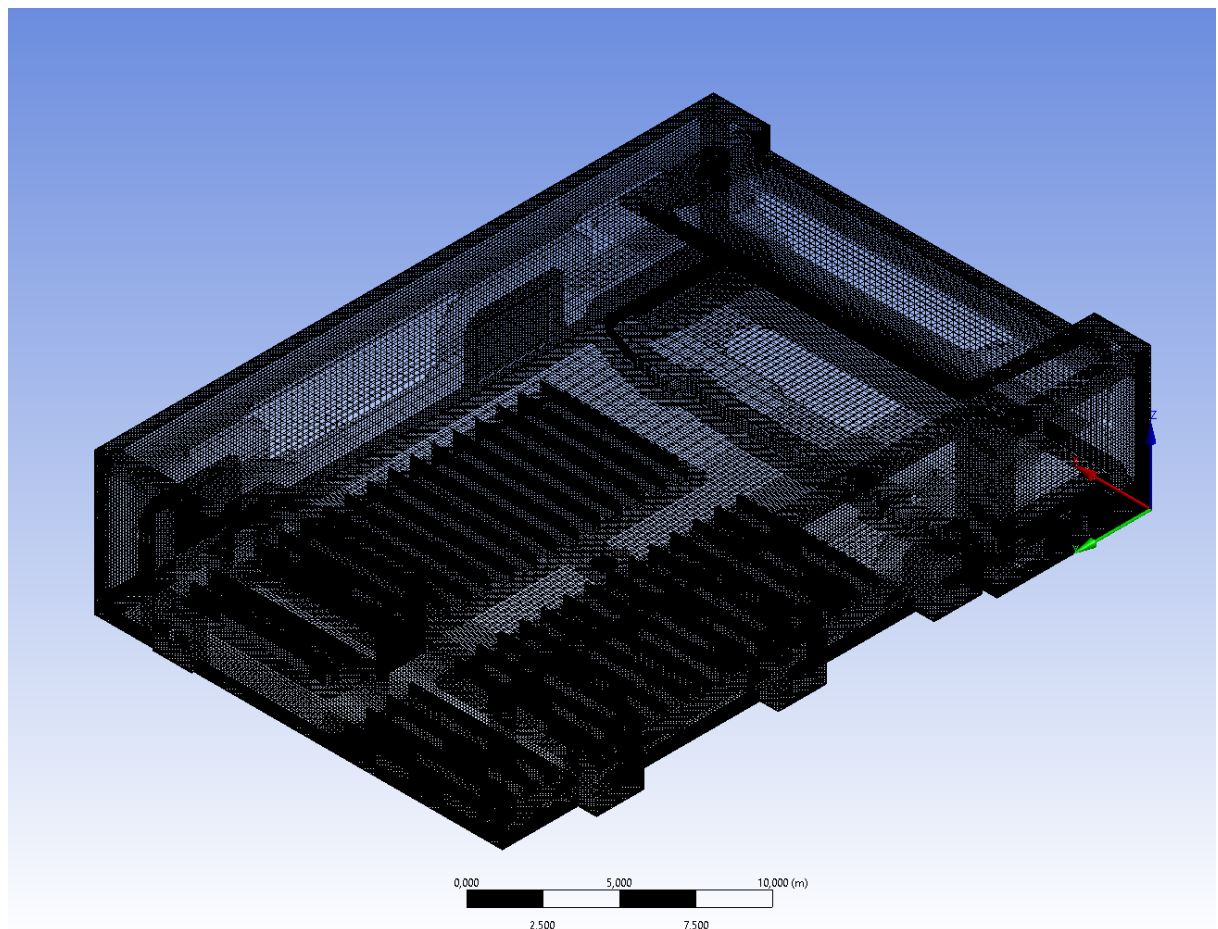
3.3.2.2 Η περίπτωση του φωσγενίου στην αίθουσα εκδηλώσεων

Για την περίπτωση του φωσγενίου στην αίθουσα εκδηλώσεων ελέγχθηκαν τα ίδια πλέγματα με αυτά της περίπτωσης της αμμωνίας (βλ. πρώτη και δεύτερη στήλη του **Πίνακα 3.8**) Για την διενέργεια του τεστ ανεξαρτησίας της λύσης, έγινε σε καθένα από τα πέντε εξεταζόμενα πλέγματα προσομοίωση σταθερής εκροής του φωσγενίου από την πηγή ροής μάζας στο κέντρο του χώρου, 1.00m AGL, με παροχή 10 mg/sec. Τα αποτελέσματα που αντιστοιχούν σε 100 επαναλήψεις συγκρίθηκαν μεταξύ τους και μεταξύ των ελεγχόμενων μεγεθών, μια απόκλιση της τάξης του 10% θεωρήθηκε αποδεκτή.

Στον **Πίνακα 3.8** παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις των μεγεθών που ελέγχθηκαν κατά τον έλεγχο ανεξαρτησίας της λύσης για την περίπτωση της αμμωνίας. Βάσει αυτών επιλέχθηκε ως καταλληλότερο το πλέγμα των **3092357 κελιών**, ίδιο με αυτό της περίπτωσης της αμμωνίας, το οποίο παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3.7** και τα χαρακτηριστικά του συνοψίζονται στον **Πίνακα 3.9**.

Πίνακας 3.8: Διακυμάνσεις του τεστ ανεξαρτησίας της λύσης στην αίθουσα τελετών για το φωσγένιο.

Grid independence test variations for the venue domain - Phosgene (COCl ₂)										
Structured grid										
Growth rate: 1.10										
Q = 0.00001 kg/sec										
Grid Elements	Element size	Mass flow rate on pressure outlet		Velocity Magnitude (Facet max on pressure outlets)		Mass fraction of COCl ₂ (Facet max on pressure outlets)		Mass fraction of COCl ₂ (Volume weighted average)	Mass fraction of COCl ₂ (max) 1.20m AGL	Mass fraction of COCl ₂ (max) 1.80m AGL
		pressure outlet 1	pressure outlet 2	pressure outlet 1	pressure outlet 2	pressure outlet 1	pressure outlet 2			
392938	0.200									
		4.73%	4,57%	9.42%	16.14%	1.73%	1.08%	5.59%	9.37%	21.74%
752686	0.115									
		0.97%	0,97%	1.94%	0.79%	2.61%	2.98%	3.61%	0.74%	11.51%
1652807	0.095									
		0.65%	0,65%	2.57%	4.54%	10.11%	10.11%	9.46%	9.18%	3.27%
3092357	0.051									
		0.28%	0,28%	4.70%	3.43%	7.78%	7.96%	6.90%	2.86%	4.07%
5979785	0.044									



Σχήμα 3.7: Υπολογιστικό πλέγμα του πεδίου ροής της αίθουσας εκδηλώσεων "Γεώργιος Μυλωνάς", για τις περιπτώσεις της αμμωνίας και του φωσγένιου.

Πίνακας 3.9: Χαρακτηριστικά πλέγματος του πεδίου ροής της αίθουσας τελετών «Γεώργιος Μυλωνάς», για τις περιπτώσεις της αμμωνίας και του φωσγενίου.

Mesh – NH3 & COCl2 (venue domain)	
Grid	Structured
Growth rate	1.10
Elements	3092357
Volume statistics	
Minimum element volume (m ³)	9.08 e-09
Maximum element volume (m ³)	1.28 e-01
Surface statistics	
Minimum element surface (m ²)	3.45 e-06
Maximum element surface (m ²)	2.62 e-01

3.4 Οριακές συνθήκες των πεδίων ροής

Μετά τον σχεδιασμό των 3D γεωμετρικών μοντέλων των δύο χώρων και της δημιουργίας και επιλογής του κατάλληλου υπολογιστικού πλέγματος του κάθε πεδίου ροής, ακολούθησε ο ορισμός των οριακών συνθηκών του προβλήματος για κάθε χώρο, όπως αυτές διατίθενται από το CFD λογισμικό ANSYS Fluent [40]. Οι οριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν για κάθε εξεταζόμενο χώρο, για όλες τις προσομοιώσεις, παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

Στη θέση της πηγής εφαρμόστηκαν οριακές συνθήκες **εισόδου ροής μάζας (mass flow inlet)**. Οι οριακές συνθήκες εισόδου ροής μάζας μπορούν να εφαρμοστούν τόσο σε ασυμπίεστες όσο και συμπιεστές ροές και προτιμώνται συνήθως όταν είναι σημαντικότερο να περιγραφεί ένας ορισμένος σταθερός ρυθμός ροής μάζας παρά η συνολική πίεση του ρεύματος εισροής [40]. Στην περίπτωση της πηγής του προβλήματος, ενδιαφέρει περισσότερο ο σταθερός ρυθμός ροής μάζας του κάθε χημικού παράγοντα που διοχετεύεται στην κύρια ροή, ενώ η ταχύτητα της κύριας ροής ρυθμίζεται κυρίως από το ζεύγος οριακών συνθηκών εισόδου/εξόδου πίεσης της κυκλοφορίας του αέρα.

Στην θέση των εξωτερικών θυρών εφαρμόστηκαν οριακές συνθήκες **εισόδου ταχύτητας (velocity inlet)**. Οι οριακές συνθήκες εισόδου ταχύτητας χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της ταχύτητας και όλων των σχετικών βαθμωτών ιδιοτήτων της ροής στις θέσεις εισόδων ροής. Σε αυτή την περίπτωση, η ολική πίεση (ή η πίεση ανακοπής ανάλογα) δεν είναι σταθερή, αλλά αυξάνεται αποκρινόμενη στην υπολογιζόμενη στατική πίεση, στην απαραίτητη τιμή ώστε να εξασφαλίζεται η οριζόμενη κατανομή ταχύτητας. Η οριακή συνθήκη αυτή είναι κατάλληλη μόνο για ασυμπίεστες ροές. Η χρήση της σε συμπιεστές ροές

θα οδηγήσει σε μη φυσιολογικό αποτέλεσμα, αφού επιτρέπει στην πίεση ανακοπής να παρουσιάζει διακυμάνσεις μέχρι οποιοδήποτε επίπεδο [40].

Στη θέση του παραθύρου του χώρου γραφείου και των ανοιγόμενων υαλοστασίων της αίθουσας εκδηλώσεων «Γεώργιος Μυλωνάς», εφαρμόστηκαν οριακές συνθήκες **εξόδου πίεσης (pressure outlet)**, με στατική πίεση στο όριο εξόδου ίση με μηδέν. Η τιμή της στατικής πίεσης στο όριο εξόδου λαμβάνεται υπόψιν μόνο στην περίπτωση υποχημητικής ροής, ενώ αν η ροή γίνει τοπικά υπερχημητική, η στατική πίεση στο όριο εξόδου υπολογίζεται από τη ροή στο εσωτερικό του πεδίου ροής. Όλες οι υπόλοιπες άγνωστες ποσότητες της ροής υπολογίζονται επίσης από το εσωτερικό του πεδίου ροής [40].

Τέλος, όλα τα υπόλοιπα όρια των πεδίων ροής και στις δύο περιπτώσεις (δάπεδο, οροφή, πλευρικοί τοίχοι, επιφάνειες εξοπλισμού κλπ.) ορίστηκαν σαν **μη ολισθηρά σταθερά τοιχώματα (no-slip stationary walls)**.

Οι εφαρμοζόμενες οριακές συνθήκες για τον χώρο γραφείου και για την αίθουσα εκδηλώσεων «Γεώργιος Μυλωνάς» παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.3** και στο **Σχήμα 3.4** αντίστοιχα.

3.5 Παράμετροι προσομοίωσης ροών

3.5.1 Γενικός επιλύτης και αλγόριθμοι σύζευξης πίεσης – ταχύτητας

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έχουν γίνει δύο ειδών προσομοιώσεις: **προσομοιώσεις ασυμπίεστης μόνιμης ροής** και **προσομοιώσεις ασυμπίεστης χρονικά μεταβαλλόμενης ροής**. Οι προσομοιώσεις ασυμπίεστης μόνιμης ροής αφορούν την κυκλοφορία του ρεύματος αέρα σε κάθε χώρο, πριν την απελευθέρωση των χημικών παραγόντων, καθώς και τις προσομοιώσεις διασποράς των χημικών παραγόντων που έγιναν στα πλαίσια των ελέγχων ανεξαρτησίας της λύσης από το πλέγμα, για την επιλογή του καταλληλότερου πλέγματος για κάθε περίπτωση. Οι προσομοιώσεις ασυμπίεστης χρονικά μεταβαλλόμενης ροής αφορούν τις προσομοιώσεις απελευθέρωσης και διασποράς κάθε χημικού παράγοντα μέσα στο εκάστοτε πεδίο ροής, για χρονική διάρκεια 30 λεπτών.

Όλα τα εξεταζόμενα σενάρια αφορούν ασυμπίεστες ροές, επομένως από τους διαθέσιμους επιλύτες του CFD λογισμικού, επιλέχθηκε αυτός που βασίζεται στην πίεση (**pressure-based**). Σε ότι αφορά τους αλγόριθμους σύζευξης πίεσης-ταχύτητας (pressure - velocity coupling), για τις μεν μόνιμες ροές χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος **SIMPLE** (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations), για τις δε μεταβαλλόμενες ο αλγόριθμος **PISO** (Pressure-Implicit with Splitting of Operators). Τα βασικά χαρακτηριστικά των γενικών

επιλυτών που βασίζονται στην πίεση, καθώς και των αλγορίθμων σύζευξης πίεσης ταχύτητας παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 2 στην Ενότητα 2.5.

3.5.2 Σχήμα χωρικής διακριτοποίησης διαφορικών εξισώσεων

Το CFD λογισμικό ANSYS Fluent προσφέρει μια σειρά μεθόδων διακριτοποίησης και επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων, εξαρτώμενων από παράγοντες όπως το είδος του πεδίου ροής, το ρευστό, την τάξη ακρίβειας που απαιτείται κλπ.. Για την διακριτοποίηση των εξισώσεων απαιτούνται πληροφορίες από το κέντρο του κάθε κελιού, καθώς και από τις έδρες των γειτονικών του κελιών. Αυτό συμβαίνει επειδή οι τιμές των δεδομένων πεδίου (ταχύτητα, ιδιότητες ρευστού κλπ.) αποθηκεύονται στο κέντρο βάρους του όγκου ελέγχου ενός κελιού, ωστόσο για τον υπολογισμό των όρων λόγω μεταφοράς μιας διαφορικής εξίσωσης χρειάζονται οι τιμές των μεγεθών στις επιφάνειες των όγκων ελέγχου. Οι τιμές των μεγεθών στις επιφάνειες των όγκων ελέγχου υπολογίζονται με την βοήθεια σχημάτων παρεμβολής μεταξύ ενός όγκου ελέγχου και των γειτονικών του [40].

Στην παρούσα εργασία για των υπολογισμό των μεγεθών αυτών θα χρησιμοποιηθεί το ανάντι σχήμα δεύτερης τάξης (*second order upwind scheme*), το οποίο αναπτύσσοντας τη σειρά Taylor μιας υπολογισθείσας τιμής στο κέντρο του κελιού, προσφέρει ακρίβεια δεύτερης τάξης. Το ανάντι σχήμα δεύτερης τάξης προσφέρει ακριβή αποτελέσματα, σε συνδυασμό με αυξημένη ευστάθεια σε σχέση με άλλα σχήματα παρεμβολής, απαιτώντας ωστόσο σχετικά μεγαλύτερο υπολογιστικό χρόνο.

3.5.3 Μέθοδος και μοντέλο προσομοίωσης της τύρβης

Λαμβάνοντας υπόψιν τις απαιτήσεις της παρούσας εργασίας καθώς και την διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ, η μέθοδος κατά Reynolds ολοκλήρωσης των εξισώσεων Navier – Stokes (Reynolds-Averaged Navier-Stokes – RANS) επιλέχθηκε για την προσομοίωση της τύρβης. Στη μέθοδο RANS τα βασικά μεγέθη του πεδίου ροής αποσυντίθενται σε δύο μέρη: στη μέση τιμή τους, που είναι ανεξάρτητη του χρόνου ή αργά μεταβαλλόμενη και στην διακύμανση τους, που είναι χρονικά μεταβαλλόμενη. Έτσι, κάθε βαθμωτή ποσότητα φ , όπως η ταχύτητα, η πίεση κλπ. μπορεί να αναλυθεί σε δύο όρους ως εξής:

$$\varphi = \bar{\varphi} + \varphi'$$

όπου $\bar{\varphi}$ και φ' είναι η μέση τιμή και η διακύμανση του εκάστοτε βαθμωτού μεγέθους αντίστοιχα.

Αντικαθιστώντας τα βαθμωτά μεγέθη με εκφράσεις αυτής της μορφής στις εξισώσεις διατήρησης συνέχειας και ορμής προκύπτουν οι εξισώσεις RANS για την συνέχεια και την ορμή, οι οποίες μπορούν να γραφτούν σε μορφή καρτεσιανού τανυστή ως εξής:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial(\rho \cdot \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot \bar{u}_i \cdot \bar{u}_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \cdot \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \cdot \overline{u'_i \cdot u'_j} \right)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα; t είναι ο χρόνος; μ είναι το δυναμικό ιξώδες και u_i και u_j είναι οι μέσες τιμές των συνιστωσών της ταχύτητας, κατά τις διευθύνσεις x_i και x_j αντίστοιχα.

Οι εξισώσεις RANS έχουν την ίδια γενική μορφή με τις εξισώσεις Navier-Stokes και επιπλέον τους πρόσθετους όρους που αντιπροσωπεύουν τα αποτελέσματα της τύρβης, οι οποίοι καλούνται τάσεις Reynolds (Reynolds stresses) και έχουν την μορφή $\rho \cdot \overline{u'_i \cdot u'_j}$.

Η υπόθεση Boussinesq χρησιμοποιείται για τον συσχετισμό των τάσεων Reynolds με τις μέσες τιμές των συνιστωσών της ταχύτητας:

$$\rho \cdot \overline{u'_i \cdot u'_j} = \mu_t \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \cdot \left(\rho \cdot k + \mu_t \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \cdot \delta_{ij}$$

όπου μ_t είναι το τυρβώδες ιξώδες, k η τυρβώδης κινητική ενέργεια και δ_{ij} το δέλτα του Kronecker.

Το μοντέλο Realizable k-ε επιλέχθηκε για την προσομοίωση των χαρακτηριστικών της μέσης ροής, όπου k είναι η τυρβώδης κινητική ενέργεια και ε ο ρυθμός σκέδασης της ενέργειας. Ο όρος «Realizable» σημαίνει ότι το μοντέλο ικανοποιεί ορισμένους μαθηματικούς περιορισμούς στις τάσεις του Reynolds, που είναι σε συμφωνία με την ουσία της φυσικής των τυρβωδών ροών, περιορισμούς που τα μοντέλα Standard k-ε και RNG k-ε δεν μπορούν να ικανοποιήσουν. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το μοντέλο Realizable k-ε, σε ότι αφορά τις συγκεντρώσεις ενός χημικού παράγοντα μέχρι το επίπεδο αναπνοής, προσεγγίζουν σε ακρίβεια το 72% των πειραματικών αποτελεσμάτων [14]. Οι τιμές των k και ε λαμβάνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις μεταφοράς:

$$\frac{\partial(\rho \cdot k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot k \cdot u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \cdot \varepsilon - Y_M + S_k$$

και

Μεθοδολογία

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \cdot \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot \varepsilon \cdot u_j)}{\partial x_j} \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho \cdot C_1 \cdot S_\varepsilon - \rho \cdot C_2 \cdot \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \cdot \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon}{k} \cdot C_{3\varepsilon} \cdot G_b \\ + S_\varepsilon \end{aligned}$$

$$\text{όπου } C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta+5} \right], \quad \eta = S \cdot \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2 \cdot S_{ij} \cdot S_{ij}}$$

Στις εξισώσεις αυτές, ο όρος G_k αντιπροσωπεύει τη γένεση τυρβώδους κινητικής ενέργειας λόγω των μεταβολών της μέσης ταχύτητας, ο όρος G_b τη γένεση τυρβώδους κινητικής ενέργειας λόγω άνωσης, ο όρος Y_M τη συνεισφορά της διακύμανσης διαστολής στη συμπιεστή τύρβη ως προς το συνολικό ρυθμό σκέδασης, οι όροι C_2 και $C_{1\varepsilon}$ είναι σταθερές της εξίσωσης, οι όροι σ_k και σ_ε είναι οι αριθμοί του Prandtl για την τύρβη για το k και το ε αντίστοιχα και τέλος, οι όροι S_k και S_ε είναι τιμές που ορίζονται από το χρήστη.

Η τυρβώδης συνεκτικότητα μ_t στο μοντέλο Realizable k-ε υπολογίζεται από τον τύπο

$$\mu_t = \rho \cdot C_\mu \cdot \frac{k^2}{\varepsilon}$$

όπου ο όρος C_μ είναι μεταβλητή ποσότητα που υπολογίζεται από τον τύπο

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \cdot \frac{k \cdot U^*}{\varepsilon}}$$

με $U^* = \sqrt{S_{ij} \cdot S_{ij} + \overline{\Omega_{ij}} \cdot \overline{\Omega_{ij}}}$ και $\overline{\Omega_{ij}}$ τον τανυστή που εκφράζει το μέσο ρυθμό περιστροφής που παρατηρείται σε ένα περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς με γωνιακή ταχύτητα ω_k . Οι όροι A_0 και A_s είναι σταθερές του μοντέλου, με $A_0 = 4.04$ και $A_s = \sqrt{6} \cdot \cos \varphi$, όπου $\varphi = \frac{1}{3} \cdot \cos^{-1}(\sqrt{6} \cdot W)$, $W = \frac{S_{ij} \cdot S_{jk} \cdot S_{ki}}{\bar{S}^3}$, $\bar{S} = \sqrt{S_{ij} \cdot S_{ij}}$ και $S_{ij} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$.

Οι σταθερές $C_{1\varepsilon}$, C_2 , σ_k και σ_ε ορίζονται για να διασφαλίσουν πως το μοντέλο αποδίδει καλά σε κανονικά ορισμένες ροές και οι τιμές τους είναι $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_2 = 1.9$, $\sigma_k = 1.0$ και $\sigma_\varepsilon = 1.2$.

3.5.4 Μοντέλο χημικής κινητικής

Για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης κάθε χημικού παράγοντα στο πεδίο ροής χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο χημικής κινητικής **Species Transport**. Το μοντέλο αυτό υπολογίζει για την επίλυση των εξισώσεων διατήρησης (conservation equations) κάθε στοιχείου, μια τιμή του τοπικού κλάσματος μάζας του Y_i , επιλύοντας μια εξίσωση διάχυσης -

συναγωγής (convection - diffusion) , για $N-1$ στοιχεία, όπου N ο συνολικός αριθμός ρευστών χημικών στοιχείων στο πεδίο ροής. Εφόσον τα κλάσματα μάζας όλων των στοιχείων θα πρέπει να έχουν άθροισμα 1, το N -οστό κλάσμα μάζας καθορίζεται ως 1 μείον το άθροισμα των $N-1$ επιλυθέντων κλασμάτων μάζας.

Η εξίσωση διάχυσης – συναγωγής που χρησιμοποιείται είναι

$$\frac{\partial(\rho \cdot Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot u_i \cdot Y_i) = -\nabla \cdot J_i$$

όπου ο όρος Y_i είναι το τοπικό κλάσμα μάζας του χημικού παράγοντα και ο όρος J_i που εκφράζει το συντελεστή διάχυσης.

Για την παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε σε κάθε περίπτωση μίγμα δύο στοιχείων, αμμωνίας-αέρα και φωσγενίου-αέρα, σε σταθερή θερμοκρασία 288.15K. Καθένα από τα μίγματα στη δεδομένη θερμοκρασία θεωρήθηκε αδρανές.

3.6 Λοιπές παράμετροι και σύνοψη

Στους δύο εξεταζόμενους χώρους μελέτης, προσομοιώθηκε ξεχωριστά η απελευθέρωση και διασπορά δύο διαφορετικών χημικών παραγόντων, ενός ελαφρύτερου και ενός βαρύτερου του αέρα, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από διαφορετική τοξικότητα.

Για κάθε χημικό παράγοντα προσομοιώθηκε η απελευθέρωσή του από πηγή κυκλικής διατομής $D=0.01m$, στο κέντρο κάθε χώρου, 1.00m AGL για διάστημα 5 sec και στη συνέχεια παρακολουθήθηκε η διασπορά και η συγκεντρώσεις του στο χώρο για 30 min. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τις οριακές τιμές AEGIs και IDLH για κάθε χημικό παράγοντα.

Εκτός των προσομοιώσεων της ροής του ρεύματος αέρα και των μόνιμων ροών στα πλαίσια του τεστ ανεξαρτησίας της λύσης από το πλέγμα, οι προσομοιώσεις του κυρίως προβλήματος αφορούν χρονικά μεταβαλλόμενες ροές. Για τον λόγο αυτό, εκτός της χωρικής διακριτοποίησης των εξισώσεων ροής, έγινε και χρονική διακριτοποίηση τους. Η χρονική διακριτοποίηση περιλαμβάνει την ολοκλήρωση κάθε όρου της διαφορικής εξίσωσης για κάθε χρονικό βήμα Δt . Το χρονικό βήμα που επιλέχθηκε για κάθε περίπτωση ήταν 0.1 sec.

Η προσομοίωση του ρεύματος αέρα πριν την απελευθέρωση κάθε χημικού παράγοντα έγινε ξεχωριστά σε κάθε χώρο και τα αποτελέσματα της χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια σαν αρχικές τιμές για τη χρονικά μεταβαλλόμενη προσομοίωση της απελευθέρωσης και διασποράς κάθε χημικού παράγοντα.

Μεθοδολογία

Λόγω της διαφορετικής τοξικότητας των δύο χημικών παραγόντων δε χρησιμοποιήθηκε και για τους δύο η ίδια παροχή μάζας. Για τη μεν αμμωνία έγινε απελευθέρωση 100mg/sec για διάστημα 5 sec ($V \sim 725$ ml), για το δε φωσγένιο απελευθέρωση 10mg/sec για διάστημα 5 sec ($V \sim 14.37$ ml) επίσης. Η επιλογή έγινε με κριτήριο την δυνατότητα μεταφοράς του κάθε χημικού παράγοντα στο χώρο από ένα άτομο, το οποίο θα προσπαθούσε να δημιουργήσει ένα χημικό περιστατικό, χωρίς να γίνει αντιληπτό.

Στον **Πίνακα 3.10** και στον **Πίνακα 3.11** συνοψίζονται οι ρυθμίσεις που έγιναν για τις προσομοιώσεις των μόνιμων και χρονικά μεταβαλλόμενων ροών των δύο χημικών παραγόντων σε κάθε χώρο.

Πίνακας 3.10: Παράμετροι προσομοιώσεων ροής για την περίπτωση της αμμωνίας

Ammonia (NH ₃)		
General settings		
Solver Type	Steady flows	Steady pressure-based
	Transient flows	Transient pressure-based
Models		
Turbulence simulation method	RANS	
Turbulence simulation model	Realizable k-ε	
Chemical kinetics model	Species transport	
Materials		
Inert mixture	Ammonia – air	
Boundary conditions		
Ammonia's source	Mass flow inlet (mass flow rate: 100mg/sec)	
Airflow's inlet	Velocity inlet (Velocity magnitude: 0.1m/sec)	
Airflow and ammonia's outlet	Pressure outlet (zero pressure)	
Rest of the domain's boundary conditions	No-slip stationary walls	
Solution methods		
Pressure-velocity coupling algorithm	Steady flows	SIMPLE
	Transient flows	PISO
Spatial discretization scheme	Second order upwind	
Time settings (for transient simulations)		
Chemical agent's release time	5 seconds	
Chemical agent's observation time (after the release)	30 minutes	
Time step (for transient flows)	0.1 sec	

Πίνακας 3.11: Παράμετροι προσομοιώσεων ροής για την περίπτωση του φωσγενίου

Phosgene (COCl₂)		
General settings		
Solver Type	Steady flows	Steady pressure-based
	Transient flows	Transient pressure-based
Models		
Turbulence simulation method	RANS	
Turbulence simulation model	Realizable k-ε	
Chemical kinetics model	Species transport	
Materials		
Inert mixture	Phosgene – air	
Boundary conditions		
Phosgene's source	Mass flow inlet (mass flow rate: 10mg/sec)	
Airflow's inlet	Velocity inlet (Velocity magnitude: 0.1m/sec)	
Airflow and ammonia's outlet	Pressure outlet (zero pressure)	
Rest of the domain's boundary conditions	No-slip stationary walls	
Solution methods		
Pressure-velocity coupling algorithm	Steady flows	SIMPLE
	Transient flows	PISO
Spatial discretization scheme	Second order upwind	
Time settings (for transient simulations)		
Chemical agent's release time	5 seconds	
Chemical agent's observation time (after the release)	30 minutes	
Time step (for transient flows)	0.1 sec	

4 Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των μόνιμων ροών των ρευμάτων αέρα πριν την απελευθέρωση των χημικών παραγόντων, καθώς και των προσομοιώσεων των χρονικά μεταβαλλόμενων ροών κάθε χημικού παράγοντα ξεχωριστά, για τον χώρο γραφείου και για την αίθουσα εκδηλώσεων «Γεώργιος Μυλωνάς».

Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν τα εργαλεία μετα-επεξεργασίας του CFD λογισμικού ANSYS Fluent. Οι συγκεντρώσεις του κάθε χημικού παράγοντα ξεχωριστά παρουσιάζονται, στο τριδιάστατο μοντέλο κάθε χώρου, σε διάφορα οριζόντια επίπεδα AGL και όταν κρίνεται απαραίτητο, σε κατακόρυφα επίπεδα στη θέση της πηγής. Έμφαση δίνεται στα οριζόντια επίπεδα 1.20m AGL και 1.80m AGL τα οποία θεωρείται πως οριοθετούν την ζώνη ανθρώπινης αναπνοής.

4.1 Ο χώρος γραφείου

4.1.1 Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων στο χώρο γραφείου

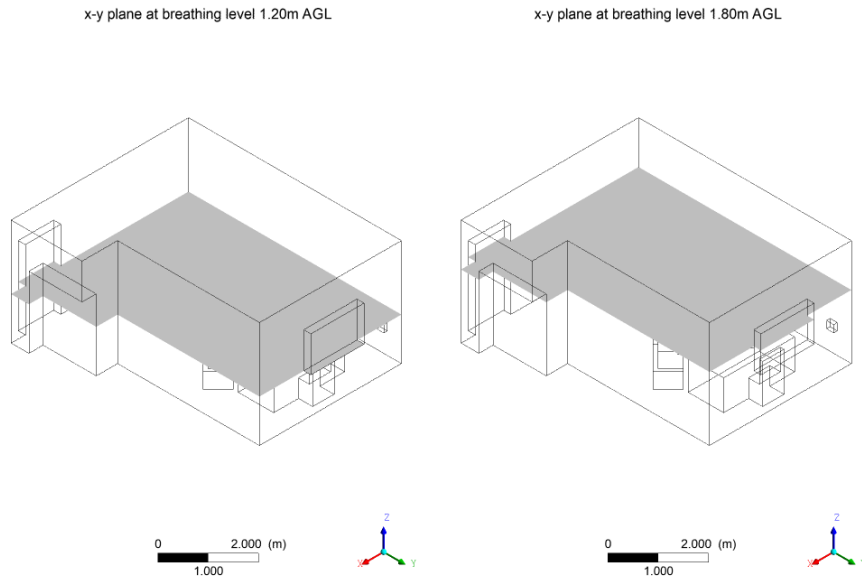
Στο χώρο γραφείου, οι συγκεντρώσεις των δύο χημικών παραγόντων εξετάζονται σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωσή τους, σε μια σειρά από οριζόντια επίπεδα AGL, με έμφαση στην περίπτωση των AEGIs στα οριζόντια επίπεδα 1.20m και 1.80m AGL, τα οποία θεωρήθηκε πως οριοθετούν την ζώνη ανθρώπινης αναπνοής και θα αναφέρονται στο εξής σαν «επίπεδα αναπνοής» (**Σχήμα 4.1**). Τα υπόλοιπα οριζόντια επίπεδα που χρησιμοποιήθηκαν κατά περίπτωση είναι παράλληλα σε αυτά.

Τα νέφη συγκεντρώσεων που υπερβαίνουν την οριακή τιμή IDLH παρουσιάζονται επιπλέον σε δυο κατακόρυφα επίπεδα τα οποία τέμνουν την πηγή κατά την διεύθυνση x-z και κατά την διεύθυνση y-z (**Σχήμα 4.2**), σε επιλεγμένες χρονικές στιγμές για κάθε χημικό παράγοντα. Παρουσίαση των συγκεντρώσεων των νεφών στο κατακόρυφο επίπεδο x-z έγινε και για τις συνολικές συγκεντρώσεις των δύο χημικών παραγόντων.

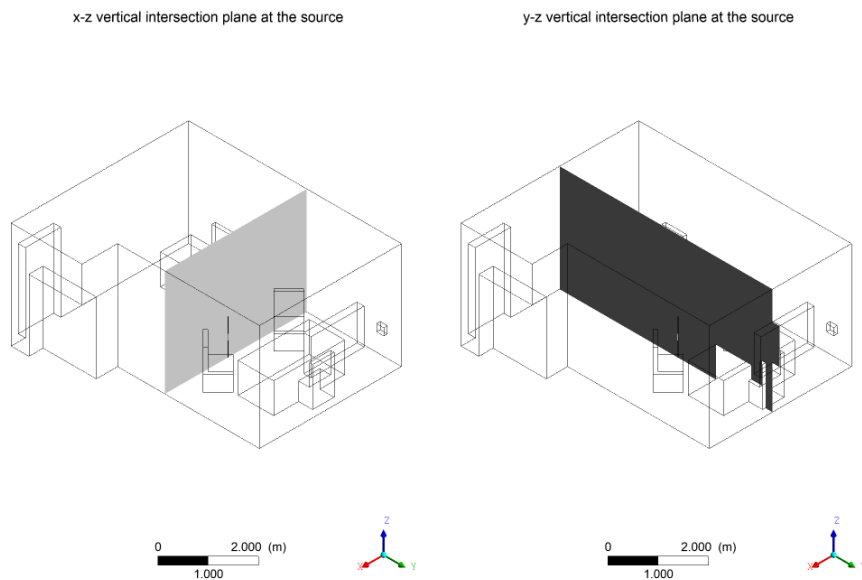
Αμέσως μετά την απελευθέρωση των χημικών παραγόντων, οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις παρατηρούνται και για τις δύο περιπτώσεις στη θέση της πηγής. Για την εκτίμηση της διασποράς των χημικών παραγόντων υπό την επίδραση του ρεύματος αέρα αποτυπώθηκαν σε γραφήματα οι συγκεντρώσεις του κάθε χημικού παράγοντα σε διάφορες υψομετρικές θέσεις πάνω από την πηγή, για διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωσή τους.

Αποτελέσματα

Τέλος, τα νέφη των συνολικών συγκεντρώσεων των χημικών παραγόντων, τα νέφη που αντιστοιχούν στις οριακές τιμές IDLH για διάφορες χρονικές στιγμές, καθώς και τα νέφη που αντιστοιχούν στις οριακές τιμές A EGL για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτά παρουσιάζονται στο 3D μοντέλο του χώρου.



Σχήμα 4.1: Οριζόντια επίπεδα 1.20m και 1.80m AGL, που οριοθετούν την ζώνη αναπνοής στο χώρο γραφείου.

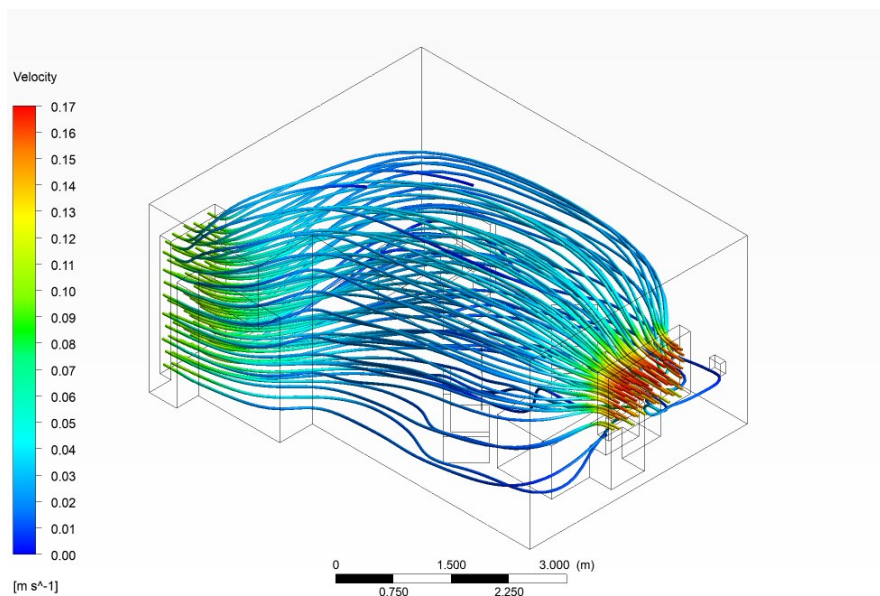


Σχήμα 4.2: Κατακόρυφα επίπεδα x-z και y-z στη θέση της πηγής, στο χώρο γραφείου.

4.1.2 Η κυκλοφορία του περιβάλλοντος αέρα στο χώρο γραφείου

Η κυκλοφορία του αέρα στο χώρο του γραφείου καθορίζεται από ένα ρεύμα αέρα που προϋφίσταται της απελευθέρωσης των χημικών παραγόντων, το οποίο εισέρχεται στο χώρο με ταχύτητα 0.10m/sec από την νότια πόρτα και εξέρχεται από το παράθυρο στον βόρειο τοίχο. Η κατανομή της ταχύτητας του αέρα στο σημείο εισόδου θεωρήθηκε ομοιόμορφη. Η μέγιστη ταχύτητα του ρεύματος αέρα που σημειώνεται είναι 0.17m/sec και εμφανίζεται στο μεγαλύτερο τμήμα της επιφάνειας του βόρειου παραθύρου (**Σχήμα 4.3**).

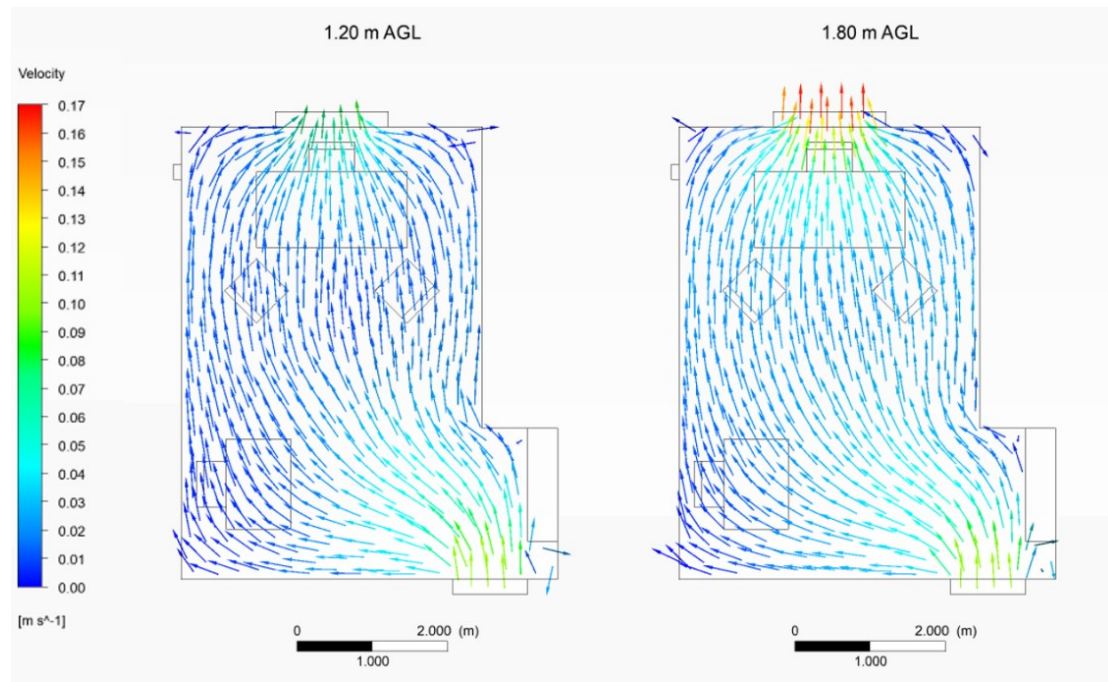
Οι γραμμές ροής της ταχύτητας φαίνεται να δημιουργούν μια κοιλότητα πάνω και γύρω από τον εξοπλισμό του χώρου. Οι μικρότερες ταχύτητες παρατηρούνται στο κέντρο του χώρου, και εμφανίζονται χαμηλότερες κοντά στο δάπεδο και ελαφρώς υψηλότερες κοντά στην οροφή. Πιο συγκεκριμένα, η ταχύτητα του ρεύματος στο κέντρο του χώρου είναι περίπου 0.01 m/sec στα χαμηλότερα σημεία μέχρι και το ύψος της πηγής και 0.04 m/sec κοντά στην οροφή (**Σχήμα 4.3**).



Σχήμα 4.3: Γραμμές ροής του ρεύματος αέρα πριν την εκπομπή των χημικών παραγόντων, στο χώρο γραφείου.

Στα δύο εξεταζόμενα επίπεδα αναπνοής, η ταχύτητα του αέρα φαίνεται να έχει ίδιες τιμές στην είσοδο (0.1m/ sec) και στην περιοχή μπροστά σε αυτή (0.04-0.09m/sec). Επιπλέον, οι ταχύτητες είναι παρόμοιες στα δύο επίπεδα αναπνοής, στο μεγαλύτερο μέρος του χώρου και κυμαίνονται μεταξύ 0.01m/sec και 0.04m/sec περίπου, με ελαφρώς μεγαλύτερες περιοχές υψηλότερων ταχυτήτων στο επίπεδο 1.80m AGL, κοντά στο παράθυρο. Τέλος, στο παράθυρο, τη θέση εξόδου του ρεύματος αέρα από το γραφείο, η τιμή της ταχύτητας σχεδόν διπλασιάζεται στο επίπεδο 1.80m AGL σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή στο επίπεδο 1.20m AGL (**Σχήμα 4.4**).

Αποτελέσματα



Σχήμα 4.4: Διανύσματα της ταχύτητας του ρεύματος αέρα στα επίπεδα αναπνοής πριν την εκπομπή των χημικών παραγόντων, στο χώρο γραφείου.

4.1.3 Η περίπτωση της αμμωνίας στο χώρο γραφείου

Για την περίπτωση της αμμωνίας έγινε μέσω του CFD λογισμικού προσομοίωση της απελευθέρωσής της από πηγή κυκλικής διατομής στο κέντρο του χώρου, 1.00m AGL. Ο χρόνος εκπομπής από την πηγή ήταν 5 sec και ακολούθησε η παρατήρηση της διασποράς της στο χώρο για διάστημα 30 λεπτών. Η επιλογή της ποσότητας και του χρόνου εκπομπής της αμμωνίας έγινε με βάση την εκτιμώμενη μεγαλύτερη δυνατή ποσότητα που θα μπορούσε να μεταφερθεί μέσα σε ένα μικρού μεγέθους, όχι εύκολα αντιληπτού δοχείου, από ένα και μόνο άτομο, το οποίο θα επιθυμούσε να δημιουργήσει ένα χημικό περιστατικό.

Οι συγκεντρώσεις της αμμωνίας στο χώρο συγκρίθηκαν με το όριο IDLH και με τα όρια AEGl του χημικού παράγοντα για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτών. Για να είναι οι οριακές συγκεντρώσεις συμβατές με τις μονάδες που χρησιμοποιεί το CFD λογισμικό, ο **Πίνακας 1.1** και ο **Πίνακας 1.2** που παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 1 τροποποιήθηκαν ως εξής:

Πίνακας 4.1: Όριο IDLH για αμμωνία (τροποποιημένο).

IDLH
0.012 mol/m ³

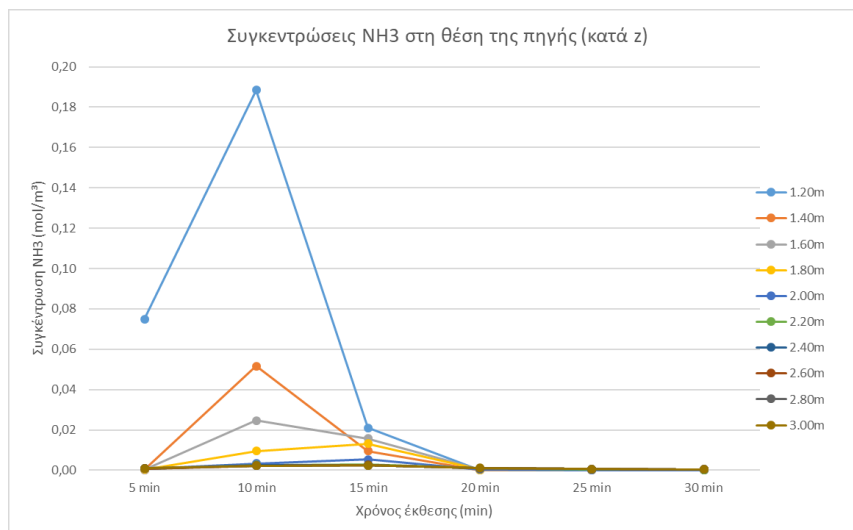
Πίνακας 4.2: Όρια AEGLs για αμμωνία (τροποποιημένα).

Ταξινόμηση	10 min	30 min	Τελικό σημείο
AEGL-1 (μη αδρανοποιητικό)	0.001 mol/m ³	0.001 mol/m ³	Ήπια ενόχληση.
AEGL-2 (αδρανοποιητικό)	0.009 mol/m ³	0.009 mol/m ³	Ενόχληση των οφθαλμών και του λαιμού, βήχας.
AEGL-3 (θανατηφόρο)	0.111 mol/m ³	0.066 mol/m ³	Θάνατος.

4.1.3.1 Διασπορά της αμμωνίας στο χώρο γραφείου

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν πως η αμμωνία, σαν χημικός παράγοντας ελαφρύτερος του αέρα, μετά την απελευθέρωσή της ανέρχεται μέχρι την οροφή του γραφείου και διασπείρεται κατά μήκος της, σχηματίζοντας ένα νέφος υψηλότερης συγκέντρωσης μέχρι το 1.80m AGL περίπου, κυρίως στην περιοχή επάνω από την πηγή.

Στο **Σχήμα 4.5** παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις της αμμωνίας πάνω από τη θέση της πηγής, σε διάφορα υψόμετρα, για τις χρονικές στιγμές 5, 10, 15, 20, 25 και 30 λεπτών μετά την απελευθέρωσή της στο χώρο. Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις στις εξεταζόμενες θέσεις πάνω από την πηγή παρατηρούνται 10 λεπτά μετά την απελευθέρωση της, με σημαντικά μεγαλύτερη τιμή στη θέση 1.20m AGL, και ακολουθούν οι συγκεντρώσεις στις θέσεις 1.40m και 1.60m AGL.

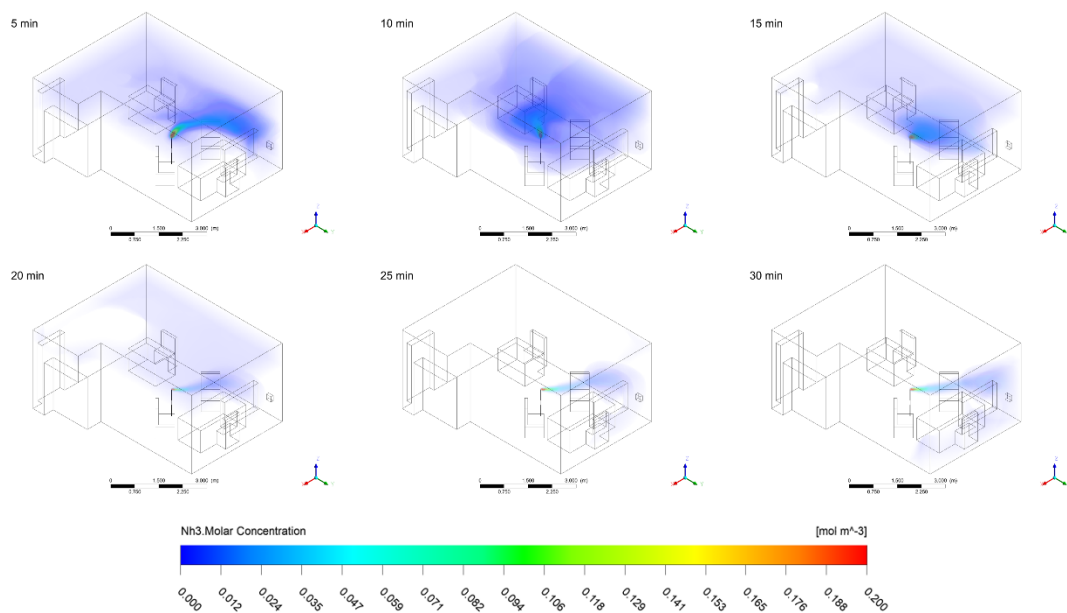


Σχήμα 4.5: Συγκεντρώσεις αμμωνίας στον χώρο γραφείου, στην θέση της πηγής κατά ύψος (z), σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωση της.

Σε χρόνο πέντε λεπτά από την απελευθέρωσή της, η αμμωνία, ακολουθώντας την φορά του ρεύματος αέρα, οδηγείται προς τα βορειοδυτικά του χώρου (**Σχήμα 4.4** και **Σχήμα 4.6**) και συναντώντας τον τοίχο, ένα μέρος της στρέφεται ξανά προς το εσωτερικό του χώρου.

Αποτελέσματα

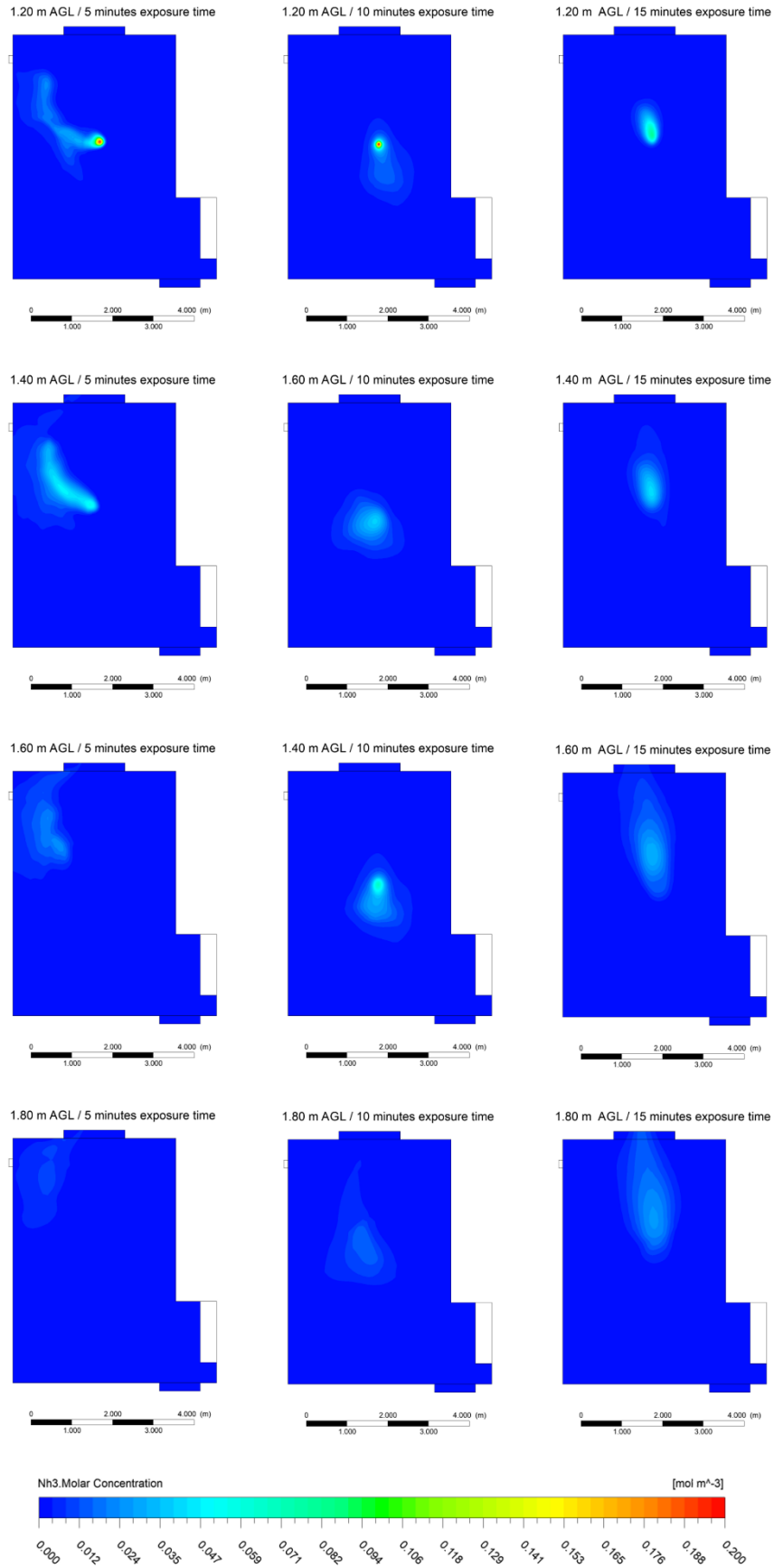
Παράλληλα, αρχίζει να ανεβαίνει σε υψηλότερα επίπεδα και συσσωρεύεται κοντά στην οροφή μέχρι περίπου 10 λεπτά μετά την απελευθέρωση της, σχηματίζοντας ένα νέφος που δεν φαίνεται μέχρι τη στιγμή εκείνη να διασπείρεται κάτω από την επίδραση του ρεύματος αέρα (**Σχήμα 4.5** και **Σχήμα 4.6**).



Σχήμα 4.6: Διασπορά αμμωνίας στο χώρο γραφείου σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωσή της.

Καθώς ο χρόνος περνά, η αμμωνία διασπείρεται κατά μήκος της κατεύθυνσης του ρεύματος αέρα. Αυτό αφορά τόσο τα νέφη υψηλών συγκεντρώσεων που εντοπίζονται κυρίως στο κέντρο του χώρου, όσο και τα νέφη χαμηλότερων συγκεντρώσεων που έχουν ανέβει πάνω από το επίπεδο του πρεκτιού του παραθύρου (2.20m) τα οποία αργά, ακολουθώντας τις γραμμές ροής του ρεύματος αέρα, κατεβαίνουν και κατευθύνονται προς το άνοιγμα του παραθύρου.

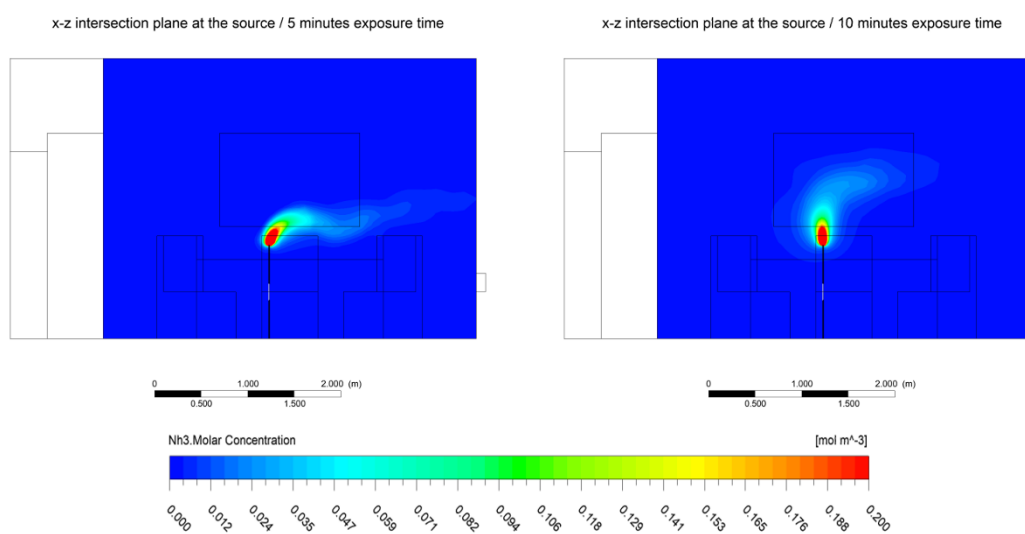
Κατά την χρονική στιγμή 15 λεπτά μετά την απελευθέρωση της αμμωνίας στο χώρο, ο κύριος όγκος του νέφους έχει συγκεντρωθεί μπροστά από το παράθυρο και εξέρχεται από τον χώρο και η κατάσταση βελτιώνεται σε όλα σχεδόν τα οριζόντια επίπεδα πάνω από την πηγή (**Σχήμα 4.7**). Σταδιακά η συγκέντρωσή του νέφους αμμωνίας μειώνεται και επιτυγχάνεται μερική αποσυμφόρηση του χώρου από την παρουσία του χημικού παράγοντα (**Σχήμα 4.6**).



Σχήμα 4.7: Συγκεντρώσεις του νέφους αμμωνίας σε διάφορα επίπεδα AGL της ζώνης αναπνοής στο χώρο γραφείου, τις χρονικές στιγμές 5, 10 και 15 λεπτά μετά την απελευθέρωσή της.

Αποτελέσματα

Σημειώνεται πως στο **Σχήμα 4.5** παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις πάνω από την πηγή σε διάφορες υψομετρικές θέσεις, ξεκινώντας από τα 1.20m AGL, που αντιστοιχεί στο χαμηλότερο εξεταζόμενο επίπεδο αναπνοής. Το γεγονός πως η συγκέντρωση της αμμωνίας είναι πολύ μεγαλύτερη στη θέση αυτή 10 λεπτά μετά την απελευθέρωσή της συγκριτικά με την αντίστοιχη συγκέντρωση 5 λεπτά μετά, οφείλεται στην ιδιότητα της αμμωνίας, σαν χημικός παράγοντας ελαφρύτερος του αέρα, να ανέρχεται σε ψηλότερα επίπεδα και στη θέση που παίρνει το κυρίως σώμα του νέφους εξ' αιτίας αυτού καθώς ο χρόνος περνάει (**Σχήμα 4.8**).



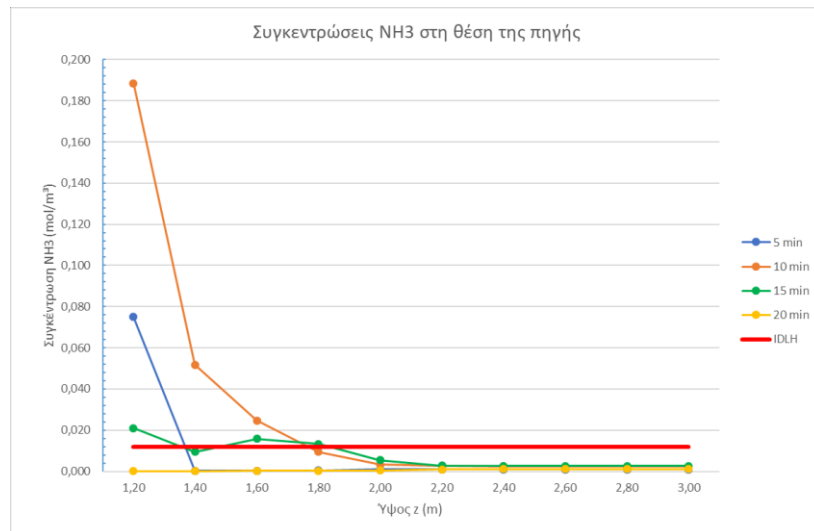
Σχήμα 4.8: Η κατανομή των συγκεντρώσεων αμμωνίας στο χώρο γραφείου 5 και 10 λεπτά μετά την απελευθέρωσή της, στο επίπεδο x-z που τέμνει κατακόρυφα την πηγή.

4.1.3.2 Όριο IDLH αμμωνίας στο χώρο γραφείου

Η οριακή τιμή IDLH για την αμμωνία είναι 0.012 mol/m^3 (

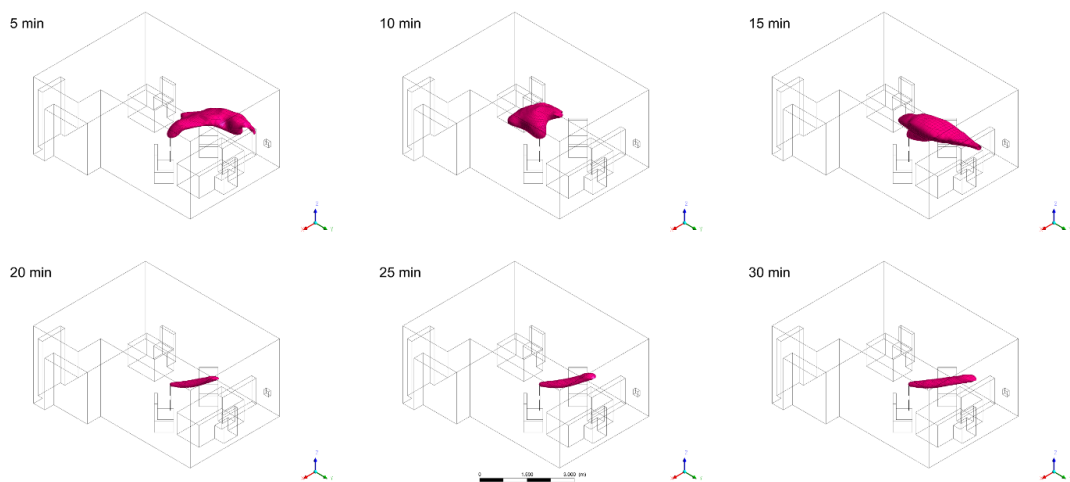
Πίνακας 4.1). Μετά την απελευθέρωση της στο χώρο γραφείου, νέφος της συσσωρεύεται στο χώρο πάνω από την πηγή μέχρι τα 10 πρώτα λεπτά. Ως την χρονική στιγμή αυτή η συγκέντρωση του νέφους σε διάφορες υψομετρικές στάθμες πάνω από τη θέση της πηγής ξεπερνά την οριακή τιμή IDLH μέχρι τα 1.60m AGL (**Σχήμα 4.9**).

Μετά τα πρώτα 10 λεπτά, που ξεκινά η αποσυμφόρηση του χώρου, η συγκέντρωση του νέφους αμμωνίας σχεδόν σε όλες τις εξεταζόμενες υψομετρικές στάθμες πάνω από την πηγή πέφτει κάτω από την οριακή τιμή IDLH. Εξαίρεση αποτελεί η θέση 1.80m AGL, όπου η συγκέντρωση της αμμωνίας φαίνεται ελαφρώς αυξημένη 15 λεπτά μετά την απελευθέρωσή της (**Σχήμα 4.9**).



Σχήμα 4.9: Συγκεντρώσεις αμμωνίας στο χώρο γραφείου, σε διάφορα ύψη πάνω από τη θέση της πηγής, για διάφορες χρονικές στιγμές από την απελευθέρωσή της, συγκριτικά με το IDLH.

Στο **Σχήμα 4.10** παρουσιάζεται το νέφος αμμωνίας συγκέντρωσης μεγαλύτερης του IDLH, σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωσή της. Σημειώνεται πως το IDLH είναι όριο κατωφλιού και επομένως δεν είναι ομοιογενές. Σε όλα τα σημεία του όγκου του νέφους οι τιμές των συγκεντρώσεων είναι μεγαλύτερες της οριακής τιμής IDLH, χωρίς ωστόσο να είναι παντού ίδιες (**Σχήμα 4.6**). Έτσι, αν και ο όγκος του νέφους φαίνεται να είναι μεγαλύτερος για παράδειγμα 15 λεπτά μετά την απελευθέρωση σε σχέση με αυτόν 10 λεπτά μετά, η σύσταση του δεν είναι ίδια και η συνολική συγκέντρωσή του μειώνεται (**Σχήμα 4.6** και **Σχήμα 4.7**).

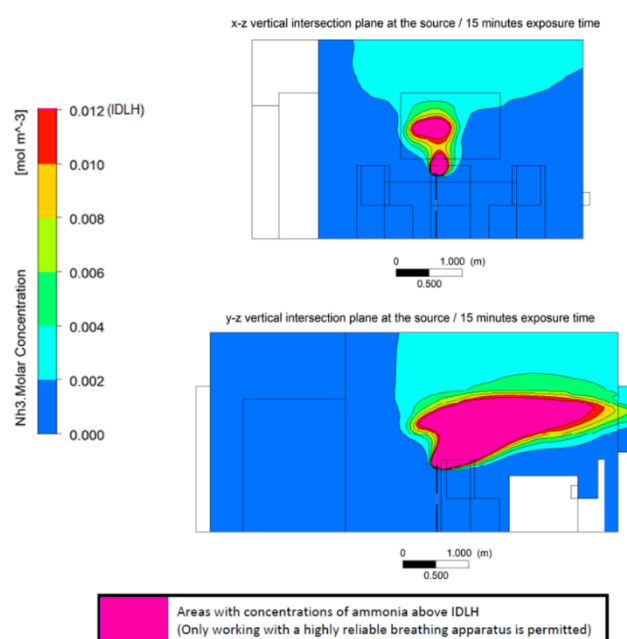


Σχήμα 4.10: Συγκεντρώσεις αμμωνίας μεγαλύτερες του IDLH στο χώρο γραφείου σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωσή της.

Αποτελέσματα

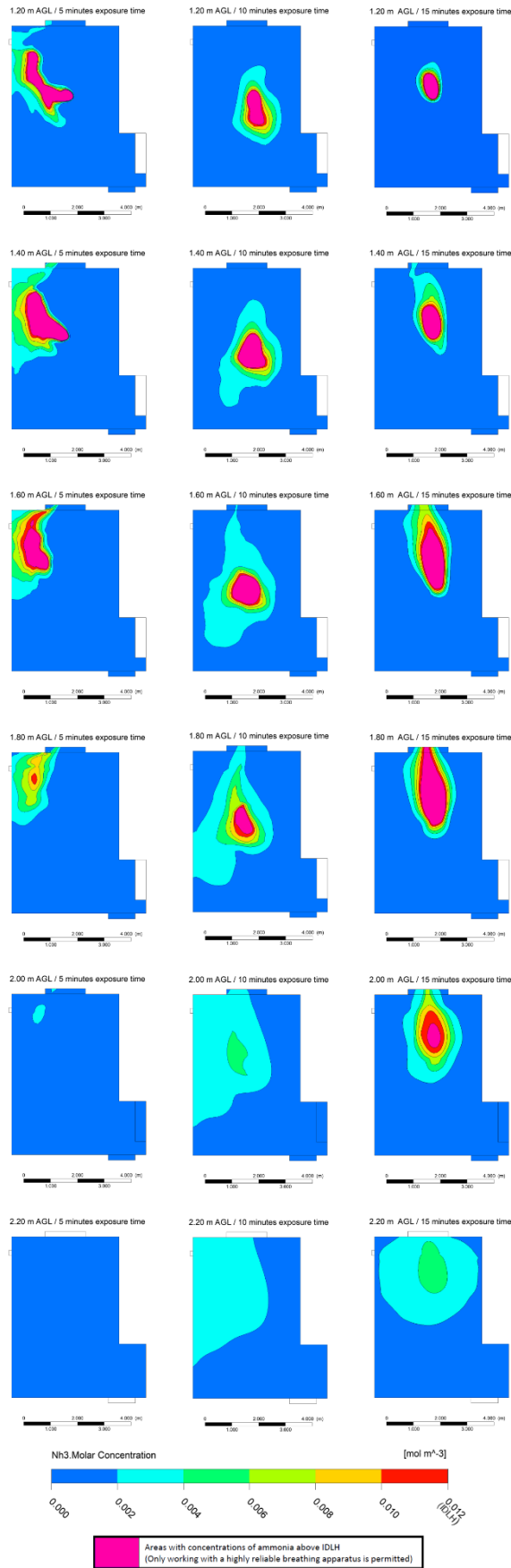
Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.10**, το νέφος συγκέντρωσης μεγαλύτερης του IDLH σε όλες τις εξεταζόμενες χρονικές στιγμές περιορίζεται κυρίως στο χώρο γύρω από την πηγή και προς το παράθυρο. Η χρονική στιγμή που το νέφος συγκέντρωσης μεγαλύτερης του IDLH καταλαμβάνει μεγαλύτερο όγκο και φτάνει σε ψηλότερα οριζόντια επίπεδα AGL είναι 15 λεπτά μετά την απελευθέρωση της αμμωνίας και εντοπίζεται μέχρι το οριζόντιο επίπεδο 2.00m AGL, στην περιοχή πάνω από τον εξοπλισμό του χώρου.

Στο **Σχήμα 4.11** παρουσιάζεται η κατανομή των συγκεντρώσεων της αμμωνίας στα επίπεδα x-z και y-z που τέμνουν κατακόρυφα την πηγή, κατά τη χρονική στιγμή 15 λεπτά μετά την απελευθέρωσή της και στο **Σχήμα 4.12** η κατανομή των συγκεντρώσεων της αμμωνίας σε διάφορα οριζόντια επίπεδα AGL, κατά τις χρονικές στιγμές 5, 10 και 15 λεπτά μετά την απελευθέρωση της.



Σχήμα 4.11: Η κατανομή των συγκεντρώσεων της αμμωνίας στο χώρο γραφείου 15 λεπτά μετά την απελευθέρωσή της, στα επίπεδα x-z και y-z που τέμνουν κατακόρυφα την πηγή, συγκριτικά με το IDLH.

Στον **Πίνακα 4.3** παρουσιάζεται η επιφάνεια που καταλαμβάνει το νέφος συγκέντρωσης μεγαλύτερης του IDLH σε καθένα από τα εξεταζόμενα οριζόντια επίπεδα, περιοχή η οποία απεικονίζεται στο **Σχήμα 4.12**. Τη χρονική στιγμή 5 λεπτά μετά την απελευθέρωση της αμμωνίας, η επιφάνεια του νέφους φαίνεται να είναι μεγαλύτερη στα χαμηλότερα επίπεδα ενώ καθώς ο χρόνος περνά στα υψηλότερα, επομένως επιβεβαιώνεται πως το νέφος αμμωνίας ανεβαίνει καθώς ο χρόνος περνάει.



Σχήμα 4.12: Η κατανομή των συγκεντρώσεων αμμωνίας σε διάφορα οριζόντια επίπεδα AGL, τις χρονικές στιγμές 5,10 και 15 λεπτά μετά την απελευθέρωσή της, συγκριτικά με το IDLH, στο χώρο γραφείου.

Αποτελέσματα

Τη χρονική στιγμή 15 λεπτά μετά την απελευθέρωση της αμμωνίας, οι επιφάνειες του νέφους συγκέντρωσης άνω του IDLH φαίνονται ελαφρώς μεγαλύτερες στα οριζόντια επίπεδα 1.60m, 1.80m και 2.00m AGL, συγκριτικά με τις αντίστοιχες επιφάνειες κατά τη χρονική στιγμή 10 λεπτά μετά την απελευθέρωση (**Πίνακας 4.3**). Αυτό οφείλεται στην συσσώρευση του νέφους, με την βοήθεια του ρεύματος αέρα, στην περιοχή μπροστά από το παράθυρο, πριν αυτό αρχίσει να εξέρχεται με ταχύτερο ρυθμό από τον χώρο, καθώς και στο γεγονός πως το νέφος δεν είναι ομοιογενές και έτσι, αν και η επιφάνειά του φαίνεται μεγαλύτερη, οι συγκεντρώσεις μέσα σε αυτό πέφτουν καθώς ο χρόνος περνάει (**Σχήμα 4.6** και **Σχήμα 4.7**).

Πίνακας 4.3: Επιφάνεια νέφους συγκέντρωσης μεγαλύτερης του IDLH σε διάφορα οριζόντια επίπεδα AGL στο χώρο γραφείου, τις χρονικές στιγμές 5, 10 και 15 λεπτά μετά την απελευθέρωσή της.

Horizontal level	exposure time: 5 min		exposure time: 10 min		exposure time: 15 min	
	Level area over IDLH		Level area over IDLH		Level area over IDLH	
	%	(m ²)	%	(m ²)	%	(m ²)
1.20 m AGL	5.66	1.47	4.41	1.15	3.13	0.81
1.40 m AGL	6.11	1.59	6.18	1.61	3.84	1.00
1.60 m AGL	2.38	0.62	4.10	1.07	4.52	1.18
1.80 m AGL	0.00	0.00	2.54	0.66	6.96	1.81
2.00 m AGL	0.00	0.00	0.00	0.00	0.48	0.12
2.20 m AGL	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

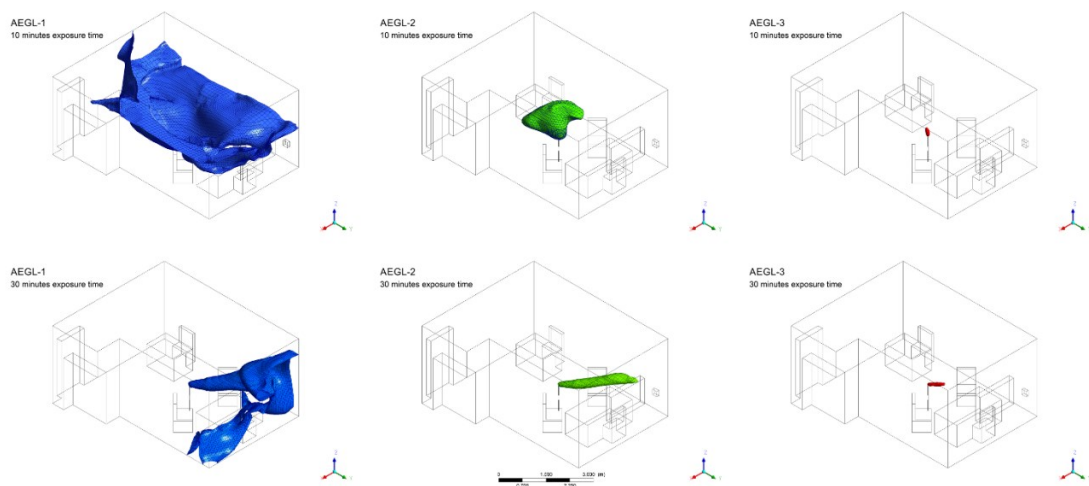
4.1.3.3 Όρια AEGIs αμμωνίας στον χώρο γραφείου

Οι οριακές τιμές AEGIs αντιπροσωπεύουν όρια κατωφλιού, πάνω από τα οποία οι χρήστες ενός χώρου μπορούν να βιώσουν ανεπιθύμητες επιπτώσεις στην υγεία τους. Γενικά, για κάθε χημικό παράγοντα ορίζονται τρία επίπεδα AEGL (AEGL-1, AEGL-2, AEGL-3), με διαβαθμισμένη σοβαρότητα των επιπτώσεων στην υγεία των χρηστών ενός χώρου, για συνολικά 5 χρονικές περιόδους έκθεσης. Στην παρούσα διατριβή, εξετάζονται τα AEGIs της αμμωνίας για χρόνο έκθεσης 10 και 30 λεπτών. Οι τροποποιημένες τιμές AEGIs για τις εξεταζόμενες περιόδους έκθεσης παρουσιάζονται στον **Πίνακας 4.2**.

Κατά την διάρκεια των πρώτων 10 λεπτών από την απελευθέρωση της αμμωνίας, ένα νέφος συγκέντρωσης που ξεπερνά το AEGL-1 σχηματίζεται στην μεγαλύτερη επιφάνεια των οριζοντίων επιπέδων του χώρου γραφείου, ξεκινώντας από εκείνο που βρίσκεται 1.00m AGL κοντά στη θέση της πηγής και φτάνοντας μέχρι την οροφή του χώρου (**Σχήμα 4.13**). Το νέφος απλώνεται σχεδόν σε όλη την επιφάνεια της οροφής, εκτός της νοτιοανατολικής περιοχής της, όπου η ταχύτητα του ρεύματος αέρα είναι μεγαλύτερη (**Σχήμα 4.3** και **Σχήμα 4.4**).

Σημειώνεται πως τα AEGIs είναι όρια κατωφλιού και όπως και στην περίπτωση του IDLH, τα νέφη συγκεντρώσεων μεγαλύτερων του κάθε AEGI δεν είναι ομοιογενή, αλλά περιλαμβάνουν όλες περιοχές μεγαλύτερων συγκεντρώσεων από την οριακή τιμή (**Σχήμα 4.6** και **Σχήμα 4.7**).

Το νέφος της αμμωνίας συσσωρεύεται κυρίως στις υψηλότερες περιοχές του χώρου, επομένως τα έπιπλα και ο εξοπλισμός δεν φαίνεται να έχουν σημαντική επίδραση στην διασπορά του. Καθώς ο χρόνος περνάει, ο εσωτερικός αέρας αποσυμφορείται μερικώς υπό την επίδραση του ρεύματος αέρα, αφήνοντας 30 λεπτά μετά την απελευθέρωση της αμμωνίας, σημαντικά μικρότερου όγκου νέφος συγκέντρωσης μεγαλύτερης του AEGI-1, το οποίο περιορίζεται στο βόρειο τμήμα του χώρου, όπου βρίσκεται το παράθυρο (pressure outlet).



Σχήμα 4.13: Νέφη συγκεντρώσεων μεγαλύτερων των οριακών τιμών AEGI για την αμμωνία στο χώρο γραφείου, για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτά.

Συγκεντρώσεις μικρότερες του AEGI-1 στα εξεταζόμενα επίπεδα αναπνοής

Οι περιοχές με σκούρο μπλε χρώμα στο **Σχήμα 4.14** και στο **Σχήμα 4.15**, αντιπροσωπεύουν τις περιοχές των επιπέδων αναπνοής 1.20m και 1.80m AGL, όπου οι συγκεντρώσεις της αμμωνίας δεν υπερβαίνουν το όριο AEGI-1, για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτών αντίστοιχα. Οι επιφάνειες των επιπέδων αναπνοής που καταλαμβάνουν τα νέφη αυτά παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.4**.

- Στο επίπεδο αναπνοής 1.20m AGL, τα νέφη συγκεντρώσεων χαμηλότερων του AEGI-1 καταλαμβάνουν το 65.69% (17.08m²) της επιφάνειας του επιπέδου αναπνοής για χρόνο έκθεσης 10 λεπτά και το 92.69% (24.10m²) για χρόνο έκθεσης 30 λεπτά.

Αποτελέσματα

- Στο επίπεδο αναπνοής 1.80m AGL, τα νέφη συγκεντρώσεων χαμηλότερων του AEG1-1 καταλαμβάνουν το 53.16% (13.82m²) της επιφάνειας του επιπέδου αναπνοής για χρόνο έκθεσης 10 λεπτά και το 85.37% (22.20m²) για χρόνο έκθεσης 30 λεπτά.

Οι περιοχές που καταλαμβάνονται από νέφη συγκεντρώσεων μικρότερων του AEG1-1 θεωρούνται γενικά ασφαλείς. Σε αυτές, οι χρήστες του χώρου είναι πιθανό να αισθανθούν ήπια και σταδιακά αυξανόμενη, αλλά παροδική και μη αδρανοποιητική όχληση των αισθητηρίων (όσφρηση, γεύση και όραση) ή να υποστούν κάποιες ασυμπτωματικές επιπτώσεις που δεν γίνονται αντιληπτές μέσω των αισθητηρίων οργάνων. Ωστόσο, η παρουσία του χημικού παράγοντα σε τόσο μικρή συγκέντρωση μπορεί να μην γίνει καν αντιληπτή. Στην περίπτωση του χώρου γραφείου και για τους δύο εξεταζόμενους χρόνους έκθεσης, οι περιοχές αυτές είναι μεγαλύτερες στο επίπεδο αναπνοής 1.20m AGL συγκριτικά με το 1.80m AGL, επομένως με την πάροδο του χρόνου η αμμωνία κινείται προς ψηλότερες θέσεις, όπως θα ήταν αναμενόμενο σαν χημικός παράγοντας ελαφρύτερος του αέρα.

Συγκεντρώσεις μεγαλύτερες του AEG1-1 στα εξεταζόμενα επίπεδα αναπνοής

Οι περιοχές με ανοιχτό μπλε χρώμα στο **Σχήμα 4.14** και το **Σχήμα 4.15** αντιπροσωπεύουν τις επιφάνειες των επιπέδων αναπνοής 1.20m και 1.80m AGL που καταλαμβάνουν νέφη συγκεντρώσεων μεγαλύτερων της οριακής τιμής AEG1-1, για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτών αντίστοιχα. Οι επιφάνειες των επιπέδων αναπνοής που καταλαμβάνουν τα νέφη αυτά παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.4**.

- Στο επίπεδο αναπνοής 1.20m AGL, τα νέφη συγκεντρώσεων μεγαλύτερων του AEG1-1 καταλαμβάνουν το 28.31% (7.36m²) της επιφάνειάς του επιπέδου για χρόνο έκθεσης 10 λεπτών και το 6.27% (1.63m²) για χρόνο έκθεσης 30 λεπτά.
- Στο επίπεδο αναπνοής 1.80m AGL, τα νέφη συγκεντρώσεων μεγαλύτερων του AEG1-1 καταλαμβάνουν το 42.62% (11.08m²) για χρόνο έκθεσης 10 λεπτών και το 14.63% (3.80m²) για χρόνο έκθεσης 30 λεπτά.

Οι περιοχές αυτές μπορούν να θεωρηθούν χαμηλής επικινδυνότητας, αφού οι συγκεντρώσεις της αμμωνίας δεν έχουν αδρανοποιητική δράση, οι χρήστες του χώρου ωστόσο μπορούν να αισθανθούν ήπια ενόχληση του ανώτερου αναπνευστικού συστήματος, ανεξαρτήτως της φυσικής τους δραστηριότητας και του αν ανήκουν σε ομάδες υψηλού κινδύνου. Η χαρακτηριστική οσμή της αμμωνίας σε τόσο μικρές συγκεντρώσεις μπορεί να

γίνει αντιληπτή, δεν μπορεί να θεωρηθεί όμως αξιόπιστος παράγοντας εντοπισμού της. Στην περίπτωση του χώρου γραφείου και για τους δύο εξεταζόμενους χρόνους έκθεσης, οι περιοχές αυτές είναι μεγαλύτερες στο επίπεδο αναπνοής 1.80m AGL συγκριτικά με το 1.20m AGL, αποδεικνύοντας και πάλι πως η αμμωνία κινείται προς ψηλότερες θέσεις καθώς ο χρόνος περνάει.

Συγκεντρώσεις μεγαλύτερες του AEGl-2 στα εξεταζόμενα επίπεδα αναπνοής

Οι περιοχές με πράσινο χρώμα στο **Σχήμα 4.14** και το **Σχήμα 4.15** αντιπροσωπεύουν τις επιφάνειες των επιπέδων αναπνοής 1.20m και 1.80m AGL που καταλαμβάνουν νέφη συγκεντρώσεων μεγαλύτερων της οριακής τιμής AEGl-2, για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτών αντίστοιχα. Οι επιφάνειες των επιπέδων αναπνοής που καταλαμβάνουν τα νέφη αυτά παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.4**.

- Στο επίπεδο αναπνοής 1.20m AGL, τα νέφη συγκεντρώσεων μεγαλύτερων του AEGl-2 καταλαμβάνουν το 5.83% (1.52m²) της επιφάνειας του επιπέδου για χρόνο έκθεσης 10 λεπτών και το 1.04% (0.27m²) για χρόνο έκθεσης 30 λεπτών.
- Στο επίπεδο αναπνοής 1.80m AGL, τα νέφη συγκεντρώσεων μεγαλύτερων του AEGl-2 καταλαμβάνουν το 4.22% (1.10m²) της επιφάνειάς του για χρόνο έκθεσης 10 λεπτών, ενώ για χρόνο έκθεσης 30 λεπτών δεν εντοπίζεται τέτοια περιοχή.

Οι περιοχές αυτές μπορούν να θεωρηθούν μέσης επικινδυνότητας. Οι χρήστες του χώρου αισθάνονται από ήπιο ως έντονο ερεθισμό των οφθαλμών και του λαιμού, βήχα ή δυσφορία, ενώ το νέφος είναι πιθανό να έχει αδρανοποιητική δράση. Στην περίπτωση του χώρου γραφείου και για τους δύο εξεταζόμενους χρόνους έκθεσης οι περιοχές αυτές είναι ελαφρώς μεγαλύτερες στο επίπεδο αναπνοής 1.20m AGL συγκριτικά με το επίπεδο 1.80m AGL και στις δύο περιπτώσεις όμως είναι σχετικά μικρές. Σε χρόνο έκθεσης 10 λεπτά, το νέφος συγκεντρώσεων μεγαλύτερων του AEGl-2 καταλαμβάνει ένα μικρό όγκο, όχι μεγαλύτερο από 1 m³, γύρω από την πηγή, που φτάνει σε ύψος μέχρι τα 1.80m AGL (**Σχήμα 4.13**). Στην περιοχή αυτή, τη δεδομένη χρονική στιγμή παρατηρούνται οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις της αμμωνίας, αφού αυτή ακόμα συσσωρεύεται και δεν έχει αρχίσει η διασπορά της (**Σχήμα 4.5**). Καθώς ο χρόνος περνάει, το νέφος συγκέντρωσης μεγαλύτερης του AEGl-2 διασπείρεται αποτελεσματικά κάτω από την επίδραση του ρεύματος αέρα και 30 λεπτά μετά την απελευθέρωση της αμμωνίας, δεν εντοπίζεται τέτοια περιοχή στο επίπεδο αναπνοής 1.80m AGL (**Σχήμα 4.15**).

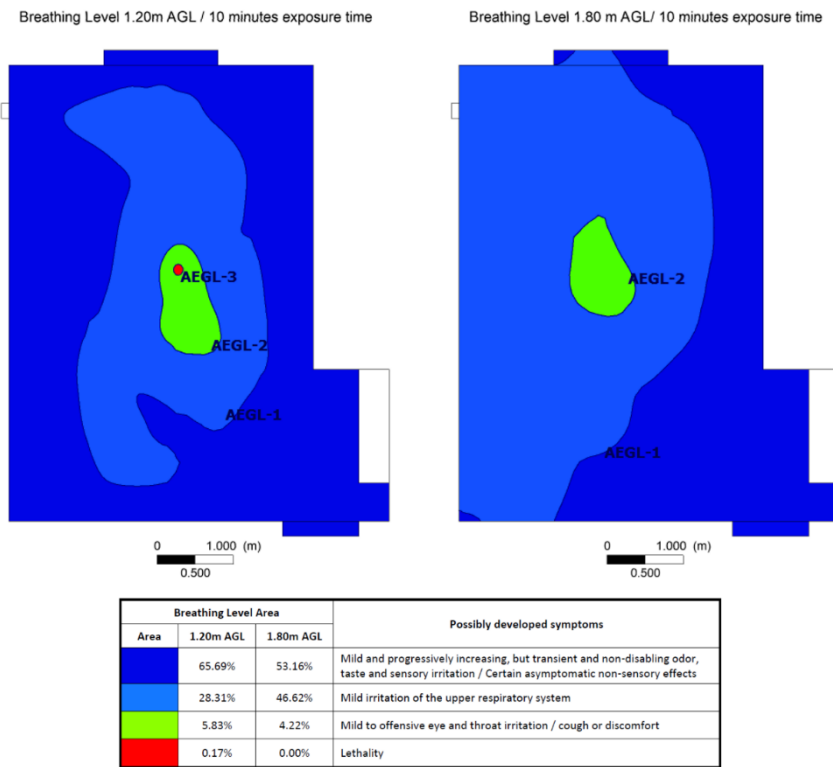
Αποτελέσματα

Συγκεντρώσεις μεγαλύτερες του AEGl-3 στα εξεταζόμενα επίπεδα αναπνοής

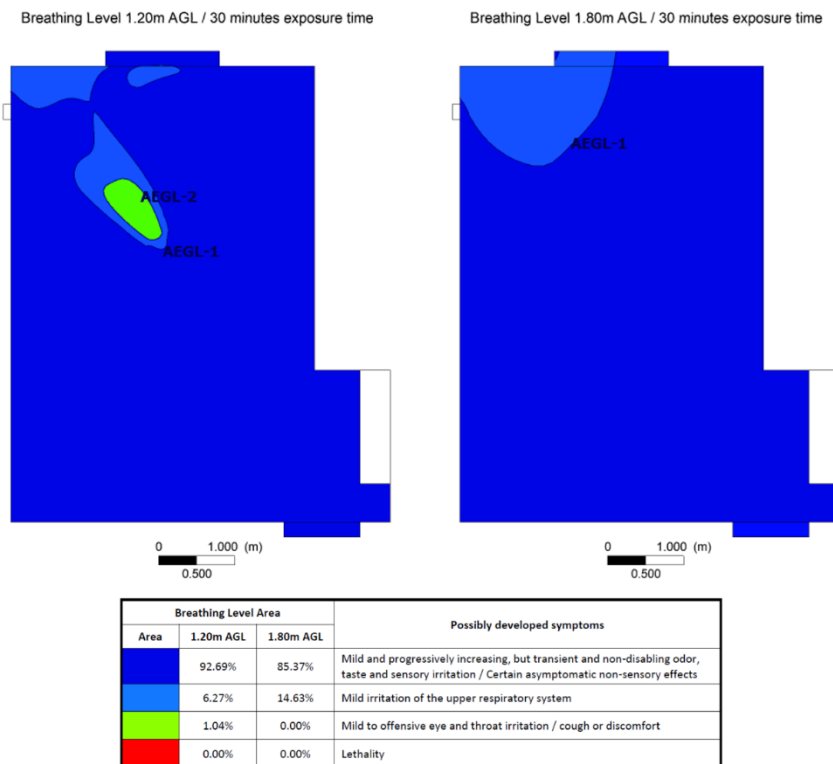
Κατά την διάρκεια των εξεταζόμενων διαστημάτων έκθεσης, δεν σχηματίζεται σε κανένα επίπεδο αναπνοής νέφος που η συγκέντρωσή του να υπερβαίνει το AEGl-3, πλην μιας μικρής περιοχής γύρω από την πηγή στο επίπεδο 1.20m AGL, στα 10 πρώτα λεπτά, η οποία θεωρείται αμελητέα (**Πίνακας 4.4** και περιοχή με κόκκινο χρώμα στο **Σχήμα 4.14**). Έτσι, στην περίπτωση του χώρου γραφείου δεν εντοπίζονται επικίνδυνες περιοχές για την αμμωνία, στις οποίες οι συγκεντρώσεις της θα έχουν αδρανοποιητική και θανατηφόρο δράση ή θα προκαλέσουν σοβαρές, μη αναστρέψιμες επιπτώσεις στην υγεία των χρηστών του χώρου.

Πίνακας 4.4: Επιφάνεια των επιπέδων αναπνοής που καταλαμβάνουν τα νέφη αμμωνίας συγκριτικά με τα AEGls, για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτά, στο χώρο γραφείου.

NH3 concentration		Breathing Level: 1.20m AGL		Breathing Level: 1.80m AGL	
		Level area		Level Area	
		(%)	(m ²)	(%)	(m ²)
exposure time 10 min	below AEGl-1	65.69	17.08	53.16	13.82
	over AEGl-1	28.31	7.36	42.62	11.08
	over AEGl-2	5.83	1.52	4.22	1.10
	over AEGl-3	0.17	0.04	0.00	0.00
	Total	100	26.00	100.00	26.00
exposure time 30 min	below AEGl-1	92.69	24.10	85.37	22.20
	over AEGl-1	6.27	1.63	14.63	3.80
	over AEGl-2	1.04	0.27	0.00	0.00
	over AEGl-3	0.00	0.00	0.00	0.00
	Total	100.00	26.00	100.00	26.00



Σχήμα 4.14: Οριακές τιμές AEGL για την αμμωνία στα επίπεδα αναπνοής 1.20m και 1.80m AGL, για χρόνο έκθεσης 10 λεπτά, στο χώρο γραφείου.



Σχήμα 4.15: Οριακές τιμές AEGL για την αμμωνία στα επίπεδα αναπνοής 1.20m και 1.80m AGL, για χρόνο έκθεσης 30 λεπτά, στο χώρο γραφείου.

Αποτελέσματα

4.1.4 Η περίπτωση του φωσγενίου στο χώρο γραφείου

Για την περίπτωση του φωσγενίου έγινε μέσω του CFD λογισμικού προσομοίωση της εκπομπής του στο χώρο από πηγή κυκλικής διατομής στο κέντρο αυτού, σε ύψος 1.00m AGL, για χρόνο ίσο με 5 sec και στη συνέχεια παρατηρήθηκε η διασπορά του στο χώρο για διάστημα 30 λεπτών, ομοίως με την περίπτωση της αμμωνίας. Η επιλογή της ποσότητας του φωσγενίου που απελευθερώθηκε, καθώς και του χρόνου εκπομπής του, βασίστηκε και σε αυτή την περίπτωση στην ποσότητα που θα μπορούσε να μεταφερθεί μέσα σε ένα μικρού μεγέθους δοχείο, το οποίο δεν θα γινόταν εύκολα αντιληπτό, από ένα και μόνο άτομο που θα ήθελε να δημιουργήσει ένα χημικό περιστατικό. Οι συγκεντρώσεις του φωσγενίου συγκρίθηκαν με το όριο IDLH και τα όρια AEGIs για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτών.

Για να είναι οι οριακές συγκεντρώσεις συμβατές με τις μονάδες που χρησιμοποιεί το CFD λογισμικό, ο **Πίνακας 1.3** και ο **Πίνακας 1.4** που παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 1 τροποποιήθηκαν ως εξής:

Πίνακας 4.5: Όριο IDLH για φωσγένιο (τροποποιημένο).

IDLH
$8.321 \text{ e}^{-5} \text{ mol/m}^3$

Πίνακας 4.6: Όρια AEGIs για φωσγένιο (τροποποιημένα).

Ταξινόμηση	10 min	30 min	Τελικό σημείο
AEGL-1	NR*	NR*	-
AEGL-2 (αδρανολοιητικό)	$2.528 \text{ e}^{-5} \text{ mol/m}^3$	$2.528 \text{ e}^{-5} \text{ mol/m}^3$	Χημική πνευμονία σε πειραματόζωα ποντίκια.
AEGL-3 (θανατηφόρο)	$1.517 \text{ e}^{-4} \text{ mol/m}^3$	$6.268 \text{ e}^{-5} \text{ mol/m}^3$	Μέγιστη συγκέντρωση που δεν προκαλεί θάνατο σε ποντίκια, μετά από 10 ή 30 λεπτά έκθεσης.

*NR = Not recommended due to insufficient data

Όπως περιεγράφηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 1 (**Ενότητα 1.4.2.4**) τα όρια AEGL για το φωσγένιο έχουν προκύψει από πειράματα σε ποντίκια εφαρμόζοντας κατάλληλους παράγοντες αβεβαιότητας. Λόγω της υψηλής τοξικότητας του χημικού παράγοντα, οι τιμές των οριακών τιμών IDLH και AEGL είναι αρκετά χαμηλές. Οι σοβαρές επιπτώσεις από την έκθεση σε τέτοιες συγκεντρώσεις μπορεί να εμφανιστούν ως και 72 ώρες μετά, υπάρχουν ωστόσο ήπιες επιπτώσεις στο ανώτερο αναπνευστικό, στα μάτια και στο δέρμα που προδίδουν έκθεση του ατόμου στον χημικό παράγοντα και οι οποίες μπορούν να γίνουν άμεσα αντιληπτές. Η αντιστοίχιση των ορίων AEGL που εξετάζονται στην παρούσα εργασία με τις άμεσες επιπτώσεις στους εκτιθέμενους, προκύπτουν από τον συνδυασμό του

Πίνακας 4.6 με τον **Πίνακας 1.5** και παρουσιάζονται στον **Πίνακας 4.7**.

Πίνακας 4.7: Αντιστοίχιση ορίων AEGL με άμεσες ήπιες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία

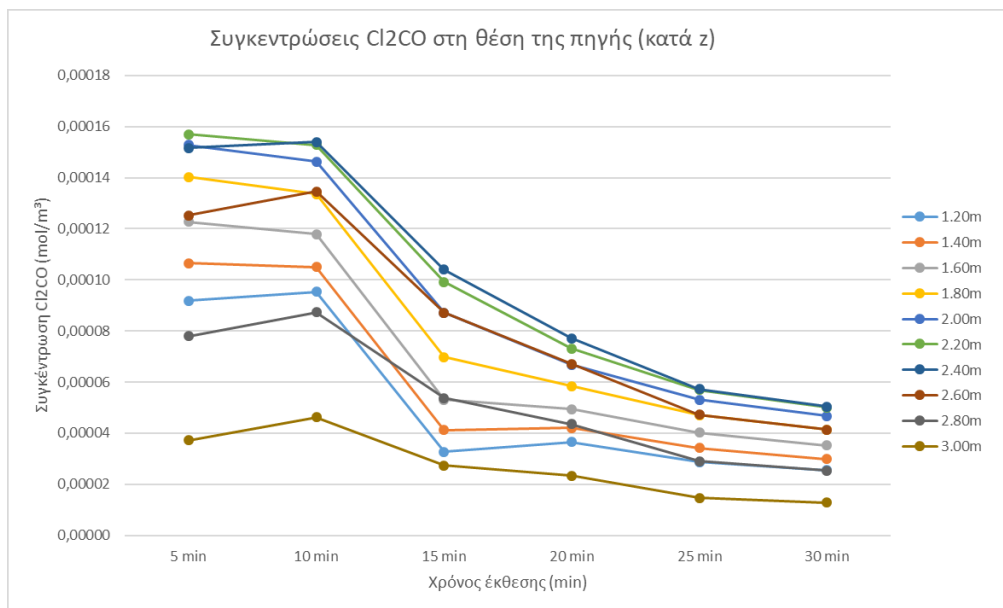
Ταξινόμηση	10 min	30 min	Τελικό σημείο
AEGL-1	NR*	NR*	-
AEGL-2 (αδρανοποιητικό)	$2.528 \text{ e}^{-5} \text{ mol/m}^3$	$2.528 \text{ e}^{-5} \text{ mol/m}^3$	Αντίληψη οσμής
AEGL-3 (θανατηφόρο)	$1.517 \text{ e}^{-4} \text{ mol/m}^3$	$6.268 \text{ e}^{-5} \text{ mol/m}^3$	10 min: Ερεθισμός των οφθαλμών, ρινικός ερεθισμός, ερεθισμός του λαιμού, βρογχιολικός ερεθισμός. 30 min: Αναγνώριση οσμής

*NR = Not recommended due to insufficient data

Σημειώνεται πως τα συμπτώματα που παρουσιάζουν οι χρήστες μετά από έκθεση σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες του AEGL-3 περιγράφονται σοβαρότερες για χρόνο έκθεσης 10 λεπτά σε σχέση με τις αντίστοιχες για χρόνο έκθεσης 30 λεπτά, γιατί η οριακή τιμή AEGL-3 για το φωσγένιο είναι αρκετά μεγαλύτερη για χρόνο έκθεσης 10 λεπτά σε σχέση με την αντίστοιχη για χρόνο έκθεσης 30 λεπτά (σχεδόν 2.5 φορές μεγαλύτερη).

4.1.4.1 Διασπορά του φωσγενίου στο χώρο γραφείου

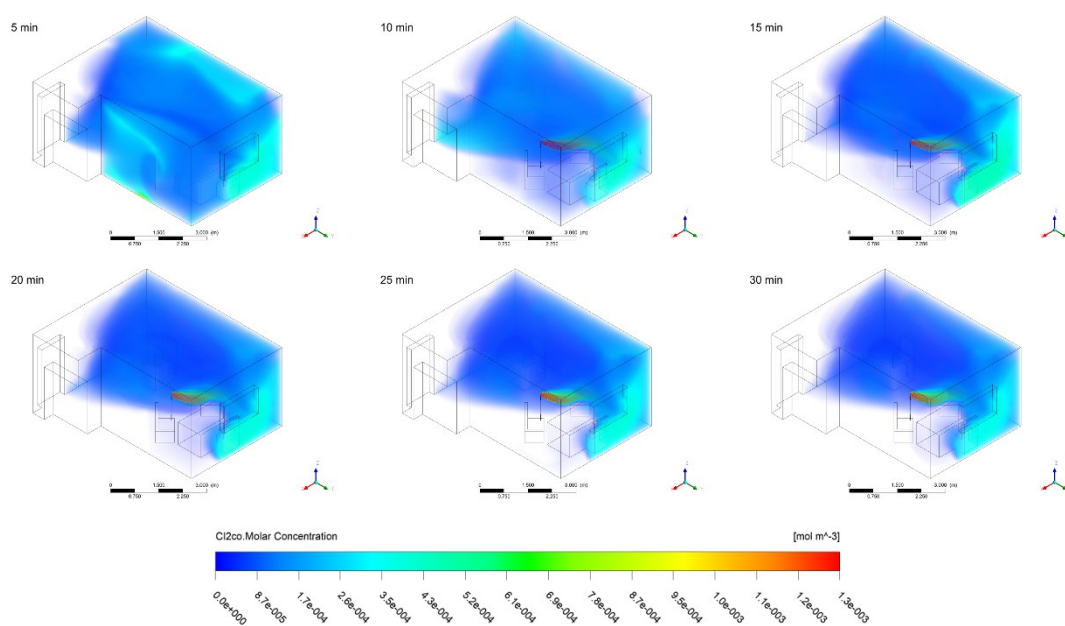
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης διασποράς του φωσγενίου, έδειξαν πως αμέσως μετά την εκπομπή του σχηματίζεται νέφος υψηλής συγκέντρωσης, αρχικά γύρω από την θέση της πηγής. Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις του νέφους πάνω από την πηγή παρατηρούνται 5 και 10 λεπτά μετά την απελευθέρωση του, σε όλα τα επίπεδα αναπνοής, με τις μεγαλύτερες τιμές στα επίπεδα από 1.60 m ως 2.60 m AGL (**Σχήμα 4.16**).



Σχήμα 4.16: Συγκεντρώσεις φωσγενίου στον χώρο γραφείου, στην θέση της πηγής κατά ύψος (z), σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωση του.

Αποτελέσματα

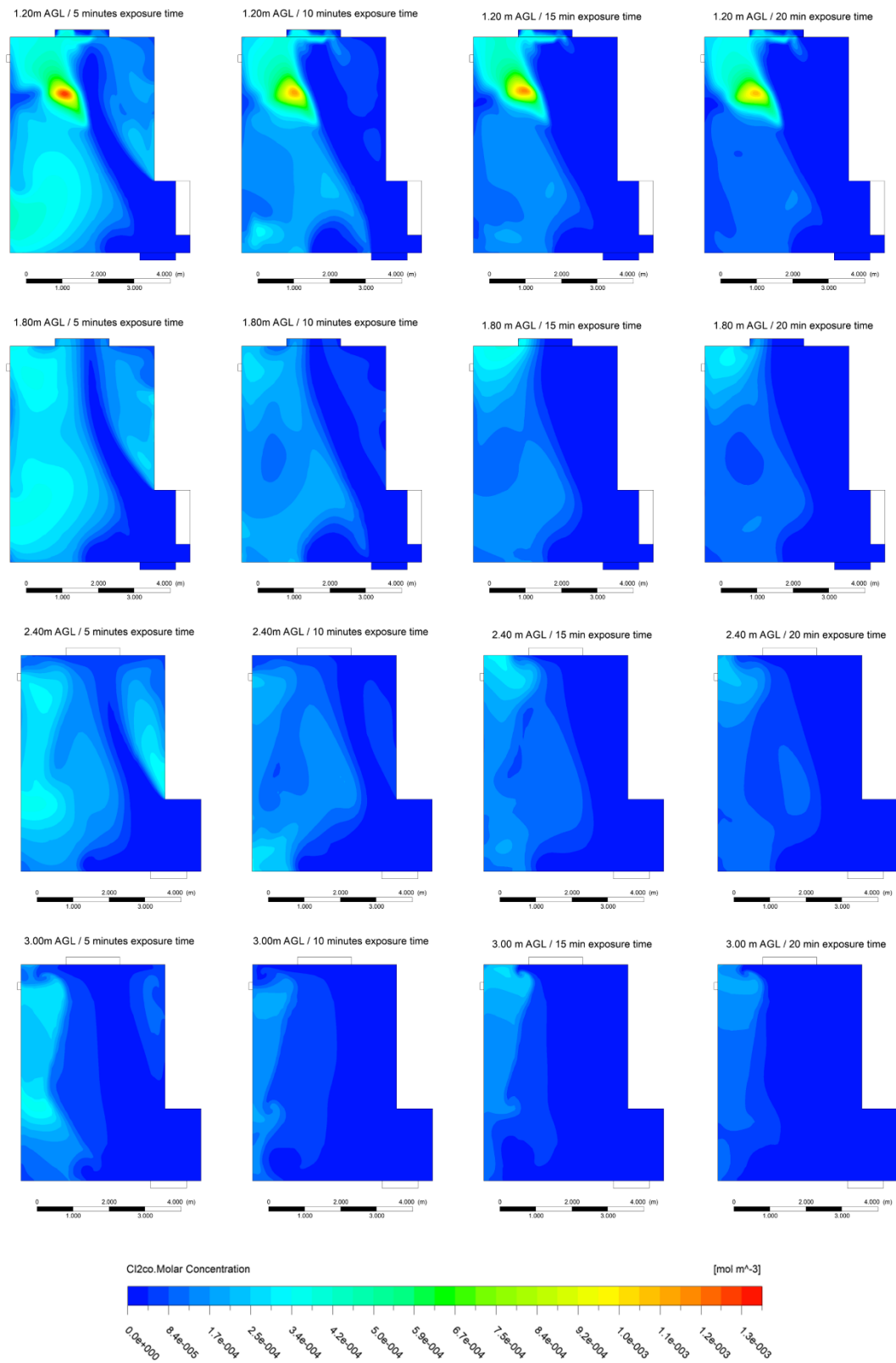
Στο **Σχήμα 4.17** παρουσιάζεται η διασπορά του φωσγενίου σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωσή του, υπό την επίδραση του ρεύματος αέρα. Τη χρονική στιγμή 5 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του, το νέφος φωσγενίου καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος του χώρου γραφείου, ενώ μετά τα 5 πρώτα λεπτά, το ρεύμα αέρα οδηγεί το μεγαλύτερο όγκο του νέφους προς την βορειοδυτική πλευρά του χώρου. Σε όλες τις υπόλοιπες εξεταζόμενες χρονικές στιγμές ο κύριος όγκος του νέφους μένει στη δυτική πλευρά του χώρου γραφείου, με τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις να παρατηρούνται στα βορειοδυτικά. Καθώς ο χρόνος περνά η συνολική συγκέντρωση του νέφους μειώνεται, σημειώνονται ωστόσο αρκετά υψηλές τιμές μέχρι και το τέλος του χρόνου παρακολούθησης.



Σχήμα 4.17: Διασπορά φωσγενίου στο χώρο γραφείου σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωσή του.

Το φωσγένιο είναι αέριο περίπου 3.5 φορές βαρύτερο από τον ξηρό αέρα και έτσι μετά την εκπομπή του είναι πιθανότερο να βρεθεί σε χαμηλές περιοχές, ρέοντας σε κατωφύριες. Η προσομοίωση δείχνει πως πραγματικά, νέφη μεγαλύτερων συγκεντρώσεων παρατηρούνται πιο κοντά στο δάπεδο, μεγάλες συγκεντρώσεις ωστόσο εντοπίζονται και σε ψηλότερα σημεία (**Σχήμα 4.18**). Αυτό οφείλεται στη μεγάλη ποσότητα του χημικού παράγοντα που χρησιμοποιήθηκε, αφού στόχος ήταν να δημιουργηθεί μια κατάσταση έκτακτης ανάγκης. Για ένα χώρο μικρού μεγέθους, όπως ο χώρος γραφείου, κάτι τέτοιο θα μπορούσε να επιτευχθεί και με μικρότερη ποσότητα του χημικού παράγοντα, επειδή ωστόσο οι προσομοιώσεις στο χώρο γραφείου έγιναν με σκοπό οι ρυθμίσεις που εφαρμόστηκαν σε αυτόν, να εφαρμοστούν και στον αρκετά μεγαλύτερο χώρο της αίθουσας εκδηλώσεων, η ποσότητα που χρησιμοποιήθηκε ήταν αρκετά μεγαλύτερη των εξεταζόμενων οριακών τιμών.

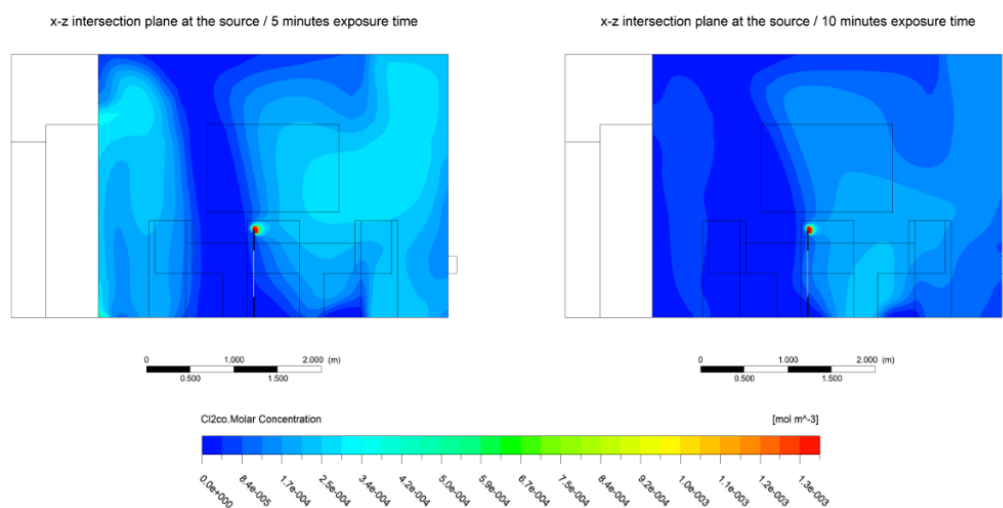
Έτσι, δημιουργούνται επικίνδυνες περιοχές στο μεγαλύτερο μέρος του χώρου γραφείου, για όλους τους εξεταζόμενους χρόνους έκθεσης (Σχήμα 4.17 και Σχήμα 4.18).



Σχήμα 4.18: Συγκεντρώσεις του νέφους φωσγενίου σε διάφορα επίπεδα AGL μέχρι την οροφή του χώρου γραφείου, τις χρονικές στιγμές 5, 10, 15 και 20 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του.

Αποτελέσματα

Σημειώνεται πως στο **Σχήμα 4.16** παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις μόνο πάνω από τη θέση της πηγής. Έτσι, οι αυξημένες συγκεντρώσεις στις θέσεις από 1.60 ως 2.60m AGL, σε σχέση με τις χαμηλότερες θέσεις 1.20m και 1.40m παρατηρούνται μόνο τοπικά και οφείλονται στην κίνηση του ρεύματος αέρα (**Σχήμα 4.19**).

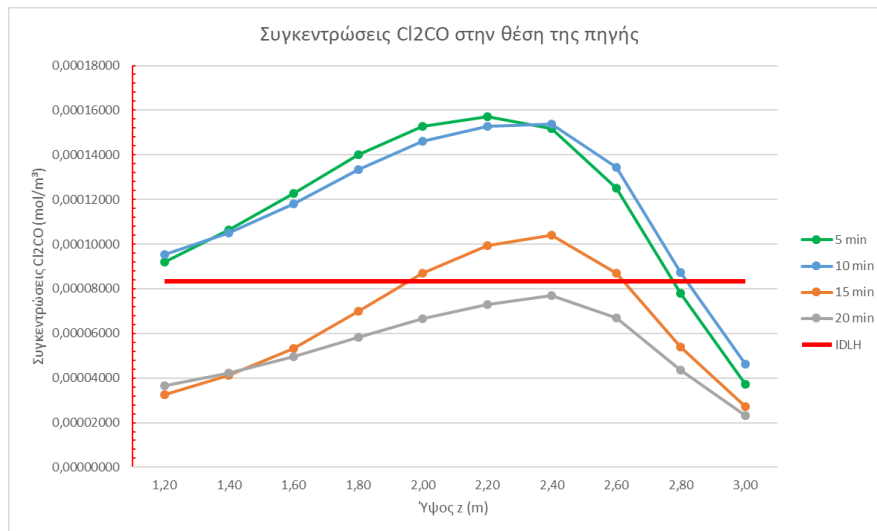


Σχήμα 4.19: Η κατανομή των συγκεντρώσεων φωσγενίου στο χώρο γραφείου 5 και 10 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του, στο επίπεδο x-z που τέμνει κατακόρυφα την πηγή.

4.1.4.2 Όριο IDLH φωσγενίου στο χώρο γραφείου

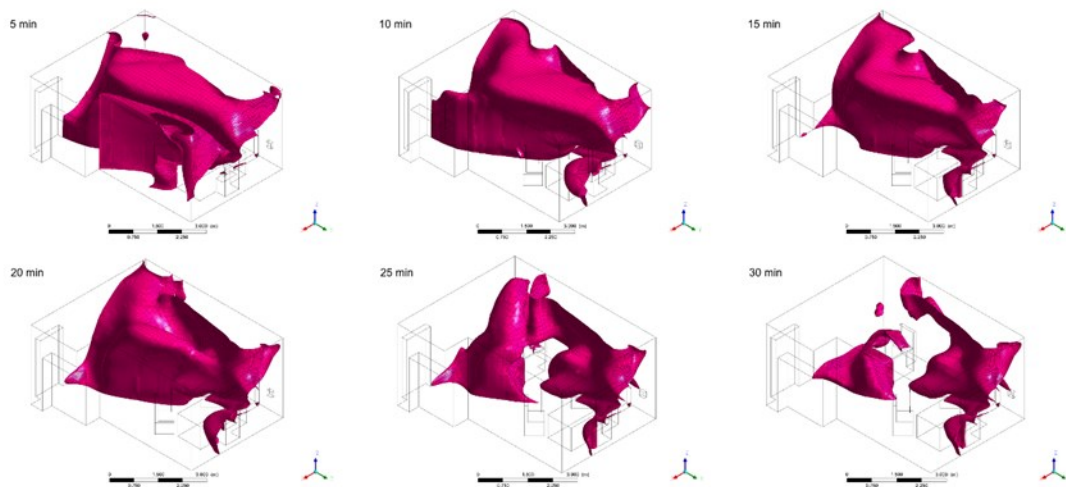
Το όριο IDLH για το φωσγένιο είναι $8.321 \text{ e}^{-5} \text{ mol/m}^3$ (**Πίνακας 4.5**). Τη χρονική στιγμή 5 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του στο χώρο γραφείου, στις θέσεις ακριβώς πάνω από την πηγή, η συγκέντρωση του νέφους φωσγενίου ξεπερνά το όριο IDLH σε όλα τα επίπεδα μέχρι του ύψους των 2.60 m AGL και ως τα 10 λεπτά έχει ξεπεράσει την IDLH και στο επίπεδο 2.80m AGL (**Σχήμα 4.20**).

Η οριακή τιμή IDLH φαίνεται να ξεπερνιέται στη θέση πάνω από την πηγή και 15 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του χημικού παράγοντα, στα επίπεδα από 2.00 m AGL ως 2.60m AGL, η εικόνα όμως είναι καλύτερη σε σχέση με την αντίστοιχη 10 λεπτά μετά την απελευθέρωση. Τη χρονική στιγμή 20 λεπτά μετά την απελευθέρωση του φωσγενίου, η οριακή τιμή IDLH δεν ξεπερνιέται σε καμία θέση AGL ακριβώς πάνω από την πηγή (**Σχήμα 4.20**).



Σχήμα 4.20: Συγκεντρώσεις φωσγενίου στο χώρο γραφείου, σε διάφορα ύψη πάνω από τη θέση της πηγής, για διάφορες χρονικές στιγμές από την απελευθέρωσή του, συγκριτικά με το IDLH.

Στο **Σχήμα 4.21** παρουσιάζεται το νέφος φωσγενίου συγκέντρωσης μεγαλύτερης του IDLH, σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωσή του. Σημειώνεται πως το IDLH είναι όριο κατωφλιού και επομένως σε όλα τα σημεία εντός του όγκου του η οριακή τιμή IDLH υπερβαίνεται, δεν είναι όμως ομοιογενές αλλά περιλαμβάνει όλα τα νέφη συγκεντρώσεων υψηλότερων της οριακής τιμής (**Σχήμα 4.17**). Το νέφος συγκέντρωσης μεγαλύτερο του IDLH καταλαμβάνει μεγάλο όγκο του περιβάλλοντος αέρα του γραφείου, σχεδόν για όλο τον χρόνο παρακολούθησης των 30 λεπτών. Η εικόνα φαίνεται να βελτιώνεται μετά τα 20 λεπτά από την απελευθέρωση του, χωρίς όμως το νέφος να διασπείρεται επαρκώς μέχρι το τέλος του χρόνου παρακολούθησης, ώστε η διαφυγή των χρηστών του χώρου από το μολυσμένο περιβάλλον να θεωρείται εξασφαλισμένη.



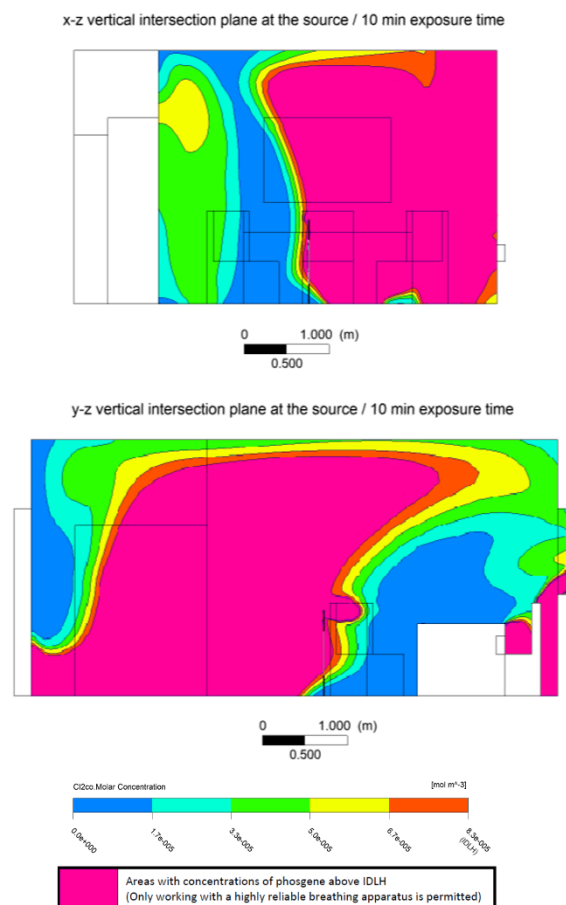
Σχήμα 4.21: Συγκεντρώσεις φωσγενίου μεγαλύτερες του IDLH στο χώρο γραφείου, σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωσή του.

Αποτελέσματα

Στο **Σχήμα 4.22** παρουσιάζεται η κατανομή των συγκεντρώσεων του φωσγενίου στα επίπεδα x-z και y-z που τέμνουν κατακόρυφα την πηγή, τη χρονική στιγμή 10 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του, όταν δηλαδή παρατηρείται υπέρβαση της οριακής τιμής IDLH πάνω από την πηγή στα περισσότερα οριζόντια επίπεδα AGL (**Σχήμα 4.20**).

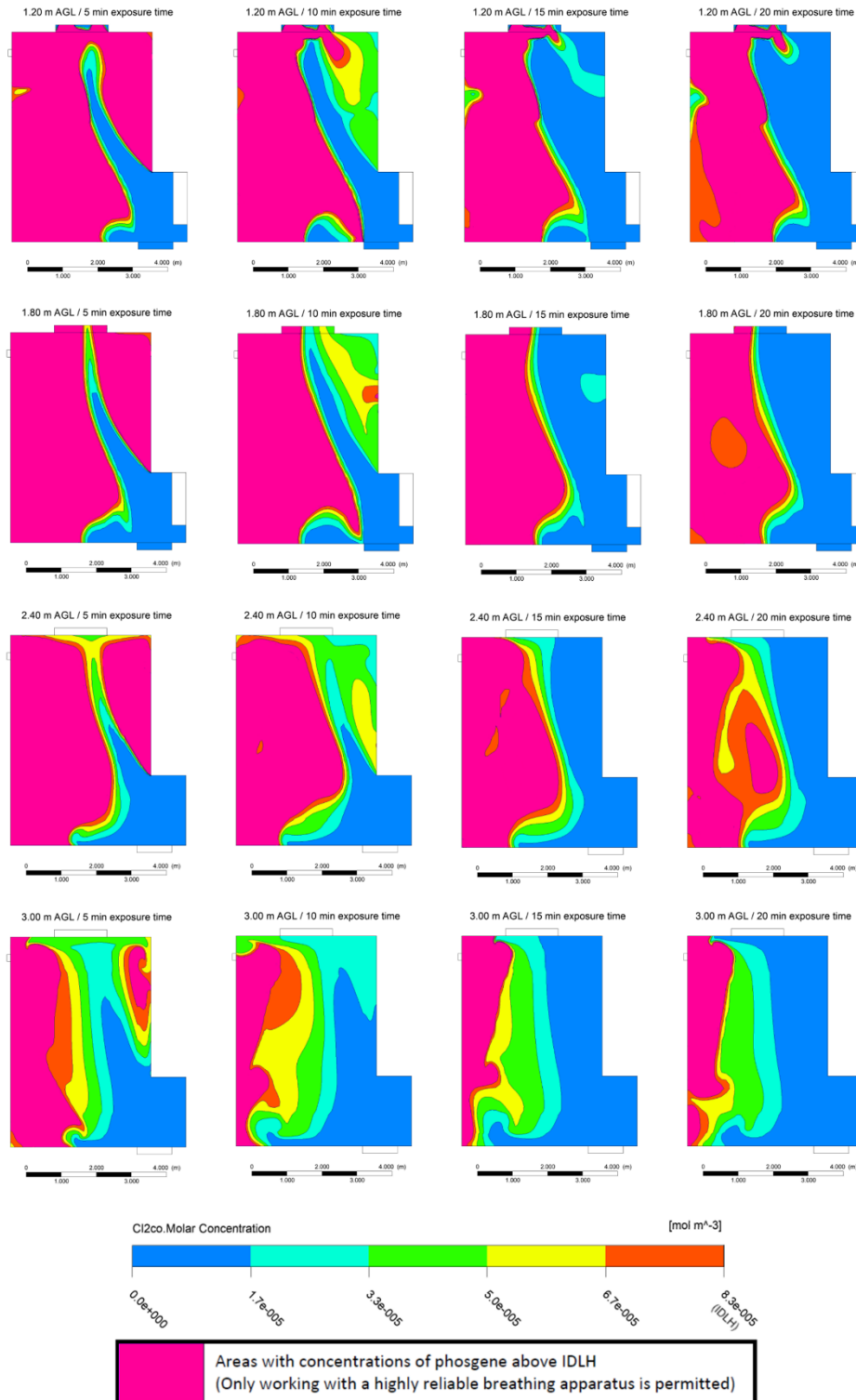
Στο κατακόρυφο επίπεδο x-z, φαίνεται πως το νέφος συγκεντρώσεων μεγαλύτερων του IDLH καταλαμβάνει τη δυτική πλευρά του χώρου γραφείου, ενώ στην ανατολική πλευρά, όπου βρίσκεται η πόρτα και το ρεύμα αέρα είναι πιο ισχυρό, δεν εντοπίζονται νέφη συγκεντρώσεων μεγαλύτερων της οριακής τιμής IDLH (**Σχήμα 4.22**).

Στο κατακόρυφο επίπεδο y-z, φαίνεται πως ο εξοπλισμός του χώρου επηρεάζει την κίνηση του φωσγενίου, το οποίο όντας ένας χημικός παράγοντας βαρύτερος του ξηρού αέρα τείνει να κινείται σε χαμηλότερα υψόμετρα και αφού καταλάβει τον χώρο σε αυτές τις περιοχές να εξαπλώνεται ψηλότερα. Ο εξοπλισμός του γραφείου φαίνεται να εμποδίζει το νέφος να καταλάβει όλη την χαμηλή περιοχή και έτσι αυτό κινείται προς ψηλότερα επίπεδα (**Σχήμα 4.22**).



Σχήμα 4.22: Η κατανομή των συγκεντρώσεων του φωσγενίου στο χώρο γραφείου 10 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του, στα επίπεδα x-z και y-z που τέμνουν κατακόρυφα την πηγή, συγκριτικά με το IDLH.

Στο **Σχήμα 4.23** παρουσιάζεται η κατανομή των συγκεντρώσεων του φωσγενίου στα δύο επίπεδα αναπνοής, καθώς και σε δύο επίπεδα πάνω από τη ζώνη αναπνοής, μέχρι και την οροφή του χώρου, κατά τις χρονικές στιγμές 5, 10, 15 και 20 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του.



Σχήμα 4.23: Η κατανομή των συγκεντρώσεων φωσγενίου στα επίπεδα αναπνοής και πάνω από αυτά, τις χρονικές στιγμές 5,10,15 και 20 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του, στο χώρο γραφείου.

Αποτελέσματα

Το νέφος συγκέντρωσης μεγαλύτερης του IDLH καταλαμβάνει σε όλα τα εξεταζόμενα επίπεδα μεγάλο μέρος της επιφάνειάς τους, σε αντίθεση με την αντίστοιχη εικόνα στην περίπτωση της αμμωνίας. Αυτό οφείλεται στις πολύ χαμηλότερες οριακές τιμές που ισχύουν για το φωσγένιο, μιας και είναι πολύ πιο τοξικός παράγοντας σε σχέση με την αμμωνία.

Τη χρονική στιγμή 5 λεπτά μετά την απελευθέρωση του φωσγενίου, ο κύριος όγκος του νέφους συγκεντρώσεων μεγαλύτερων του IDLH βρίσκεται στην δυτική πλευρά του χώρου, ωστόσο εντοπίζονται νέφη συγκεντρώσεων μεγαλύτερων του IDLH και στα βορειοανατολικά, σε όλα τα εξεταζόμενα επίπεδα. Σε όλες τις υπόλοιπες εξεταζόμενες χρονικές στιγμές, το νέφος συγκέντρωσης μεγαλύτερης του IDLH περιορίζεται στην δυτική πλευρά του χώρου γραφείου, σε όλα τα εξεταζόμενα επίπεδα (**Σχήμα 4.23**).

Στον **Πίνακα 4.8** παρουσιάζεται η επιφάνεια που καταλαμβάνει το νέφος φωσγενίου συγκέντρωσης μεγαλύτερης του IDLH σε καθένα από τα εξεταζόμενα οριζόντια επίπεδα, περιοχή η οποία απεικονίζεται στο **Σχήμα 4.23**.

Στον πίνακα φαίνεται πως σε κάθε εξεταζόμενη χρονική στιγμή, η επιφάνεια που καταλαμβάνει το νέφος συγκέντρωσης μεγαλύτερης του IDLH είναι μεγαλύτερη στα χαμηλότερα εξεταζόμενα επίπεδα συγκριτικά με τα ψηλότερα. Επιπλέον, σε κάθε εξεταζόμενο οριζόντιο επίπεδο, η επιφάνεια του νέφους μεγαλύτερου του IDLH μειώνεται καθώς ο χρόνος περνά. Εξάιρεση αποτελούν τα επίπεδα 2.40m και 3.00m AGL, κατά τις χρονικές στιγμές 10 και 15 λεπτά μετά την απελευθέρωση του φωσγενίου, όπου παρατηρείται μικρή αύξηση της επιφάνειας του νέφους, σημειώνεται ωστόσο πως αυτό δεν συνεπάγεται αύξηση των συγκεντρώσεων του φωσγενίου γενικά, αφού το νέφος συγκέντρωσης μεγαλύτερης του IDLH δεν είναι ομοιογενές. Έτσι, αν και η επιφάνειά του στα συγκεκριμένα οριζόντια επίπεδα τις δεδομένες χρονικές στιγμές είναι ελαφρώς μεγαλύτερη, οι συγκεντρώσεις μέσα σε αυτό μειώνονται καθώς ο χρόνος περνάει (**Σχήμα 4.18** και **Σχήμα 4.23**).

Πίνακας 4.8: Επιφάνεια νέφους φωσγενίου συγκέντρωσης μεγαλύτερης του IDLH σε διάφορα επίπεδα AGL, τις χρονικές στιγμές 5,10,15 και 20 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του, στο χώρο γραφείου.

Horizontal level	exposure time: 5 min		exposure time: 10 min		exposure time: 15 min		exposure time: 20 min	
	Level area over IDLH		Level area over IDLH		Level area over IDLH		Level area over IDLH	
	%	(m ²)	%	(m ²)	%	(m ²)	%	(m ²)
1.20 m AGL	68.94	17.92	52.35	13.61	43.97	11.43	36.26	9.43
1.80 m AGL	60.79	15.81	40.83	10.62	38.32	9.96	32.04	8.33
2.40 m AGL	52.24	13.58	32.71	8.50	35.04	9.11	27.57	7.17
3.00 m AGL	37.24	9.68	23.26	6.05	27.16	7.06	25.76	6.70

Το γεγονός πως νέφη συγκεντρώσεων μεγαλύτερων του IDLH εντοπίζονται μέχρι την οροφή του χώρου ακόμα και 30 λεπτά μετά την απελευθέρωση του φωσγενίου στο χώρο (**Σχήμα 4.21**) οφείλεται στη μεγάλη ποσότητα του χημικού παράγοντα που χρησιμοποιήθηκε με σκοπό να προκληθεί ένα χημικό περιστατικό, στο ασθενές ρεύμα αέρα υπό την επίδραση του οποίου γίνεται η αποσυμφόρηση του χώρου, στο χαμηλό όριο IDLH για το φωσγένιο λόγω της μεγάλης τοξικότητάς του, αλλά και στον εξοπλισμό του χώρου που «εμποδίζει» το φωσγένιο να καταλάβει όλο τον χώρο κοντά στο έδαφος, ωθώντας το και προς υψηλότερα σημεία.

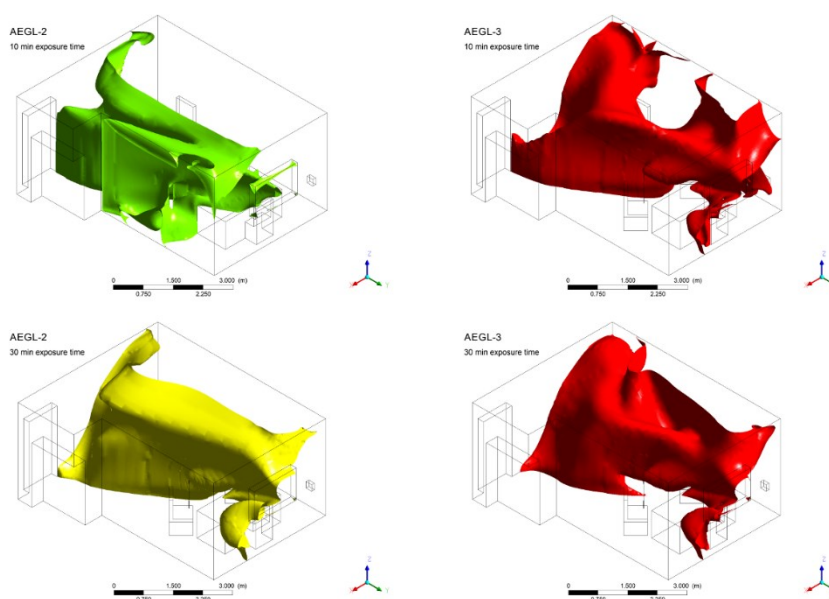
4.1.4.3 Όρια AEGIs φωσγενίου στο χώρο γραφείου

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής εξετάζονται οι συγκεντρώσεις του φωσγενίου που αντιστοιχούν στις οριακές τιμές AEGI του χημικού παράγοντα για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτών, όπως αυτές τροποποιήθηκαν και παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.6** και την αντιστοίχισή τους με τις άμεσες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, που παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.7**. Σημειώνεται πως για το φωσγένιο δεν ορίζεται όριο AEGI-1 λόγω ανεπάρκειας δεδομένων.

Σε χρόνο 10 λεπτά από την απελευθέρωση του φωσγενίου, νέφη συγκεντρώσεων μεγαλύτερων του AEGI-2 και AEGI-3 καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος του όγκου του χώρου γραφείου, τα οποία εντοπίζονται σε όλα τα οριζόντια επίπεδα από το δάπεδο μέχρι την οροφή του χώρου. Νέφος συγκέντρωσης μεγαλύτερης του AEGI-2 εντοπίζεται σχεδόν στο σύνολο του όγκου του χώρου, ενώ το νέφος συγκέντρωσης μεγαλύτερης του AEGI-3 εντοπίζεται κυρίως στην δυτική πλευρά του χώρου, όπου το ρεύμα αέρα είναι πιο ασθενές (**Σχήμα 4.24**). Σημειώνεται πως τα AEGIs είναι όρια κατωφλιού και όπως και στην περίπτωση του IDLH, τα νέφη συγκεντρώσεων μεγαλύτερων των AEGIs δεν είναι ομοιογενή, αλλά έχουν και περιοχές με συγκεντρώσεις πολύ μεγαλύτερες των οριακών τιμών (**Σχήμα 4.17**).

Το ρεύμα του αέρα φαίνεται να διασπείρει σε ένα βαθμό τον χημικό παράγοντα και έτσι σε χρόνο έκθεσης 30 λεπτών και το νέφος συγκέντρωσης μεγαλύτερης του AEGI-2 περιορίζεται στην δυτική κυρίως πλευρά του χώρου. Ωστόσο, το ρεύμα αέρα δεν είναι ικανό να αποσυμφορήσει τον περιβάλλοντα αέρα από την παρουσία του φωσγενίου μέσα στο εξεταζόμενο χρονικό διάστημα, αφού τα νέφη συγκεντρώσεων μεγαλύτερων των AEGIs εξακολουθούν να καταλαμβάνουν μεγάλο μέρος του όγκου του χώρου ακόμα και 30 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του χημικού παράγοντα (**Σχήμα 4.24**).

Αποτελέσματα



Σχήμα 4.24: Νέφη συγκεντρώσεων μεγαλύτερων των οριακών τιμών AEGL για το φωσγένιο στο χώρο γραφείου, για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτών.

Συγκεντρώσεις μικρότερες του AEGL-2 στα εξεταζόμενα επίπεδα αναπνοής

Οι περιοχές με ανοιχτό μπλε χρώμα στο **Σχήμα 4.25** και με γαλάζιο χρώμα στο **Σχήμα 4.26**, αντιπροσωπεύουν τις περιοχές των επιπέδων αναπνοής 1.20m και 1.80m AGL, όπου η συγκέντρωση του φωσγενίου δεν υπερβαίνει την οριακή τιμή AEGL-2 για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτών. Οι επιφάνειες των επιπέδων αναπνοής που καταλαμβάνουν τα νέφη αυτά παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.9**.

- Στο επίπεδο αναπνοής 1.20m AGL, τα νέφη συγκεντρώσεων μικρότερων του AEGL-2 καταλαμβάνουν το 24.20% (6.30m²) της επιφάνειας του επιπέδου αναπνοής για χρόνο έκθεσης 10 λεπτών και το 45.24% (11.76m²) για χρόνο έκθεσης 30 λεπτών.
- Στο επίπεδο αναπνοής 1.80m AGL, τα νέφη συγκεντρώσεων μικρότερων του AEGL-2 καταλαμβάνουν το 33.49% (8.70m²) της επιφάνειάς του επιπέδου αναπνοής για χρόνο έκθεσης 10 λεπτών και το 58.65% (15.25m²) για χρόνο έκθεσης 30 λεπτών.

Στις περιοχές με νέφη συγκεντρώσεων μικρότερων του AEGL-2, οι χρήστες του χώρου δεν αντιλαμβάνονται την παρουσία του χημικού παράγοντα με τις αισθήσεις τους (όσφρηση, γεύση, όραση) και οι συγκεντρώσεις του φωσγενίου δεν έχουν αδρανοποιητική δράση. Η απουσία ερεθισμάτων που θα μπορούσαν να προειδοποιήσουν εγκαίρως τους χρήστες του χώρου για την παρουσία του χημικού παράγοντα, μπορεί να παρατείνει τον χρόνο έκθεσής τους και να οδηγήσει πιθανώς στην έκθεσή τους σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις.

Συγκεντρώσεις μεγαλύτερες του AEGl-2 στα εξεταζόμενα επίπεδα αναπνοής

Οι περιοχές με πράσινο χρώμα στο **Σχήμα 4.25** και κίτρινο χρώμα στο **Σχήμα 4.26** αντιπροσωπεύουν τις περιοχές των επιπέδων αναπνοής 1.20m και 1.80m AGL, όπου η συγκέντρωση του φωσγενίου υπερβαίνει την τιμή AEGl-2, για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτών αντίστοιχα. Οι επιφάνειες των επιπέδων αναπνοής που καταλαμβάνουν τα νέφη αυτά παρουσιάζονται στον **Πίνακας 4.9**.

- Στο επίπεδο αναπνοής 1.20m AGL, τα νέφη συγκεντρώσεων μεγαλύτερων του AEGl-2 καταλαμβάνουν το 39.13% (10.17m²) της επιφάνειάς του επιπέδου αναπνοής για χρόνο έκθεσης 10 λεπτών και το 16.32%(4.25m²) για χρόνο έκθεσης 30 λεπτών.
- Στο επίπεδο αναπνοής 1.80m AGL, τα νέφη συγκεντρώσεων μεγαλύτερων του AEGl-2 καταλαμβάνουν το 41.10% (10.69m²) της επιφάνειας του επιπέδου αναπνοής για χρόνο έκθεσης 10 λεπτών και το 7.35% (1.91m²) για χρόνο έκθεσης 30 λεπτών.

Οι περιοχές αυτές μπορούν να θεωρηθούν επικίνδυνες, αφού οι συγκεντρώσεις του φωσγενίου έχουν αδρανοποιητική δράση και δεν επιτρέπουν την ασφαλή διαφυγή των χρηστών από το μολυσμένο περιβάλλον. Οι χρήστες του χώρου είναι πιθανό να μπορούν να αντιληφθούν την οσμή του χημικού παράγοντα στο χώρο και στους δύο εξεταζόμενους χώρους έκθεσης, δεν μπορούν ωστόσο να την ταυτοποιήσουν (**Πίνακας 4.7**), με αποτέλεσμα να υπάρχει και σε αυτές τις περιοχές κίνδυνος παράτασης του χρόνου έκθεσης. Η έκθεση σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες του AEGl-2 μπορεί να προκαλέσει στους χρήστες χημική πνευμονία, η οποία μπορεί να εκδηλωθεί μέχρι και 72 ώρες μετά την έκθεση.

Συγκεντρώσεις μεγαλύτερες του AEGl-3 στα εξεταζόμενα επίπεδα αναπνοής

Οι περιοχές με κόκκινο χρώμα στο **Σχήμα 4.25** και στο **Σχήμα 4.26** αντιπροσωπεύουν τις περιοχές των επιπέδων αναπνοής 1.20m και 1.80m AGL, όπου η συγκέντρωση του φωσγενίου υπερβαίνει την τιμή AEGl-3, για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτών. Οι επιφάνειες των επιπέδων αναπνοής που καταλαμβάνουν τα νέφη αυτά παρουσιάζονται στον **Πίνακας 4.9**.

- Στο επίπεδο αναπνοής 1.20m AGL, τα νέφη συγκεντρώσεων μεγαλύτερων του AEGl-3 καταλαμβάνουν το 36.67% (9.53m²) της επιφάνειας του επιπέδου αναπνοής για χρόνο έκθεσης 10 λεπτών και το 38.44% (9.99m²) για χρόνο έκθεσης 30 λεπτών.

Αποτελέσματα

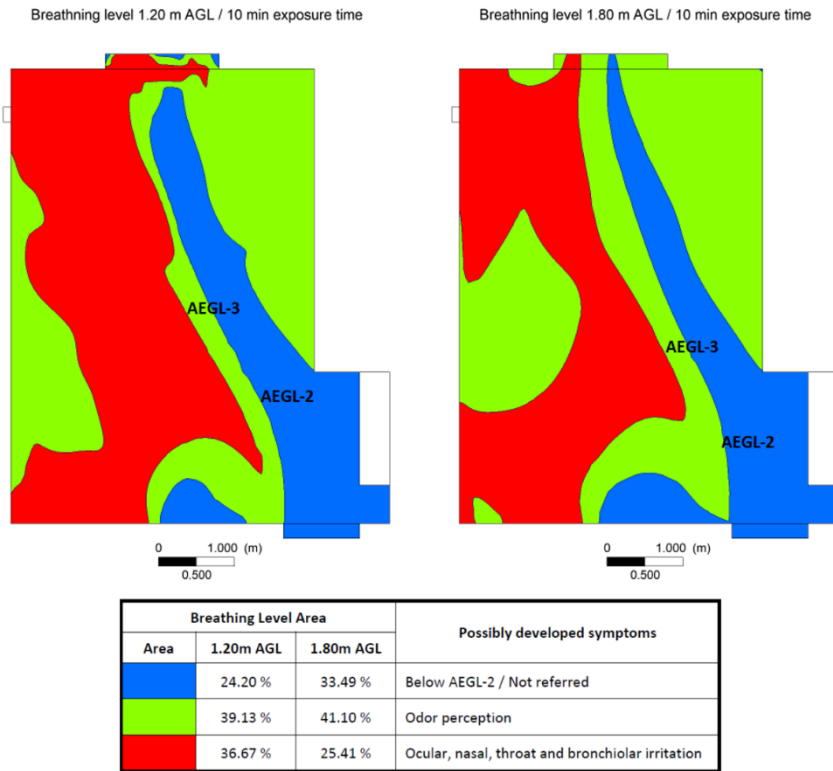
- Στο επίπεδο αναπνοής 1.80m AGL, τα νέφη συγκεντρώσεων μεγαλύτερων του AEGl-3 καταλαμβάνουν το 25.41% (6.61m²) της επιφάνειας του επιπέδου αναπνοής για χρόνο έκθεσης 10 λεπτών και το 34.00% (8.84m²) για χρόνο έκθεσης 30 λεπτών.

Οι περιοχές αυτές θεωρούνται εξαιρετικά επικίνδυνες, αφού οι συγκεντρώσεις φωσγενίου μεγαλύτερες του AEGl-3 είναι και για τις δύο χρονικές περιόδους έκθεσης θανατηφόρες, ακόμα κι αν ο θάνατος επέλθει μεταγενέστερα. Σε χρόνο έκθεσης 10 λεπτά, οι χρήστες του χώρου που βρίσκονται στις περιοχές υπέρβασης του AEGl-3 (**Σχήμα 4.25**) είναι πιθανό να εμφανίσουν συμπτώματα, όπως ερεθισμό των οφθαλμών, ρινικό ερεθισμό, ερεθισμό του λαιμού και βρογχιολικό ερεθισμό. Σε χρόνο έκθεσης 30 λεπτά τα παραπάνω συμπτώματα δεν είναι πιθανό να παρουσιαστούν στους χρήστες του χώρου που βρίσκονται στις περιοχές υπέρβασης (**Σχήμα 4.26**), αυτοί ωστόσο είναι σε θέση να αντιληφθούν και να αναγνωρίσουν την οσμή του χημικού παράγοντα.

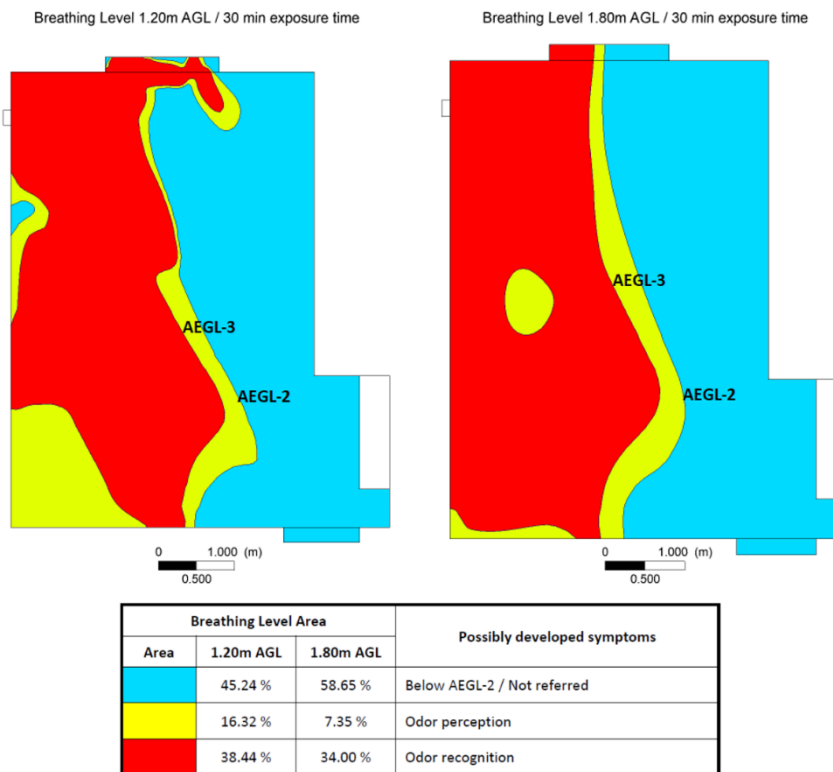
Σημειώνεται πως τα συμπτώματα που παρουσιάζουν οι χρήστες μετά από έκθεση σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες του AEGl-3 περιγράφονται σοβαρότερα για χρόνο έκθεσης 10 λεπτά σε σχέση με τα αντίστοιχα για χρόνο έκθεσης 30 λεπτά, γιατί η οριακή τιμή AEGl-3 για το φωσγένιο είναι αρκετά μεγαλύτερη για χρόνο έκθεσης 10 λεπτά σε σχέση με την αντίστοιχη για χρόνο έκθεσης 30 λεπτά (**Πίνακας 4.7**).

Πίνακας 4.9: Επιφάνεια των επιπέδων αναπνοής που καταλαμβάνουν τα νέφη φωσγενίου συγκριτικά με τα AEGl, για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτά, στο χώρο γραφείου.

COCl ₂ concentration		Breathing Level: 1.20m AGL		Breathing Level: 1.80m AGL	
		Level area		Level Area	
		(%)	(m ²)	(%)	(m ²)
exposure time 10	below AEGl-2	24.20	6.30	33.49	8.70
	over AEGl-2	39.13	10.17	41.10	10.69
	over AEGl-3	36.67	9.53	25.41	6.61
	Total	100	26.00	100.00	26.00
exposure time 30	below AEGl-2	45.24	11.76	58.65	15.25
	over AEGl-2	16.32	4.25	7.35	1.91
	over AEGl-3	38.44	9.99	34.00	8.84
	Total	100.00	26.00	100.00	26.00



Σχήμα 4.25: Οριακές τιμές AEGL για το φωσγένιο, στα επίπεδα αναπνοής 1.20m και 1.80m AGL, για χρόνο έκθεσης 10 λεπτά, στο χώρο γραφείου.



Σχήμα 4.26: Οριακές τιμές AEGL για το φωσγένιο, στα επίπεδα αναπνοής 1.20m και 1.80m AGL, για χρόνο έκθεσης 30 λεπτά, στο χώρο γραφείου.

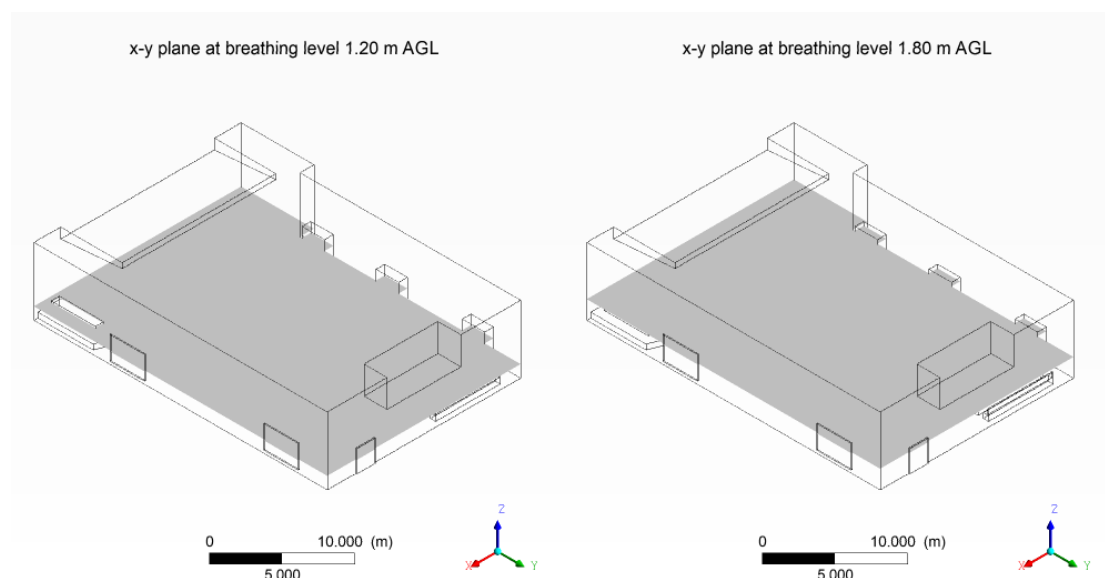
4.2 Η αίθουσα εκδηλώσεων «Γεώργιος Μυλωνάς»

4.2.1 Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων στην αίθουσα εκδηλώσεων

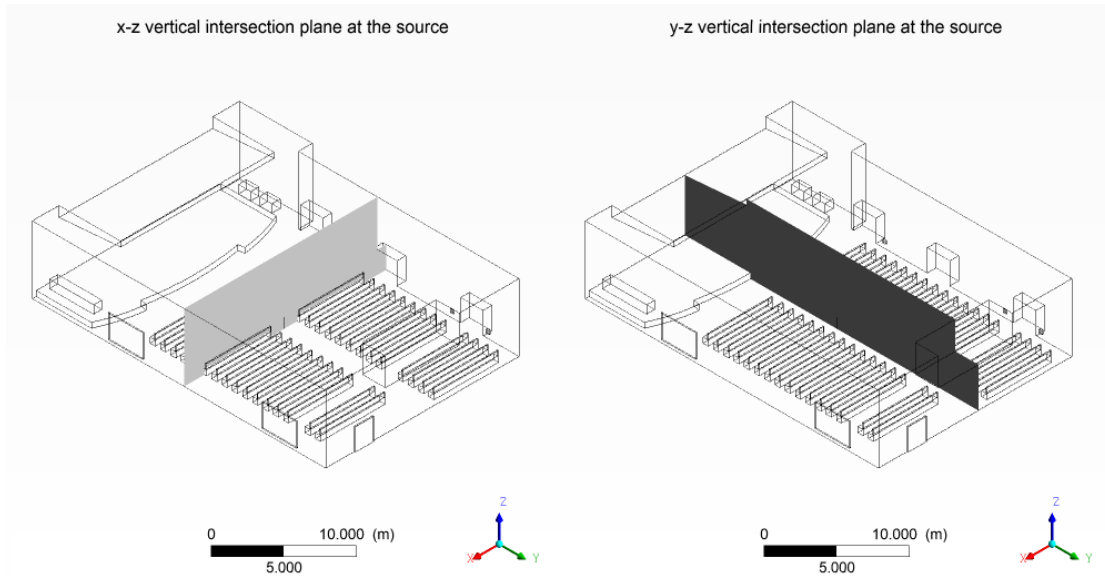
Οι συγκεντρώσεις των δύο χημικών παραγόντων εξετάζονται σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωσή τους, σε μια σειρά από οριζόντια επίπεδα AGL, με έμφαση στην περίπτωση των AEGIs στα επίπεδα αναπνοής 1.20m και 1.80m AGL, ομοίως με τον χώρο γραφείου. Στο **Σχήμα 4.27** απεικονίζονται τα εξεταζόμενα επίπεδα αναπνοής. Όλα τα υπόλοιπα οριζόντια επίπεδα που χρησιμοποιήθηκαν κατά περίπτωση για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων είναι παράλληλα σε αυτά.

Τα νέφη συγκεντρώσεων μεγαλύτερων του IDLH παρουσιάζονται επίσης σε δύο κατακόρυφα επίπεδα, τα οποία τέμνουν την πηγή κατά τη διεύθυνση x-z και y-z (**Σχήμα 4.28**). Επιπλέον, εξετάστηκαν οι συγκεντρώσεις των χημικών παραγόντων σε διάφορα ύψη από το δάπεδο ως την οροφή του χώρου στη θέση της πηγής, καθώς και σε 6 συνολικά θέσεις (“A”, “B”, “C”, “D”, “E”, “F”), όπου παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις κατά τις εξεταζόμενες περιόδους έκθεσης. Οι 6 θέσεις όπου εξετάστηκαν οι συγκεντρώσεις των χημικών παραγόντων καθ’ ύψος, καθώς και η θέση της πηγής παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.29**.

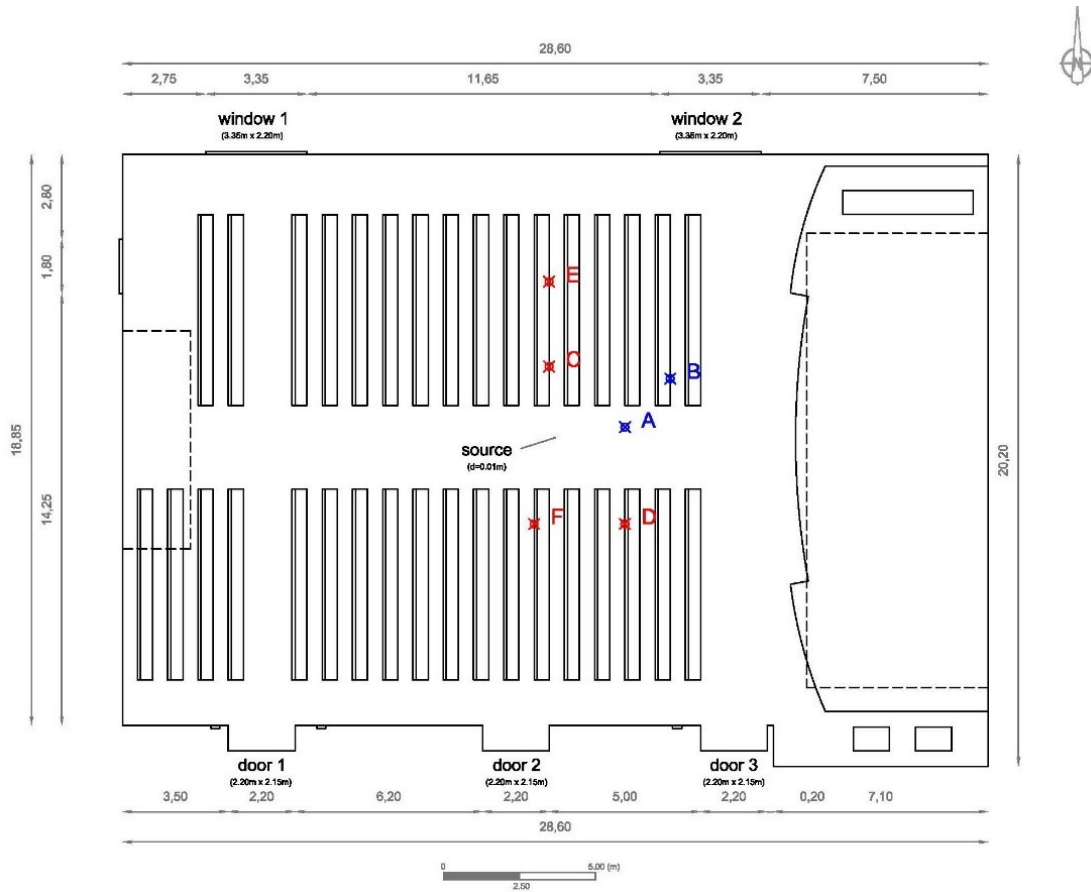
Τέλος, τα νέφη των συνολικών συγκεντρώσεων των χημικών παραγόντων, τα νέφη που αντιστοιχούν στις οριακές τιμές IDLH για διάφορες χρονικές στιγμές, καθώς και τα νέφη που αντιστοιχούν στις οριακές τιμές AEGI για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτά παρουσιάζονται στο 3D μοντέλο του χώρου.



Σχήμα 4.27: Οριζόντια επίπεδα 1.20m και 1.80m AGL, που οριοθετούν την ζώνη αναπνοής στην αίθουσα εκδηλώσεων.



Σχήμα 4.28: Κατακόρυφα επίπεδα x-z και y-z στη θέση της πηγής, στην αίθουσα εκδηλώσεων.



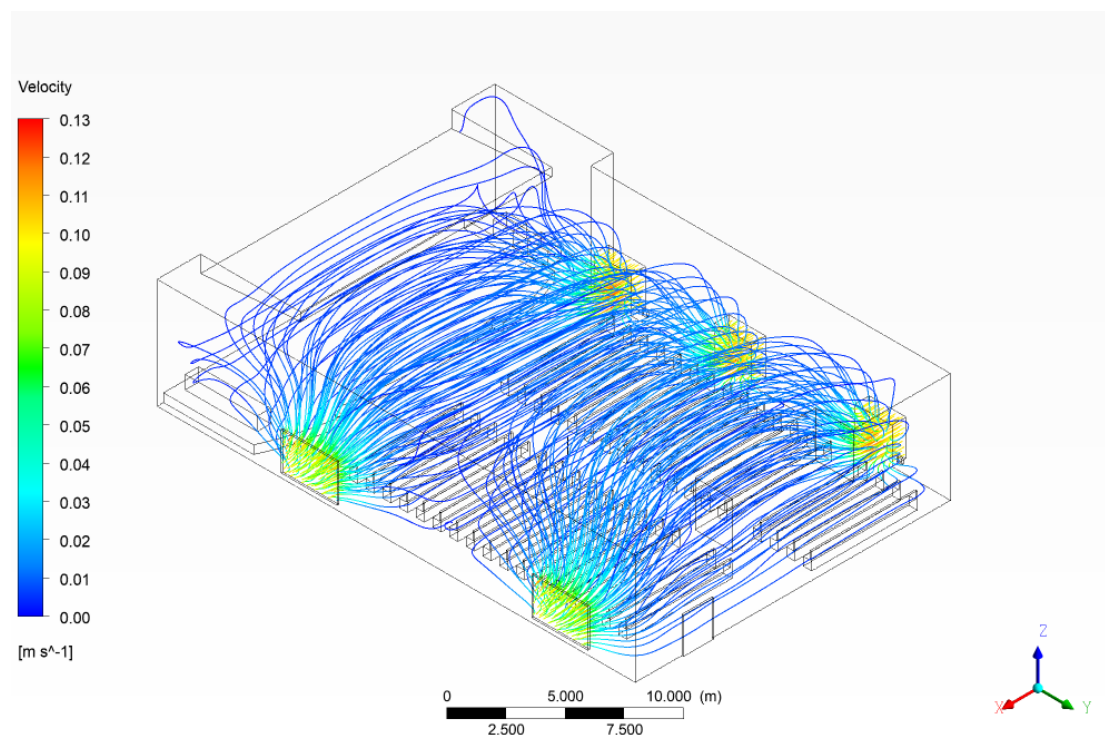
Σχήμα 4.29: Θέσεις εξέτασης των συγκεντρώσεων των χημικών παραγόντων στην αίθουσα εκδηλώσεων.

Αποτελέσματα

4.2.2 Η κυκλοφορία του περιβάλλοντος αέρα στην αίθουσα εκδηλώσεων

Η κυκλοφορία του αέρα στην αίθουσα εκδηλώσεων καθορίζεται από τρία ρεύματα αέρα, καθένα από τα οποία εισέρχεται στο χώρο με ταχύτητα 0.10m/sec από τις νότιες πόρτες. Η κατανομή ταχύτητας σε κάθε σημείο των εισόδων θεωρήθηκε ομοιόμορφη. Τα τρία ρεύματα αέρα εξέρχονται από τον χώρο μέσω των δύο ανοιγόμενων υαλοστασίων στην βόρεια πλευρά, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.30**.

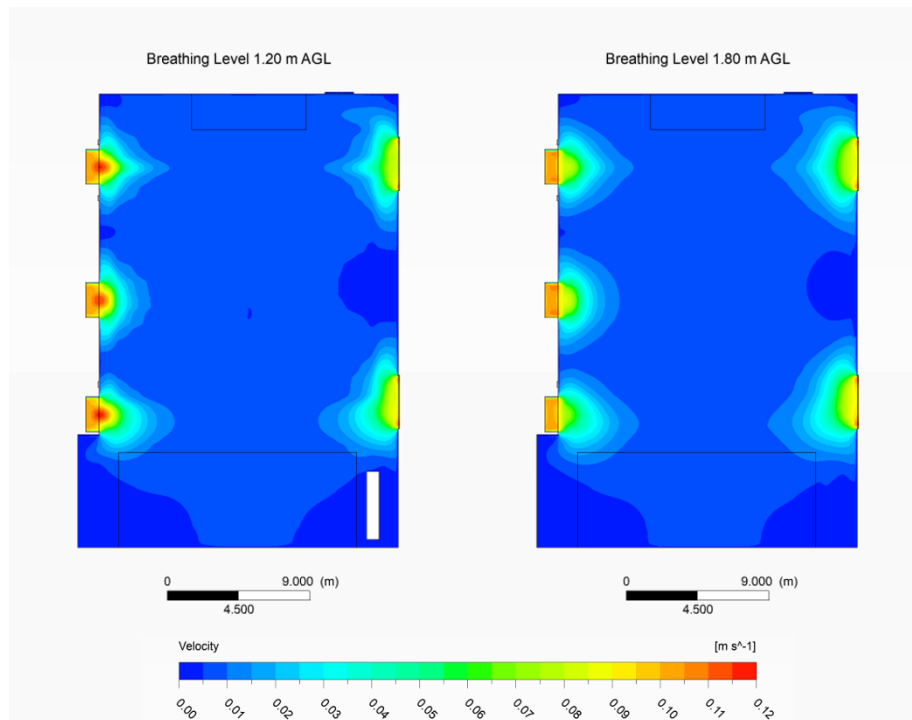
Η ταχύτητα στις θέσεις όπου καταλήγουν οι εξοχές των εισόδων καθώς και στις εξόδους του ρεύματος αέρα κυμαίνεται από 0.08m/sec ως 0.12m/sec, που είναι και η μεγαλύτερη ταχύτητα που παρατηρείται στην αίθουσα εκδηλώσεων. Στο μεγαλύτερο μέρος της αίθουσας η ταχύτητα έχει πολύ χαμηλές τιμές, μέχρι 0.01m/sec. Όμοια με την περίπτωση του γραφείου, οι γραμμές ροής φαίνεται να δημιουργούν μια κοιλότητα πάνω από τον εξοπλισμό του χώρου (**Σχήμα 4.30**).



Σχήμα 4.30: Γραμμές ροής του ρεύματος αέρα πριν την εκπομπή των χημικών παραγόντων, στην αίθουσα εκδηλώσεων.

Στα επίπεδα αναπνοής 1.20m AGL και 1.80m AGL, η ταχύτητα του αέρα έχει τις μεγαλύτερες τιμές της στις θέσεις όπου καταλήγουν οι εξοχές των εισόδων. Η μέγιστη τιμή που σημειώνεται είναι 0.12 m/sec και παρατηρείται στο επίπεδο 1.20m AGL. Στις εξόδους, και στα δύο επίπεδα αναπνοής οι ταχύτητες φτάνουν μέχρι τα 0.10 m/sec. Η κατανομή στην είσοδο και την έξοδο είναι παρόμοια και στα δύο επίπεδα αναπνοής και δεν παρατηρείται ο διπλασιασμός της τιμής της ταχύτητας στην έξοδο, όπως συνέβαινε στο χώρο γραφείου,

αφού εδώ υπάρχουν υαλοστάσια χωρίς ποδιές. Στο μεγαλύτερο μέρος των επιπέδων αναπνοής, συμπεριλαμβανομένου και του χώρου γύρω από την πηγή, οι ταχύτητες είναι πολύ μικρές και κυμαίνονται από 0.005m/sec ως 0.01 m/sec (**Σχήμα 4.31**).



Σχήμα 4.31: Κατανομή ταχυτήτων των ρευμάτων αέρα στα επίπεδα αναπνοής, για την αίθουσα εκδηλώσεων.

4.2.3 Η περίπτωση της αμμωνίας στην αίθουσα εκδηλώσεων

Για την αμμωνία στην αίθουσα εκδηλώσεων, όπως και στην περίπτωση του χώρου γραφείου, έγινε προσομοίωση της απελευθέρωσής της από πηγή κυκλικής διατομής στο κέντρο του χώρου, 1.00m AGL, με ρυθμό 100 mg/sec, για χρόνο 5 sec και ακολούθησε η παρακολούθηση της διασποράς της για χρονικό διάστημα 30 λεπτών, όπως περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.

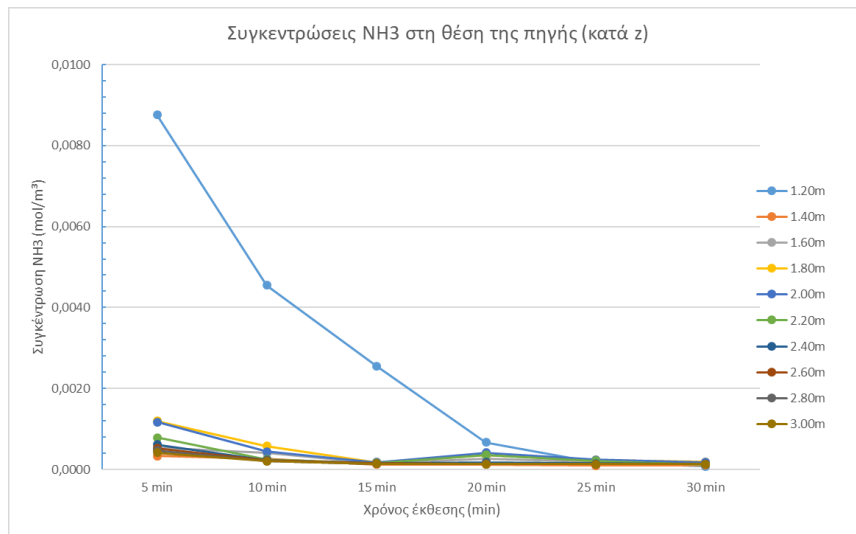
Οι συγκεντρώσεις της αμμωνίας στο χώρο συγκρίθηκαν με το όριο IDLH και τα όρια AEGl του χημικού παράγοντα για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτών, όπως αυτά τροποποιήθηκαν και παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.1** και τον **Πίνακα 4.2**.

4.2.3.1 Διασπορά της αμμωνίας στην αίθουσα εκδηλώσεων

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν πως η αμμωνία μετά την απελευθέρωση της σχηματίζει ένα νέφος υψηλότερης συγκέντρωσης στην περιοχή γύρω από την πηγή, περίπου μέχρι του ύψους των 1.80m AGL. Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις του

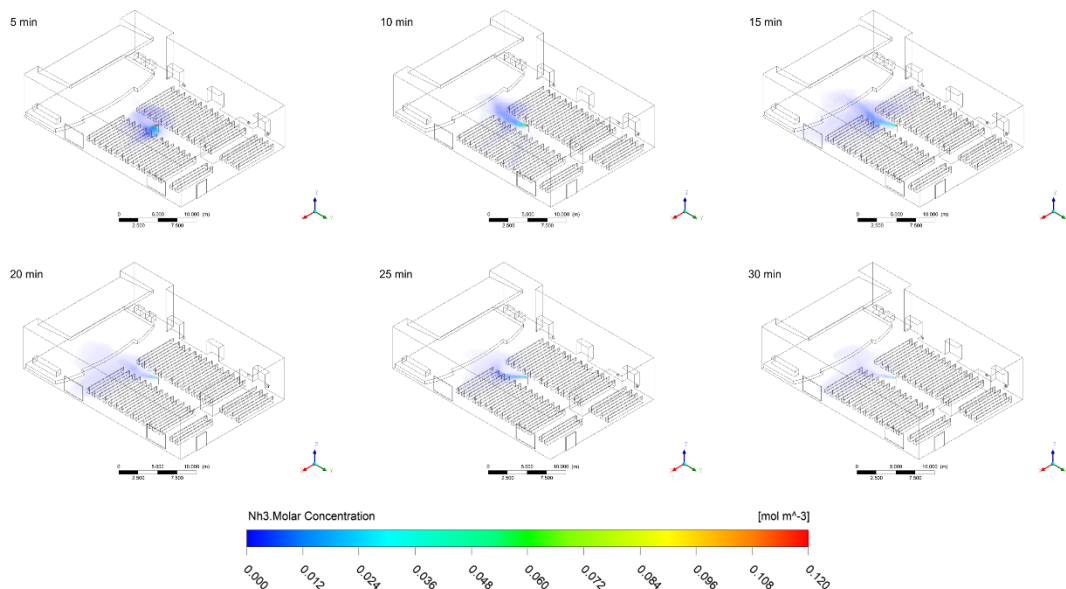
Αποτελέσματα

νέφους στον χώρο ακριβώς πάνω από την πηγή παρατηρούνται 5 λεπτά μετά την απελευθέρωσή της, στο επίπεδο αναπνοής 1.20m AGL (**Σχήμα 4.32**).



Σχήμα 4.32: Συγκεντρώσεις αμμωνίας στην αίθουσα εκδηλώσεων, στην θέση της πηγής κατά ύψος (z), σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωσή της.

Στο **Σχήμα 4.33** παρουσιάζεται η διασπορά της αμμωνίας στην αίθουσα εκδηλώσεων υπό την επίδραση των ρευμάτων αέρα, σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωσή της.



Σχήμα 4.33: Διασπορά αμμωνίας στην αίθουσα εκδηλώσεων σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωσή της.

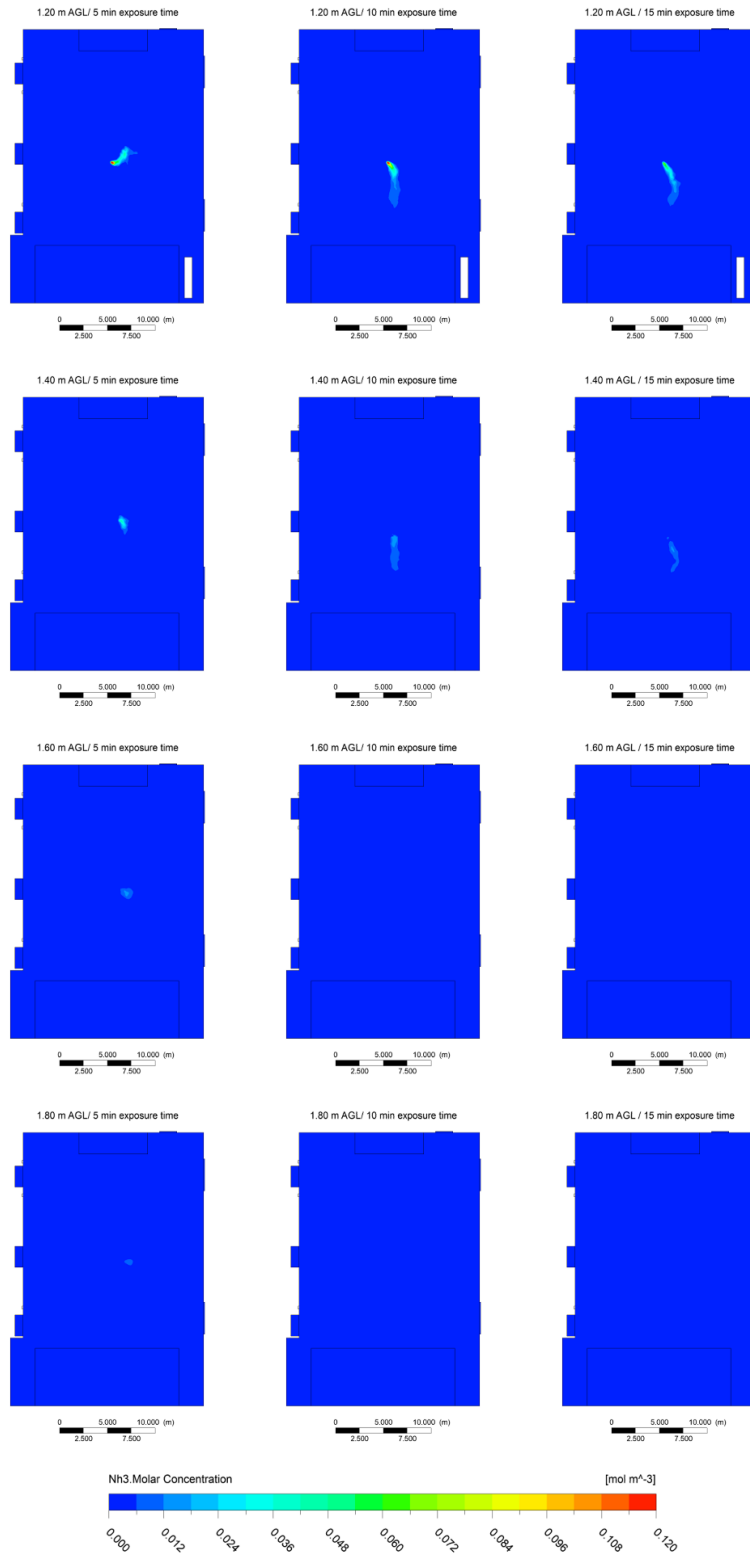
Η πηγή από όπου γίνεται η απελευθέρωση του χημικού παράγοντα βρίσκεται στο κέντρο του χώρου, όπου οι ταχύτητες των ρευμάτων αέρα έχουν πολύ χαμηλές τιμές και έτσι η αμμωνία κινείται ιδιαίτερα αργά. Λόγω της θέσης της πηγής σε σχέση με τις εισόδους-εξόδους των ρευμάτων αέρα, η διασπορά της αμμωνίας γίνεται κυρίως μέσω του ρεύματος

αέρα που εισέρχεται από την μεσαία είσοδο (door 2 - **Σχήμα 4.29**) και πιο συγκεκριμένα μέσω του τμήματος αυτού που εξέρχεται από το ανατολικό παράθυρο (window 2 - **Σχήμα 4.29**). Έτσι, ο κύριος όγκος του νέφους κινείται προς τα βορειοανατολικά και με αργό ρυθμό εξέρχεται σταδιακά από το βορειοανατολικό παράθυρο (**Σχήμα 4.33**).

Η επιλογή της ποσότητας αμμωνίας που απελευθερώθηκε στην αίθουσα εκδηλώσεων έγινε με κριτήριο την δυνατότητα μεταφοράς της στο χώρο από ένα άτομο, το οποίο θα προσπαθούσε να δημιουργήσει ένα χημικό περιστατικό, χωρίς να γίνει αντιληπτό, όμοια με την περίπτωση του χώρου γραφείου. Η σχετικά χαμηλή τοξικότητα της αμμωνίας, ο περιορισμός που τέθηκε για την δυνατότητα μεταφοράς της και ο μεγάλος όγκος της αίθουσας εκδηλώσεων (περίπου 21 φορές μεγαλύτερος του χώρου γραφείου), είχαν σαν αποτέλεσμα να μην σχηματίζεται μεγάλου μεγέθους, επικίνδυνης συγκέντρωσης νέφος αμμωνίας στην αίθουσα εκδηλώσεων.

Οι περιοχές όπου συναντώνται νέφη υψηλότερων συγκεντρώσεων περιορίζονται κοντά στη θέση της πηγής. Για χρόνο έκθεσης 5 λεπτών, νέφη υψηλών συγκεντρώσεων εμφανίζονται μέχρι το οριζόντιο επίπεδο 1.60m AGL, ενώ κατά τις χρονικές στιγμές 10 και 15 λεπτά μετά την απελευθέρωσή της αμμωνίας μέχρι το 1.40m AGL (**Σχήμα 4.34**). Η αμμωνία δεν παρουσιάζει μεγαλύτερες συγκεντρώσεις στις ψηλότερες θέσεις καθώς ο χρόνος περνάει, κάτι που παρατηρήθηκε στον χώρο γραφείου, γιατί η ποσότητα που χρησιμοποιήθηκε, αν και ήταν ικανή να δημιουργήσει επικίνδυνες περιοχές στον χώρο γραφείου, είναι πολύ μικρή για την αίθουσα εκδηλώσεων που έχει πολύ μεγαλύτερο όγκο.

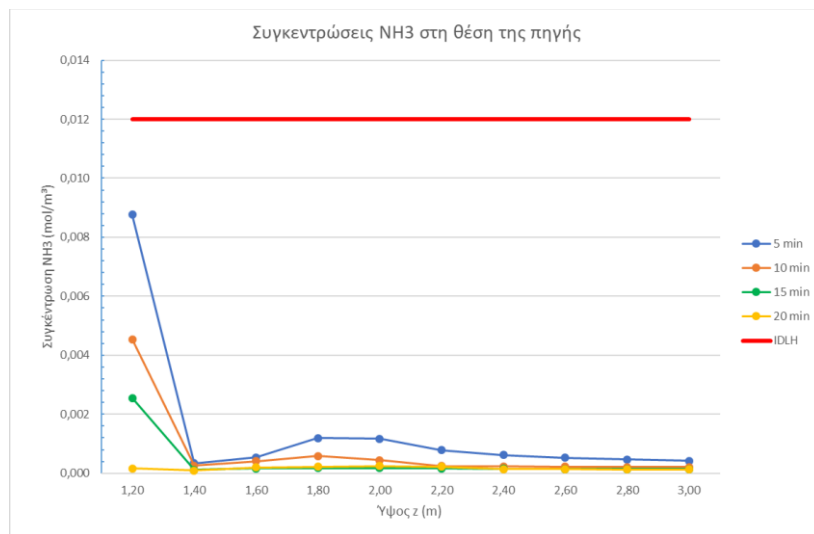
Αποτελέσματα



Σχήμα 4.34: Συγκεντρώσεις του νέφους αμμωνίας σε διάφορα επίπεδα AGL της ζώνης αναπνοής στην αίθουσα εκδηλώσεων, τις χρονικές στιγμές 5, 10 και 15 λεπτά μετά την απελευθέρωσή της.

4.2.3.2 Όριο IDLH αμμωνίας στην αίθουσα εκδηλώσεων

Η οριακή τιμή IDLH για την αμμωνία είναι 0.012 mol/m^3 (**Πίνακας 4.1**). Στην αίθουσα εκδηλώσεων, το μεγάλο μέγεθος του χώρου σε συνδυασμό με την μικρή ποσότητα αμμωνίας που απελευθερώνεται σε αυτόν και την χαμηλή τοξικότητά της, έχουν σαν αποτέλεσμα να μην υπερβαίνεται η οριακή τιμή IDLH σε καμία θέση πάνω από την πηγή, για καμία από τις εξεταζόμενες χρονικές στιγμές (**Σχήμα 4.35**). Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις πάνω από την πηγή παρατηρούνται 5 λεπτά μετά την απελευθέρωση του χημικού παράγοντα στο χώρο, χρονική στιγμή μετά την οποία ξεκινά η αποσυμφόρηση του περιβάλλοντος αέρα από την παρουσία του χημικού παράγοντα.



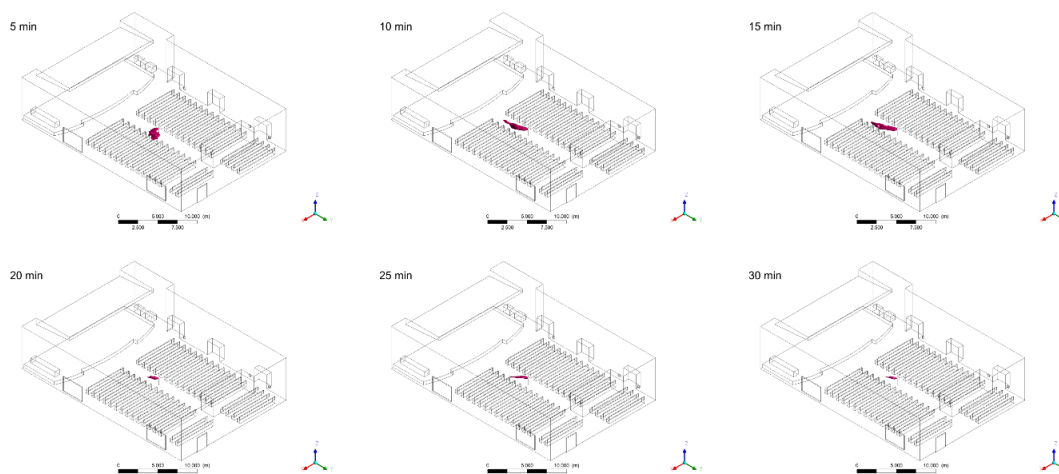
Σχήμα 4.35: Συγκεντρώσεις αμμωνίας στην αίθουσα εκδηλώσεων, σε διάφορα ύψη πάνω από τη θέση της πηγής, για διάφορες χρονικές στιγμές από την απελευθέρωσή της, συγκριτικά με το IDLH.

Σημειώνεται πως το γράφημα στο **Σχήμα 4.35** αφορά μόνο τις θέσεις ακριβώς πάνω από την πηγή και δεν συνεπάγεται από αυτό πως πουθενά στο χώρο δεν δημιουργούνται νέφη συγκεντρώσεων μεγαλύτερων του IDLH.

Στο **Σχήμα 4.36** παρουσιάζεται το νέφος αμμωνίας συγκέντρωσης μεγαλύτερης του IDLH, σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωση της. Το νέφος συσσωρεύεται γύρω από την πηγή μέχρι τη χρονική στιγμή 5 λεπτά μετά την απελευθέρωση της αμμωνίας και στη συνέχεια διασπείρεται προς τα βορειοανατολικά του χώρου, υπό την επίδραση του περιβάλλοντος αέρα. Σε όλες τις εξεταζόμενες χρονικές στιγμές, το νέφος συγκέντρωσης μεγαλύτερης του IDLH περιορίζεται κυρίως στο χώρο γύρω από την πηγή, και δεν δημιουργεί μεγάλης επιφάνειας επικίνδυνες περιοχές, καθιστώντας δυνατή τη διαφυγή των χρηστών του χώρου από το μολυσμένο περιβάλλον.

Αποτελέσματα

Σημειώνεται πως το IDLH είναι όριο κατωφλιού και επομένως δεν είναι ομοιογενές. Έτσι, αν και ο όγκος του φαίνεται ελαφρώς μεγαλύτερος 10 λεπτά μετά την απελευθέρωση της αμμωνίας σε σχέση με αυτόν 5 λεπτά μετά την απελευθέρωσή της, η σύσταση του δεν είναι ίδια και η συνολική συγκέντρωσή του μειώνεται (**Σχήμα 4.33** και **Σχήμα 4.34**).



Σχήμα 4.36: Συγκεντρώσεις αμμωνίας μεγαλύτερες του IDLH στην αίθουσα εκδηλώσεων, σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωσή της.

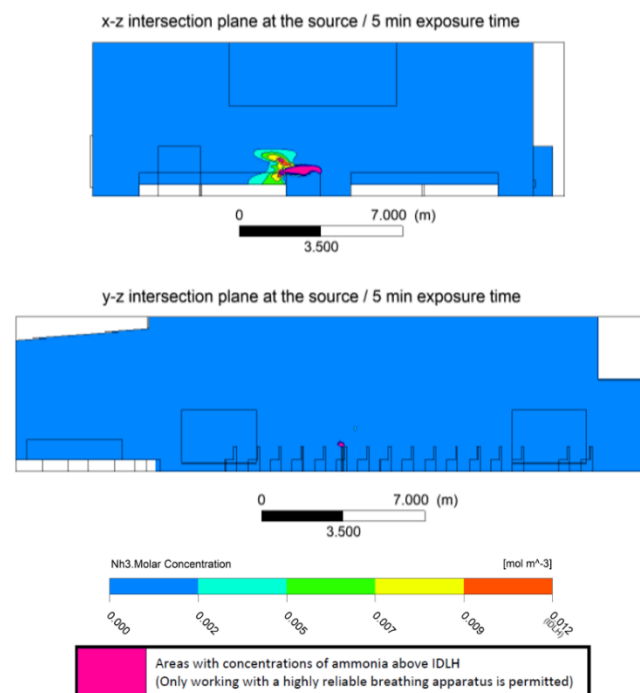
Η κατανομή των συγκεντρώσεων της αμμωνίας στα επίπεδα x-z και y-z που τέμνουν κατακόρυφα την πηγή, κατά τη χρονική στιγμή 5 λεπτά μετά την απελευθέρωσή της, όπου παρατηρούνται οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σε όλα τα εξεταζόμενα οριζόντια επίπεδα (**Σχήμα 4.34**), παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.37**. Στο επίπεδο y-z δεν παρατηρούνται αξιοσημείωτες συγκεντρώσεις πάνω από το όριο IDLH επειδή το νέφος αμμωνίας έχει μετατοπιστεί προς τα βορειανατολικά της αίθουσας εκδηλώσεων. Για το λόγο αυτό, στο **Σχήμα 4.38** παρουσιάζεται συμπληρωματικά η κατανομή των συγκεντρώσεων αμμωνίας σε ένα επιπλέον επίπεδο y-z σε απόσταση 1.00m από τη θέση της πηγής προς τον βορρά (για προσανατολισμό βλ. **Σχήμα 4.29**).

Στον **Πίνακα 4.10** παρουσιάζεται η επιφάνεια που καταλαμβάνει το νέφος συγκέντρωσης μεγαλύτερης του IDLH σε καθένα από τα εξεταζόμενα οριζόντια επίπεδα εντός της ζώνης αναπνοής, περιοχή η οποία απεικονίζεται στο **Σχήμα 4.39**. Σε όλες τις εξεταζόμενες χρονικές στιγμές, το νέφος συγκέντρωσης μεγαλύτερης του IDLH περιορίζεται κοντά στη θέση της πηγής και καταλαμβάνει πολύ μικρή επιφάνεια, η οποία σε καμία από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις δεν φτάνει τα 0.50m².

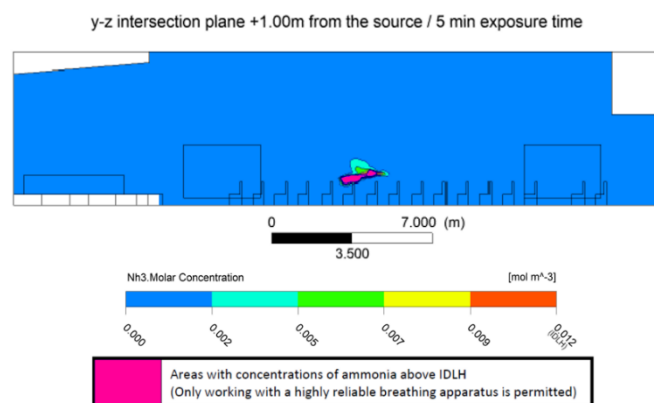
Τη χρονική στιγμή 5 λεπτά μετά την απελευθέρωση της αμμωνίας, νέφη συγκέντρωσης μεγαλύτερης του IDLH εμφανίζονται στα επίπεδα 1.20m, 1.40m και 1.60m AGL, ενώ για τις χρονικές στιγμές 10 και 15 λεπτά μετά στα επίπεδα 1.20m και 1.40m AGL. Η

αμμωνία δεν παρουσιάζει μεγαλύτερες συγκεντρώσεις στις ψηλότερες θέσεις καθώς ο χρόνος περνάει, κάτι που παρατηρήθηκε στον χώρο γραφείου, γιατί η ποσότητα που χρησιμοποιήθηκε, αν και δημιούργησε επικίνδυνες περιοχές στον χώρο γραφείου, είναι πολύ μικρή για την αίθουσα εκδηλώσεων που έχει σχεδόν 21 φορές μεγαλύτερο όγκο.

Σημειώνεται πως το IDLH είναι όριο κατωφλιού και έτσι το νέφος συγκέντρωσης μεγαλύτερης του IDLH δεν είναι ομοιογενές. Έτσι, ενώ η περιοχή που καταλαμβάνει το νέφος συγκέντρωσης μεγαλύτερης του IDLH στα επίπεδα 1.20m και 1.40m AGL φαίνεται μεγαλύτερη καθώς ο χρόνος περνάει, η συνολική συγκέντρωση του νέφους στην πραγματικότητα μειώνεται (**Σχήμα 4.34**).

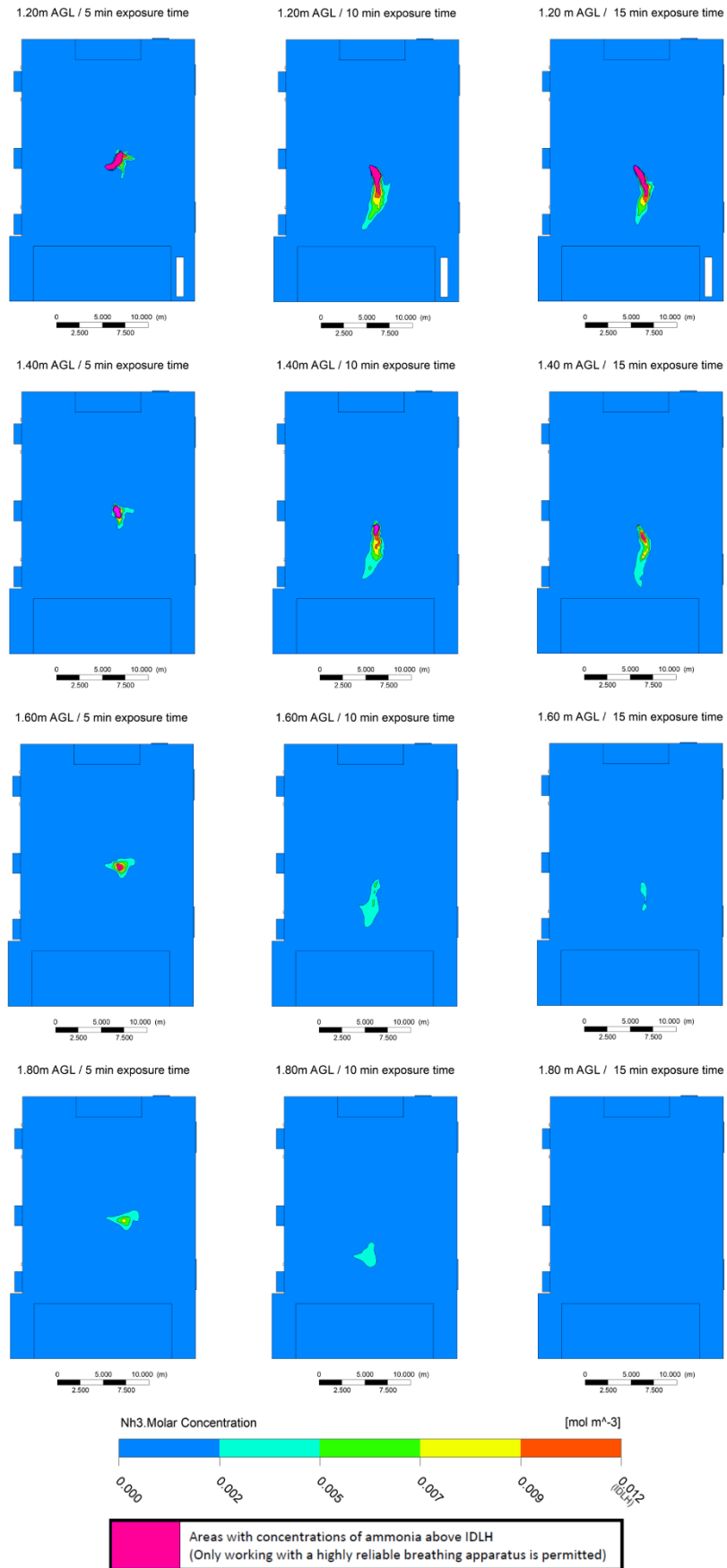


Σχήμα 4.37: Η κατανομή των συγκεντρώσεων της αμμωνία στην αίθουσα εκδηλώσεων 10 λεπτά μετά την απελευθέρωσή της, στα επίπεδα x-z και y-z που τέμνουν κατακόρυφα την πηγή, συγκριτικά με το IDLH.



Σχήμα 4.38: Η κατανομή των συγκεντρώσεων της αμμωνία στην αίθουσα εκδηλώσεων 10 λεπτά μετά την απελευθέρωσή της, στο επίπεδο y-z που βρίσκεται σε απόσταση 1.00m από την πηγή προς τον βορρά.

Αποτελέσματα



Σχήμα 4.39: Η κατανομή των συγκεντρώσεων αμμωνίας σε διάφορα οριζόντια επίπεδα AGL, τις χρονικές στιγμές 5, 10 και 15 λεπτά μετά την απελευθέρωσή της, συγκριτικά με το IDLH, στην αίθουσα εκδηλώσεων.

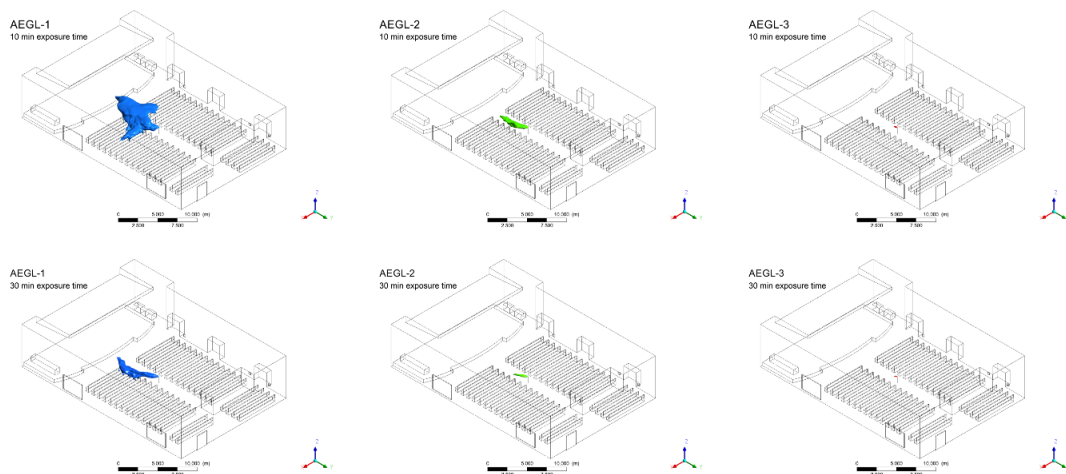
Πίνακας 4.10: Επιφάνεια νέφους συγκέντρωσης μεγαλύτερης του IDLH σε διάφορα οριζόντια επίπεδα AGL στην αίθουσα εκδηλώσεων, τις χρονικές στιγμές 5, 10 και 15 λεπτά μετά την απελευθέρωσή της.

Horizontal level	exposure time: 5 min		exposure time: 10 min		exposure time: 15 min	
	Level area over IDLH		Level area over IDLH		Level area over IDLH	
	%	(m ²)	%	(m ²)	%	(m ²)
1.20 m AGL	0.033	0.18	0.076	0.41	0.069	0.38
1.40 m AGL	0.025	0.14	0.016	0.09	0.032	0.18
1.60 m AGL	0.022	0.12	0.000	0.00	0.000	0.00
1.80 m AGL	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00

4.2.3.3 Όρια AEGLs αμμωνίας στην αίθουσα εκδηλώσεων

Για την περίπτωση της αμμωνίας ορίζονται και τα τρία όρια AEGL, οι τροποποιημένες τιμές των οποίων για τις εξεταζόμενες περιόδους έκθεσης των 10 και 30 λεπτών παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.2**.

Σε χρόνο 10 λεπτά μετά την απελευθέρωση του χημικού παράγοντα, ένα νέφος αμμωνίας συγκέντρωσης μεγαλύτερης του AEGL-1 σχηματίζεται στο βορειοανατολικό τεταρτημόριο της αίθουσας εκδηλώσεων και διασπείρεται κυρίως στην περιοχή αυτή, εξερχόμενο από το βορειοανατολικό υαλοστάσιο (**Σχήμα 4.40**).



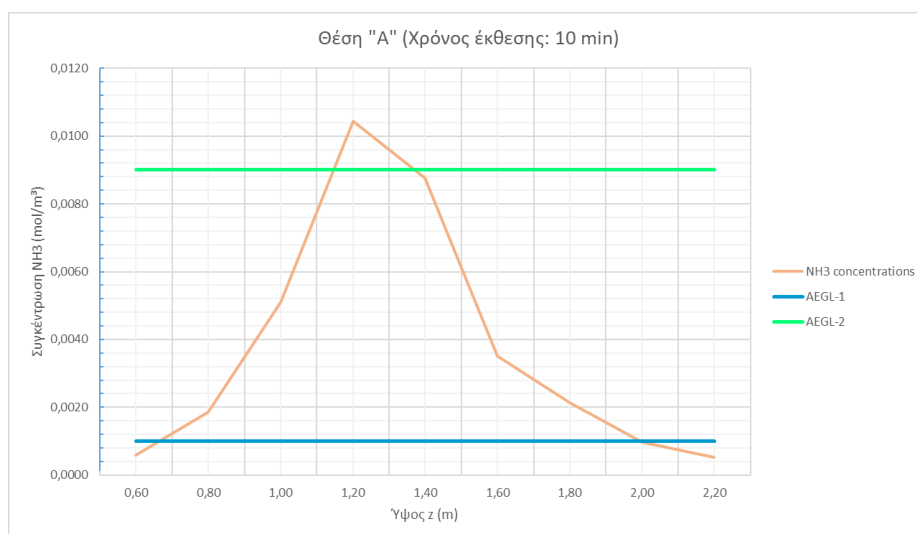
Σχήμα 4.40: Νέφη συγκεντρώσεων μεγαλύτερων των οριακών τιμών AEGL για την αμμωνία στην αίθουσα εκδηλώσεων, για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτά.

Στη θέση «Α» (**Σχήμα 4.29**), το νέφος συγκέντρωσης μεγαλύτερης του AEGL-1 ξεκινά από το ύψος των 0.65m και φτάνει μέχρι τα 2.00m AGL, ενώ σχηματίζεται επίσης νέφος συγκέντρωσης μεγαλύτερης του AEGL-2, από τα 1.15m ως τα 1.40m AGL (**Σχήμα 4.41**).

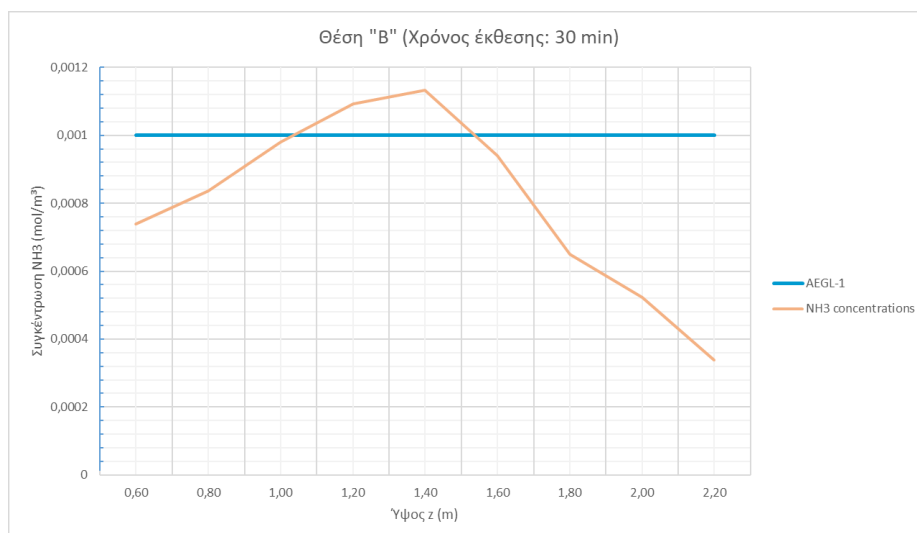
Καθώς ο χρόνος περνάει ο χώρος αποσυμφορείται αποτελεσματικά από την παρουσία του χημικού παράγοντα, υπό την επίδραση των ρευμάτων του περιβάλλοντος αέρα, αφήνοντας 30 λεπτά μετά την απελευθέρωση της αμμωνίας μόνο ένα μικρό νέφος με

Αποτελέσματα

συγκέντρωση μεγαλύτερη του AEG1-1 στο βορειοανατολικό τεταρτημόριο της αίθουσας εκδηλώσεων, με κατεύθυνση προς το βορειοανατολικό άνοιγμα. Στη θέση «B» (Σχήμα 4.29), το νέφος αυτό ξεκινά από ύψος 1.05m AGL και φτάνει μέχρι 1.55m AGL (Σχήμα 4.42).



Σχήμα 4.41: Συγκεντρώσεις αμμωνίας σε διάφορα ύψη στη θέση "A" της αίθουσας εκδηλώσεων, συγκριτικά με τα AEG1-1 και AEG2-2, για χρόνο έκθεσης 10 λεπτά.



Σχήμα 4.42: Συγκεντρώσεις αμμωνίας σε διάφορα ύψη στη θέση "B" της αίθουσας εκδηλώσεων, συγκριτικά με τα AEG1-1 και AEG2-2, για χρόνο έκθεσης 10 λεπτά.

Συγκεντρώσεις μικρότερες του AEG1-1 στα εξεταζόμενα επίπεδα αναπνοής

Οι περιοχές με σκούρο μπλε χρώμα στο Σχήμα 4.43 και στο Σχήμα 4.44, αντιπροσωπεύουν τις περιοχές των επιπέδων αναπνοής 1.20m και 1.80m AGL, όπου οι συγκεντρώσεις αμμωνίας δεν υπερβαίνουν την οριακή τιμή AEG1-1, για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτών αντίστοιχα. Οι επιφάνειες των επιπέδων αναπνοής που καταλαμβάνουν τα νέφη αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.11.

- Στο επίπεδο αναπνοής 1.20m AGL, τα νέφη συγκεντρώσεων χαμηλότερων του AEG1-1 καταλαμβάνουν το 96.97% (530.30m²) της επιφάνειας του επιπέδου αναπνοής για χρόνο έκθεσης 10 λεπτά και το 98.61% (540.38m²) για χρόνο έκθεσης 30 λεπτά.
- Στο επίπεδο αναπνοής 1.80m AGL, τα νέφη συγκεντρώσεων χαμηλότερων του AEG1-1 καταλαμβάνουν το 97.75% (535.67m²) της επιφάνειας του επιπέδου αναπνοής για χρόνο έκθεσης 10 λεπτά και το 100.00% (548.00m²) για χρόνο έκθεσης 30 λεπτά

Σχεδόν σε ολόκληρη την επιφάνεια των δύο επιπέδων αναπνοής, η συγκέντρωση της αμμωνίας δεν ξεπερνά το AEG1-1, σε κανένα από τους δύο εξεταζόμενους χρόνους έκθεσης. Οι περιοχές αυτές θεωρούνται γενικά ασφαλείς, αφού η αμμωνία σε αυτές τις συγκεντρώσεις δεν έχει αδρανοποιητική δράση. Οι χρήστες του χώρου είναι πιθανό να αισθανθούν ήπια και σταδιακά αυξανόμενη, αλλά παροδική και μη αδρανοποιητική όχληση των αισθητηρίων (όσφρηση, γεύση και όραση) ή να υποστούν κάποιες ασυμπτωματικές επιπτώσεις που δεν γίνονται αντιληπτές μέσω των αισθητηρίων οργάνων. Η παρουσία της αμμωνίας σε τόσο χαμηλές συγκεντρώσεις μπορεί να μην γίνει καν αντιληπτή.

Συγκεντρώσεις μεγαλύτερες του AEG1-1 στα εξεταζόμενα επίπεδα αναπνοής

Οι περιοχές με ανοιχτό μπλε χρώμα στο **Σχήμα 4.43** και στο **Σχήμα 4.44**, αντιπροσωπεύουν τις περιοχές των επιπέδων αναπνοής 1.20m και 1.80m AGL, όπου οι συγκεντρώσεις αμμωνίας είναι πάνω από την οριακή τιμή AEG1-1, για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτών αντίστοιχα. Οι επιφάνειες των επιπέδων αναπνοής που καταλαμβάνουν τα νέφη αυτά παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.11**.

- Στο επίπεδο αναπνοής 1.20m AGL, τα νέφη συγκεντρώσεων υψηλότερων του AEG1-1 καταλαμβάνουν το 2.57% (14.08m²) της επιφάνειάς του επιπέδου αναπνοής για χρόνο έκθεσης 10 λεπτών και το 1.23% (6.74m²) για χρόνο έκθεσης 30 λεπτών.
- Στο επίπεδο αναπνοής 1.80m AGL, τα νέφη συγκεντρώσεων υψηλότερων του AEG1-1 καταλαμβάνουν το 2.25% (12.33m²) της επιφάνειας του επιπέδου αναπνοής για χρόνο έκθεσης 10 λεπτών και το 0.00% (0.00m²) για χρόνο έκθεσης 30 λεπτών.

Και για τις δύο χρονικές περιόδους έκθεσης, οι περιοχές πάνω από το AEG1-1 καλύπτουν μικρό ποσοστό του χώρου, από την πηγή και προς τα ανατολικά του χώρου.

Αποτελέσματα

Οι περιοχές αυτές θεωρούνται χαμηλής επικινδυνότητας, αφού οι συγκεντρώσεις της αμμωνίας σε αυτές δεν έχουν αδρανοποιητική δράση. Οι χρήστες του χώρου μπορούν να αισθανθούν ήπια ενόχληση του ανώτερου αναπνευστικού συστήματος, ανεξαρτήτως της φυσικής τους δραστηριότητας και του αν ανήκουν σε ομάδες υψηλού κινδύνου. Η χαρακτηριστική οσμή της αμμωνίας σε τόσο μικρές συγκεντρώσεις μπορεί να γίνει αντιληπτή, δεν μπορεί να θεωρηθεί όμως αξιόπιστος παράγοντας εντοπισμού της.

Στην περίπτωση της αίθουσας εκδηλώσεων οι περιοχές αυτές εμφανίζονται ελαφρώς μεγαλύτερες στο επίπεδο αναπνοής 1.20m AGL συγκριτικά με το 1.80m AGL, και μάλιστα για χρόνο έκθεσης 30 λεπτών δεν εντοπίζεται τέτοια περιοχή στο επίπεδο 1.80m AGL, αντίθετα με την κατάσταση στον χώρο γραφείου. Αυτό συμβαίνει επειδή η ποσότητα αμμωνίας που χρησιμοποιήθηκε είναι ικανή να δημιουργήσει περιοχές μέσης επικινδυνότητας στο χώρο γραφείου, όχι όμως και στην κατά πολύ μεγαλύτερη σε όγκο αίθουσα εκδηλώσεων.

Συγκεντρώσεις μεγαλύτερες του AEGl-2 στα εξεταζόμενα επίπεδα αναπνοής

Οι περιοχές με πράσινο χρώμα στο **Σχήμα 4.43** και στο **Σχήμα 4.44**, αντιπροσωπεύουν τις περιοχές των επιπέδων αναπνοής 1.20m και 1.80m AGL, όπου οι συγκεντρώσεις αμμωνίας είναι πάνω από την οριακή τιμή AEGl-2, για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτών αντίστοιχα. Οι επιφάνειες των επιπέδων αναπνοής που καταλαμβάνουν τα νέφη αυτά παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.11**.

- Στο επίπεδο αναπνοής 1.20m AGL, τα νέφη συγκεντρώσεων υψηλότερων του AEGl-2 καταλαμβάνουν το 0.62% (3.40m²) της επιφάνειας του επιπέδου αναπνοής για χρόνο έκθεσης 10 λεπτών και το 0.15% (0.82m²) για χρόνο έκθεσης 30 λεπτών.
- Στο επίπεδο αναπνοής 1.80m AGL δεν εντοπίζεται καμία περιοχή όπου η συγκέντρωση της αμμωνίας υπερβαίνει την οριακή τιμή AEGl-2.

Οι περιοχές υπέρβασης του AEGl-2 εμφανίζονται μόνο στο επίπεδο αναπνοής 1.20m AGL και περιορίζονται κοντά στην πηγή. Θεωρούνται μέσης επικινδυνότητας περιοχές, αφού η αμμωνία σε τέτοιες συγκεντρώσεις μπορεί να έχει αδρανοποιητική δράση. Οι χρήστες του χώρου αισθάνονται από ήπιο ως έντονο ερεθισμό των οφθαλμών και του λαιμού, βήχα ή δυσφορία.

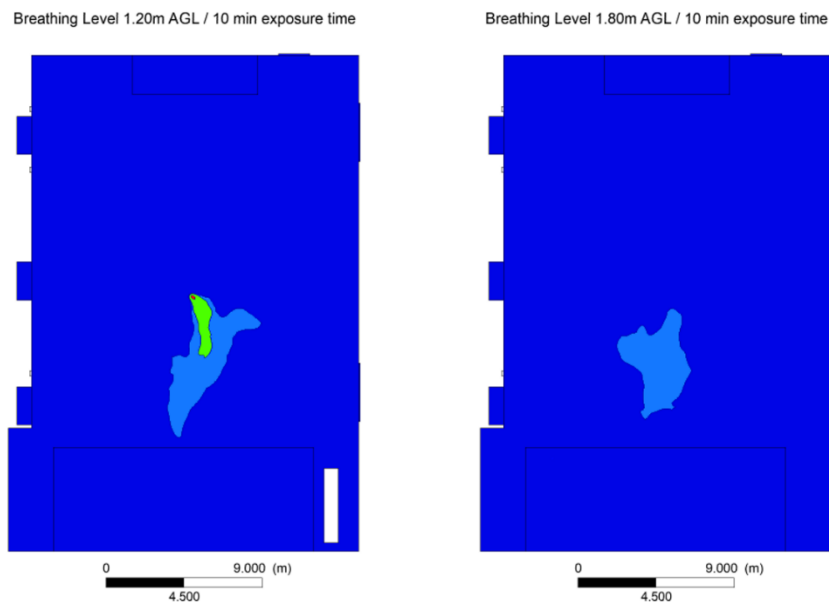
Συγκεντρώσεις μεγαλύτερες του AEGl-3 στα εξεταζόμενα επίπεδα αναπνοής

Κατά την διάρκεια των εξεταζόμενων διαστημάτων έκθεσης, δεν σχηματίζεται σε κανένα επίπεδο αναπνοής νέφος που η συγκέντρωσή του να υπερβαίνει το AEGl-3 για την

αμμωνία, πλην μιας μικρής περιοχής γύρω από την πηγή στο επίπεδο 1.20m AGL, στα 10 πρώτα λεπτά, που θεωρείται αμελητέα (**Πίνακας 4.11** και **Σχήμα 4.43**). Έτσι, στην περίπτωση της αίθουσας εκδηλώσεων, όπως και στην περίπτωση του χώρου γραφείου, δεν εντοπίζονται για την αμμωνία περιοχές στις οποίες οι συγκεντρώσεις της θα έχουν αδρανοποιητική δράση και μπορούν να επέλθουν σοβαρές, μη αναστρέψιμες επιπτώσεις στην υγεία των χρηστών του χώρου ή ακόμα και θάνατος.

Πίνακας 4.11: Επιφάνεια των επιπέδων αναπνοής που καταλαμβάνουν τα νέφη αμμωνίας συγκριτικά με τα AEGLs, για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτά, στην αίθουσα εκδηλώσεων.

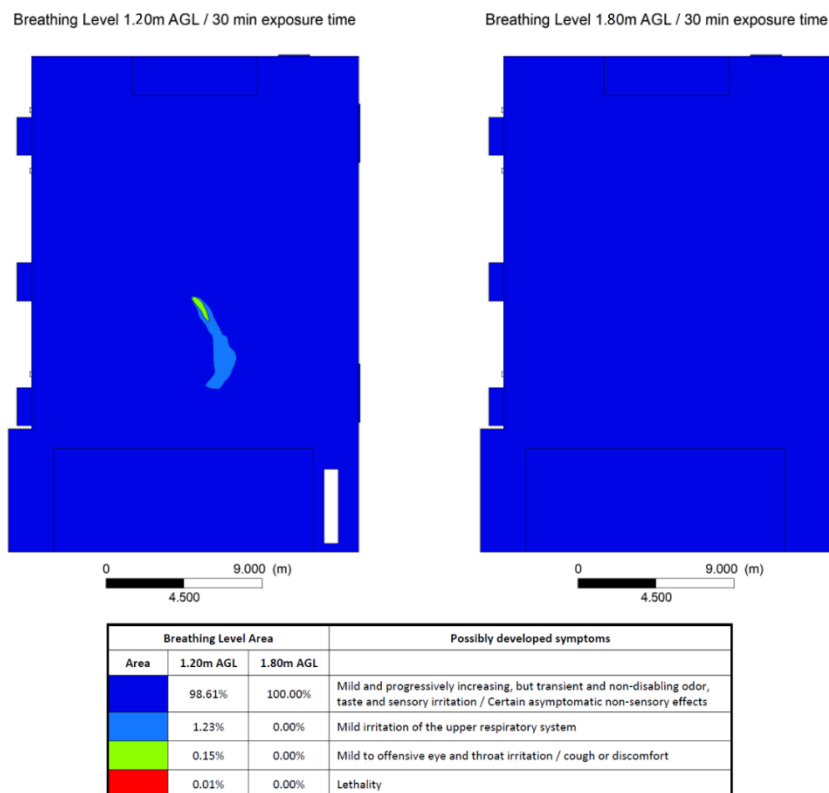
NH3 concentration		Breathing Level: 1.20m AGL		Breathing Level: 1.80m AGL	
		Level area		Level Area	
		(%)	(m ²)	(%)	(m ²)
exposure time 10 min	below AEGL-1	96.77	530.30	97.75	535.67
	over AEGL-1	2.57	14.08	2.25	12.33
	over AEGL-2	0.62	3.40	0.00	0.00
	over AEGL-3	0.04	0.22	0.00	0.00
	Total	100	548.00	100.00	548.00
exposure time 30 min	below AEGL-1	98.61	540.38	100.00	548.00
	over AEGL-1	1.23	6.74	0.00	0.00
	over AEGL-2	0.15	0.82	0.00	0.00
	over AEGL-3	0.01	0.05	0.00	0.00
	Total	100.00	548.00	100.00	548.00



Area	Breathing Level Area		Possibly developed symptoms
	1.20m AGL	1.80m AGL	
Blue	96.77%	97.75%	Mild and progressively increasing, but transient and non-disabling odor, taste and sensory irritation / Certain asymptomatic non-sensory effects
Light Blue	2.57%	2.25%	Mild irritation of the upper respiratory system
Yellow	0.62%	0.00%	Mild to offensive eye and throat irritation / cough or discomfort
Red	0.04%	0.00%	Lethality

Σχήμα 4.43: Οριακές τιμές AEGL για την αμμωνία στα επίπεδα αναπνοής 1.20m και 1.80m AGL, για χρόνο έκθεσης 10 λεπτά, στην αίθουσα εκδηλώσεων

Αποτελέσματα



Σχήμα 4.44: Οριακές τιμές AEGL για την αμμωνία στα επίπεδα αναπνοής 1.20m και 1.80m AGL, για χρόνο έκθεσης 30 λεπτά, στην αίθουσα εκδηλώσεων.

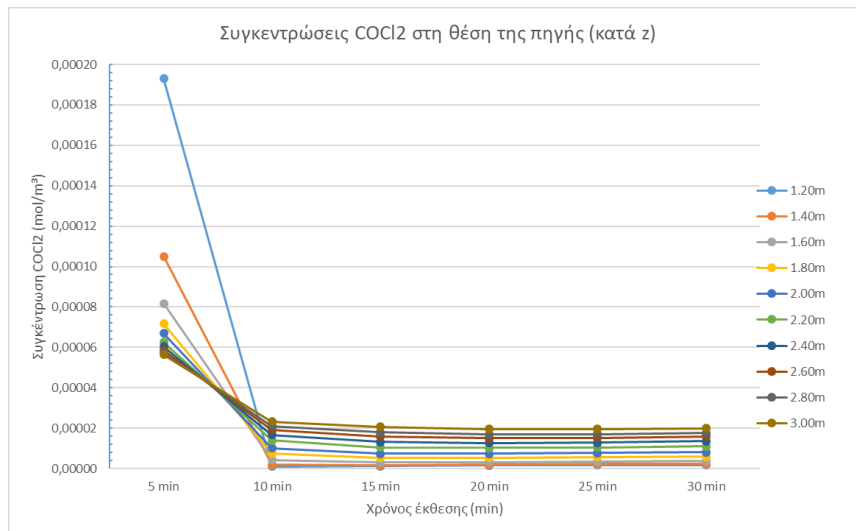
4.2.4 Η περίπτωση του φωσγενίου στην αίθουσα εκδηλώσεων

Για το φωσγένιο, έγινε όπως και στην περίπτωση του χώρου γραφείου, προσομοίωση της απελευθέρωσής του από πηγή κυκλικής διατομής στο κέντρο του χώρου 1.00m AGL, με ρυθμό 10 mg/sec, για χρόνο 5 sec και στη συνέχεια παρακολούθηση της διασποράς του για χρονικό διάστημα 30 λεπτών, όπως περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.

Οι συγκεντρώσεις του φωσγενίου στην αίθουσα εκδηλώσεων συγκρίθηκαν με το όριο IDLH και τα όρια AEGL του χημικού παράγοντα για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτών, όπως αυτά τροποποιήθηκαν και παρουσιάζονται στον **Πίνακας 4.5** και τον **Πίνακας 4.6**.

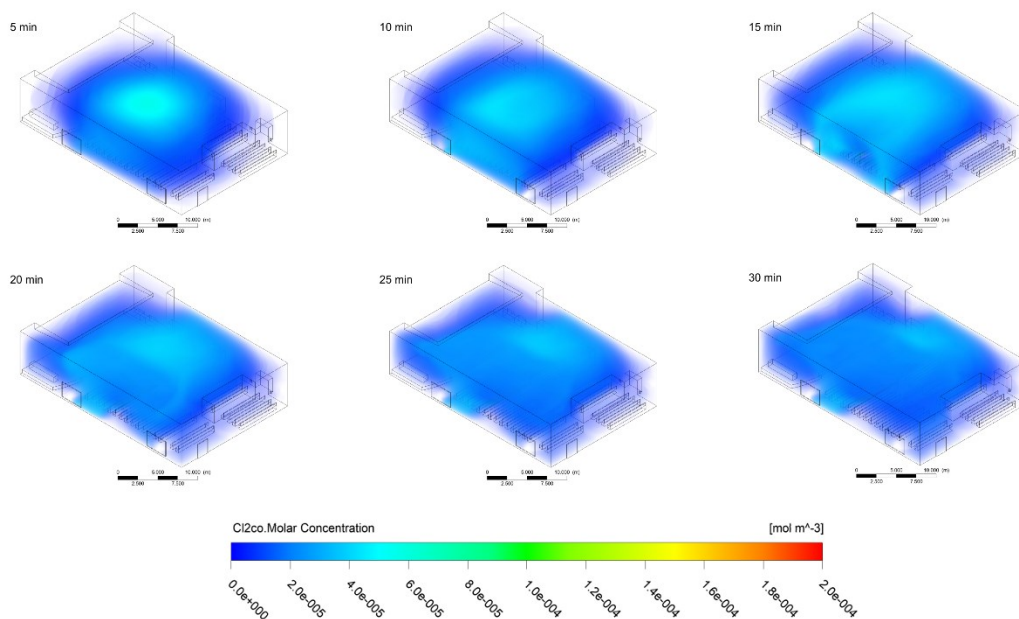
4.2.4.1 Διασπορά του φωσγενίου στην αίθουσα εκδηλώσεων

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης διασποράς φωσγενίου στην αίθουσα εκδηλώσεων δείχνουν πως ο χημικός παράγοντας συσσωρεύεται γύρω από την πηγή για χρονικό διάστημα 5 λεπτών μετά την απελευθέρωσή του, σχηματίζοντας νέφος ιδιαίτερα υψηλών συγκεντρώσεων στα επίπεδα αναπνοής 1.20m και 1.40m AGL (**Σχήμα 4.45**).



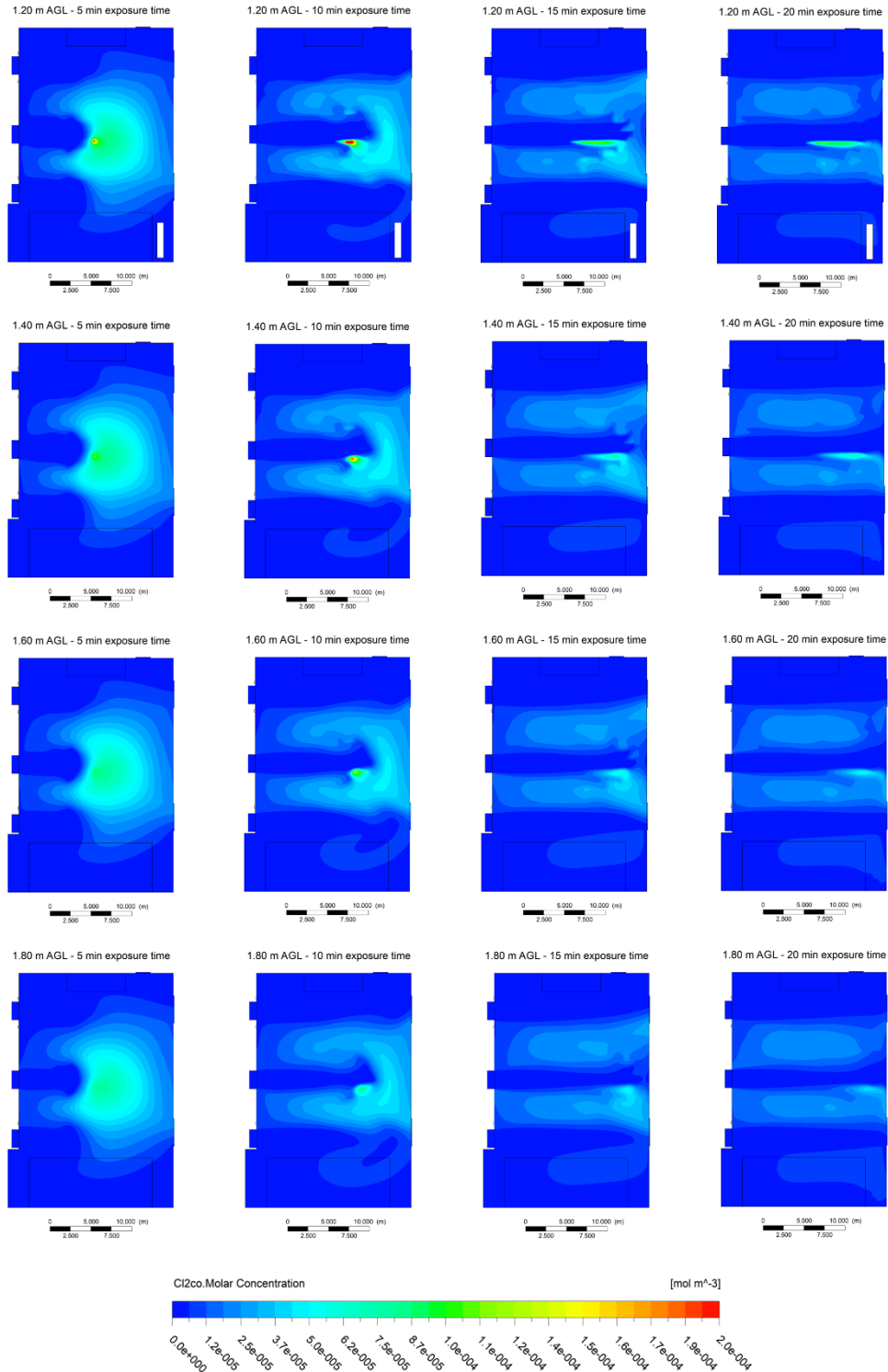
Σχήμα 4.45: Συγκεντρώσεις φωσγενίου στην αίθουσα εκδηλώσεων, στην θέση της πηγής κατά ύψος (z), σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωση του.

Σε χρόνο 5 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του φωσγενίου, οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις παρατηρούνται γύρω από την θέση της πηγής, σαν ένα μεγάλο όγκο νέφος που φτάνει ως την οροφή του χώρου. Τη χρονική στιγμή 10 λεπτά μετά την απελευθέρωση του, το νέφος διασπείρεται προς τα ανοιγόμενα υαλοστάσια στα βόρεια της αίθουσας εκδηλώσεων (για προσανατολισμό βλ. **Σχήμα 4.29**). Τις υπόλοιπες εξεταζόμενες χρονικές στιγμές η συγκέντρωσή του νέφους σταδιακά μειώνεται, χωρίς ωστόσο ο χώρος να αποσυμφορείται εντελώς από την παρουσία του χημικού παράγοντα μέχρι το τέλος του χρόνου παρατήρησης (**Σχήμα 4.46**)



Σχήμα 4.46: Διασπορά φωσγενίου στην αίθουσα εκδηλώσεων σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωσή του.

Αποτελέσματα

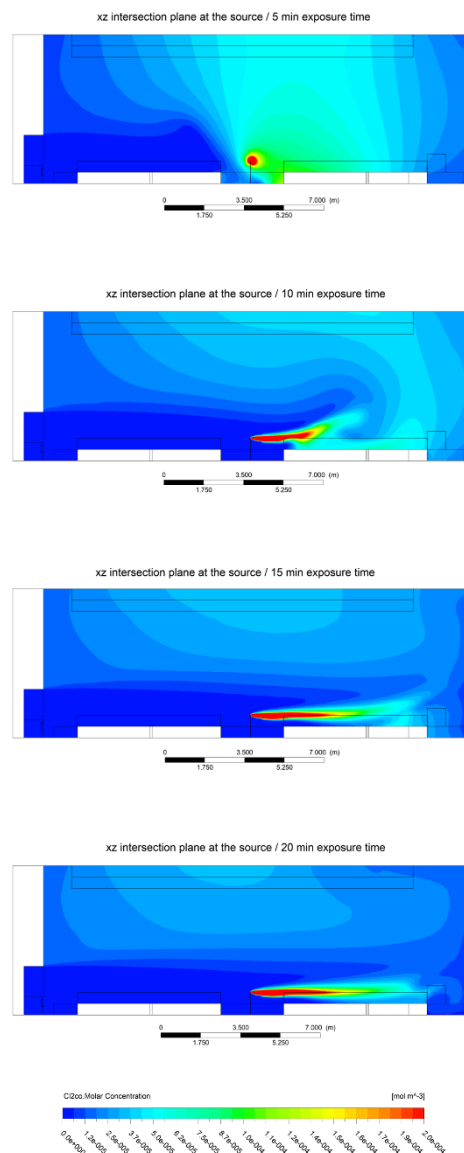


Σχήμα 4.47: Συγκεντρώσεις του νέφους φωσγενίου σε διάφορα επίπεδα AGL της ζώνης αναπνοής στην αίθουσα εκδηλώσεων, τις χρονικές στιγμές 5, 10, 15 και 20 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του.

Στο **Σχήμα 4.47** παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις του νέφους φωσγενίου σε διάφορα επίπεδα AGL εντός της ζώνης αναπνοής, για χρόνους έκθεσης 5, 10, 15 και 20 λεπτών. Από το σχήμα φαίνεται πως σε όλες τις εξεταζόμενες χρονικές στιγμές η συγκέντρωση του νέφους φωσγενίου είναι μεγαλύτερη στα χαμηλότερα επίπεδα σε σχέση

με τα υψηλότερα, όπως θα ήταν αναμενόμενο για ένα χημικό παράγοντα βαρύτερο του αέρα.

Η αποσυμφόρηση του χώρου από το φωσγένιο γίνεται με σχεδόν ισότιμη συμβολή και των τριών ρευμάτων αέρα, αφού σε αντίθεση με την περίπτωση της αμμωνίας που ο κύριος όγκος του νέφους είναι μικρός και συγκεντρώνεται στην περιοχή ανατολικά από την μεσαία είσοδο, εδώ ο όγκος του νέφους είναι αρκετά μεγαλύτερος και πιο ομοιόμορφα κατανεμημένος στο χώρο. Η θέση της πηγής σε σχέση με τις εισόδους-εξόδους των ρευμάτων αέρα παίζει και εδώ ρόλο, αφού συγκριτικά μεγαλύτερο μέρος του νέφους κατευθύνεται προς το βορειοανατολικό υαλοστάσιο σε σχέση με το βορειοδυτικό (Σχήμα 4.47), όχι όμως το σύνολο σχεδόν του νέφους, όπως συμβαίνει στην περίπτωση της αμμωνίας.

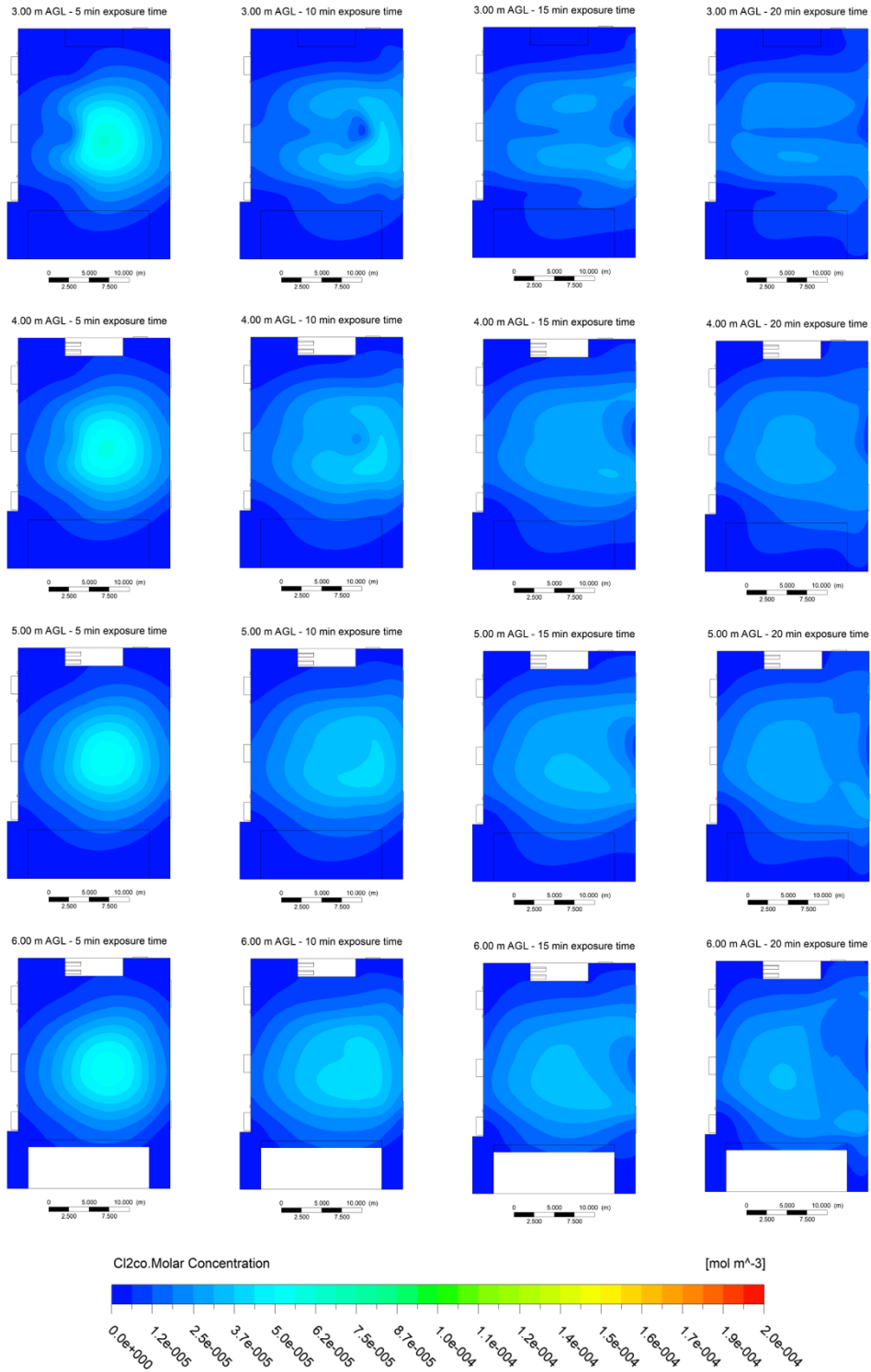


Σχήμα 4.48: Η κατανομή των συγκεντρώσεων φωσγενίου στην αίθουσα εκδηλώσεων 5, 10, 15 και 20 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του, στο επίπεδο x-z που τέμνει κατακόρυφα την πηγή.

Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις του φωσγενίου παρατηρούνται στο κέντρο του νέφους που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.46**. Για να παρουσιαστεί με αρτιότερο τρόπο η κατανομή των συγκεντρώσεων του νέφους, στο **Σχήμα 4.48** χρησιμοποιήθηκε ένα κατακόρυφο επίπεδο x-z που τέμνει την πηγή, στο οποίο εξετάζεται η κατανομή των συγκεντρώσεων του νέφους σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωσή του.

Στο **Σχήμα 4.48** φαίνεται πως σε χρόνο 5 λεπτά μετά την απελευθέρωση του φωσγενίου, ένα νέφος μεγάλης συγκέντρωσης σχηματίζεται στην περιοχή γύρω από την πηγή και φτάνει μέχρι την οροφή του χώρου. Δέκα λεπτά μετά το νέφος διασπείρεται προς τα βόρεια της αίθουσας όπου βρίσκονται τα ανοιγόμενα υαλοστάσια. Τα ρεύματα αέρα δημιουργούν σταδιακά μια περιοχή χαμηλότερων συγκεντρώσεων μέχρι περίπου τα 2.20m AGL όπου βρίσκονται τα πρέκια των εισόδων και των εξόδων του χώρου. Στις περιοχές πάνω από τα πρέκια και μέχρι την οροφή της αίθουσας (H=6.60m) όπου οι ταχύτητες των ρευμάτων είναι πιο χαμηλές «παγιδεύεται» ένα μέρος του νέφους το οποίο διασπείρεται πιο αργά (**Σχήμα 4.49**). Στο γεγονός αυτό οφείλεται και η παρατήρηση μεγαλύτερων συγκεντρώσεων στα υψηλότερα επίπεδα συγκριτικά με τα χαμηλότερα στη θέση της πηγής μετά τα πρώτα δέκα λεπτά από την απελευθέρωση του φωσγενίου στο χώρο (**Σχήμα 4.45**).

Η περιοχή μεγαλύτερων συγκεντρώσεων (**Σχήμα 4.48**) βρίσκεται κοντά στο επίπεδο της πηγής (1.00m AGL) και τα νέφη που αντιστοιχούν στις συγκεντρώσεις αυτές δεν φτάνουν στο χαμηλότερο επίπεδο αναπνοής (1.20m AGL) σε καμία από τις εξεταζόμενες χρονικές στιγμές (**Σχήμα 4.49**). Η επιφάνεια του νέφους υψηλότερων συγκεντρώσεων φαίνεται μικρότερη τη χρονική στιγμή 5 λεπτά μετά την απελευθέρωση του φωσγενίου σε σχέση με τις υπόλοιπες εξεταζόμενες χρονικές στιγμές γιατί αφενός το φωσγένιο κατεβαίνει προς χαμηλότερες θέσεις καθώς περνάει ο χρόνος, αφετέρου τα ρεύματα αέρα οδηγούν μέρος του νέφους προς τα κάτω καθώς δημιουργούν την περιοχή χαμηλότερων συγκεντρώσεων μέχρι τα 2.20m AGL.

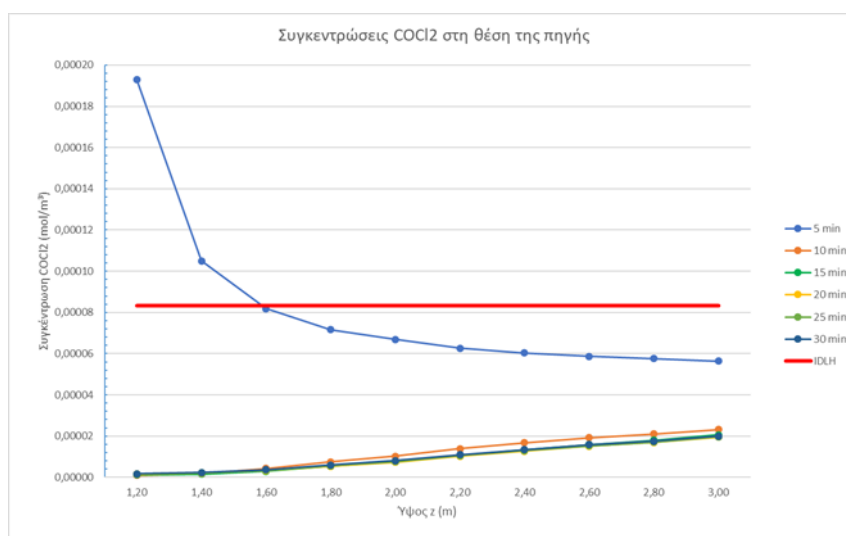


Σχήμα 4.49: Συγκεντρώσεις του νέφους φωσγενίου σε διάφορα επίπεδα AGL πάνω από τη ζώνη αναπνοής στην αίθουσα εκδηλώσεων, τις χρονικές στιγμές 5, 10, 15 και 20 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του.

Αποτελέσματα

4.2.4.2 Όριο IDLH φωσγενίου στην αίθουσα εκδηλώσεων

Η οριακή τιμή IDLH για το φωσγένιο είναι $8.321 \text{ e}^{-5} \text{ mol/m}^3$ (**Πίνακας 4.5**). Τη χρονική στιγμή 5 λεπτά μετά την απελευθέρωση του χημικού παράγοντα, οι συγκεντρώσεις του νέφους φωσγενίου υπερβαίνουν την οριακή τιμή IDLH στις θέσεις 1.20m και 1.40m AGL, πάνω από την πηγή. Πολύ κοντά στην οριακή τιμή βρίσκεται και η συγκέντρωση του νέφους στη θέση 1.60m AGL πάνω από την πηγή. Για όλες τις υπόλοιπες χρονικές στιγμές, η συγκέντρωση του νέφους φωσγενίου μένει κάτω από το IDLH σε όλες τις θέσεις πάνω από την πηγή μέχρι τα 3.00m AGL (**Σχήμα 4.50**).



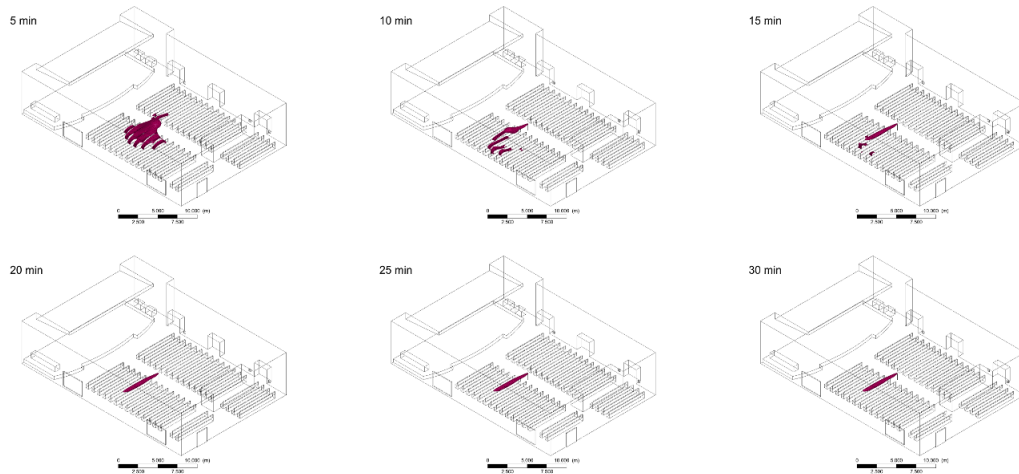
Σχήμα 4.50: Συγκεντρώσεις φωσγενίου στην αίθουσα εκδηλώσεων, σε διάφορα ύψη πάνω από τη θέση της πηγής, για διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωσή του, συγκριτικά με το IDLH.

Στο **Σχήμα 4.51** παρουσιάζονται οι περιοχές της αίθουσας εκδηλώσεων όπου η συγκέντρωση του νέφους φωσγενίου υπερβαίνει το IDLH σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωση του στο χώρο. Το νέφος συγκέντρωσης μεγαλύτερης του IDLH είναι μεγαλύτερο σε όγκο στα 5 πρώτα λεπτά και στη συνέχεια διασπείρεται υπό την επίδραση των ρευμάτων αέρα. Οι πιο προβληματικές περιοχές εντοπίζονται στην πλευρά των βορείων καθισμάτων, κοντά στην πηγή, όπου παρουσιάζεται μικρού όγκου νέφος συγκέντρωσης μεγαλύτερης του IDLH μέχρι και το τέλος του χρόνου παρατήρησης (30 λεπτά).

Σημειώνεται πως το IDLH είναι όριο κατωφλιού και έτσι το νέφος συγκέντρωσης μεγαλύτερης του IDLH δεν είναι ομοιογενές αλλά μπορεί να περικλείει σημεία σημαντικά μεγαλύτερων συγκεντρώσεων (**Σχήμα 4.47** και **Σχήμα 4.48**).

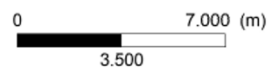
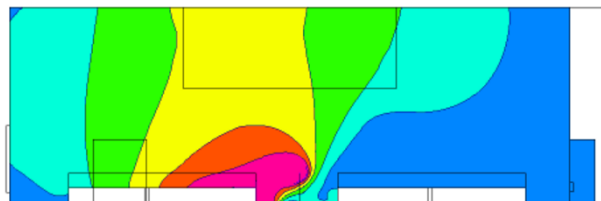
Στο **Σχήμα 4.52** παρουσιάζεται η κατανομή των συγκεντρώσεων του νέφους φωσγενίου 5 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του στα επίπεδα x-z και y-z που τέμνουν κατακόρυφα την πηγή. Στο επίπεδο x-z φαίνεται πως το νέφος συγκέντρωσης μεγαλύτερης

του IDLH κινείται προς χαμηλότερα σημεία και καταλαμβάνει περιοχή από το δάπεδο του χώρου ως το 1.40m AGL (βλ. Σχήμα 4.50 για συγκεντρώσεις πάνω από τη θέση της πηγής).

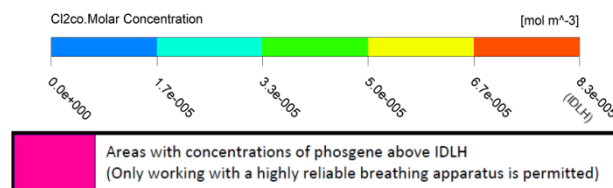
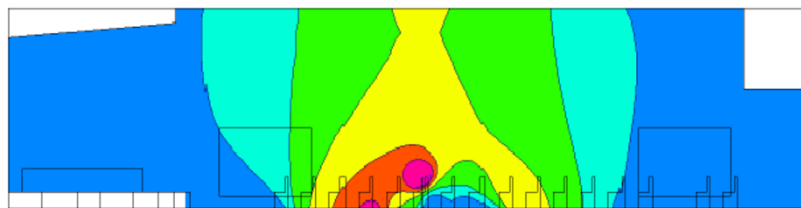


Σχήμα 4.51: Συγκεντρώσεις φωσγενίου μεγαλύτερες του IDLH στην αίθουσα εκδηλώσεων, σε διάφορες χρονικές στιγμές μετά την απελευθέρωσή του.

x-z vertical intersection plane at the source / 5 min exposure time



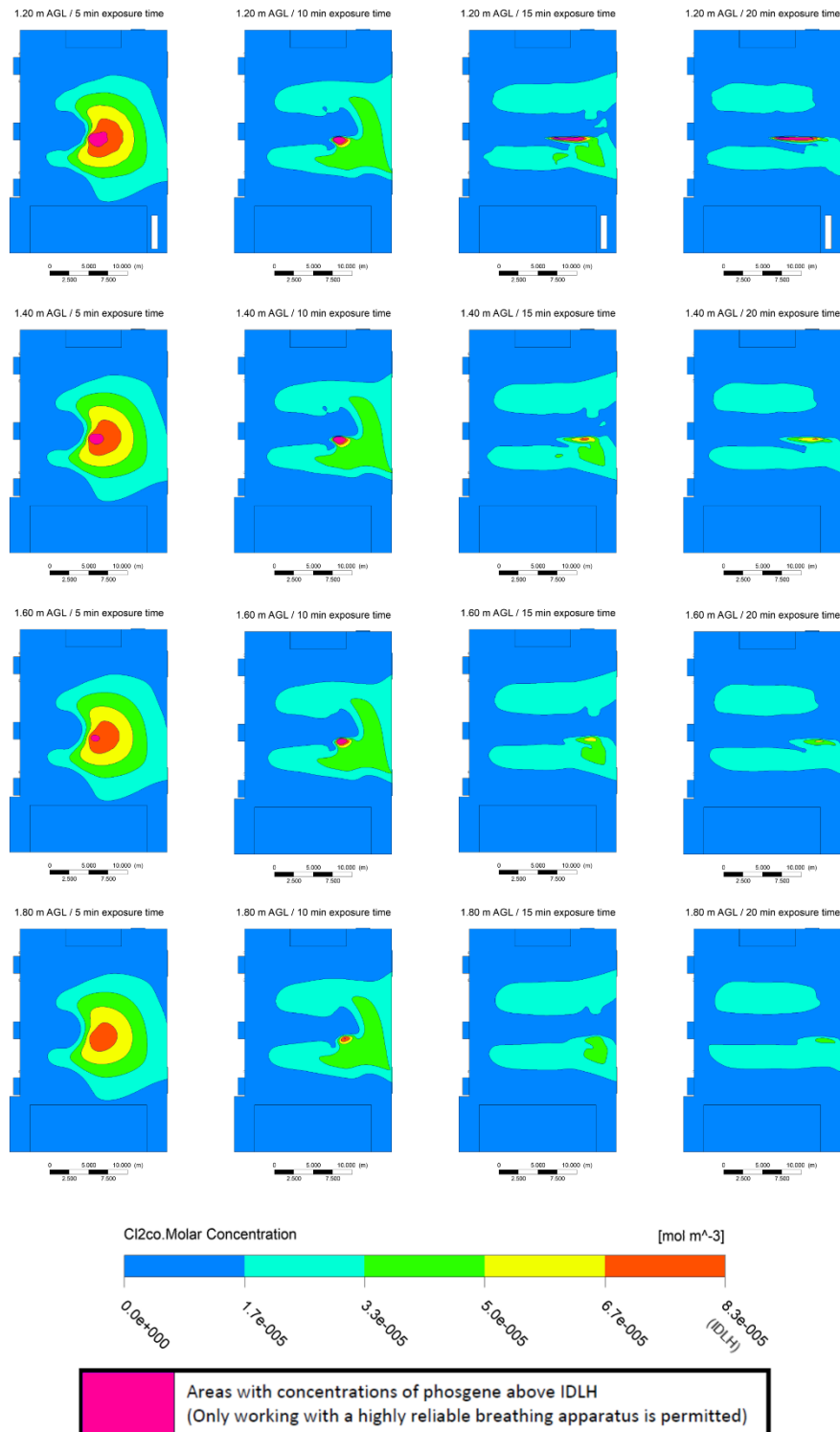
y-z vertical intersection plane at the source / 5 min exposure time



Σχήμα 4.52: Η κατανομή των συγκεντρώσεων του φωσγενίου στην αίθουσα εκδηλώσεων 5 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του, στα επίπεδα x-z και y-z που τέμνουν κατακόρυφα την πηγή.

Αποτελέσματα

Στο **Σχήμα 4.53** παρουσιάζεται η κατανομή των συγκεντρώσεων του φωσγενίου στα οριζόντια επίπεδα εντός της ζώνης αναπνοής, κατά τις χρονικές στιγμές 5, 10, 15 και 20 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του. Στην αίθουσα εκδηλώσεων δεν εντοπίζονται συγκεντρώσεις του φωσγενίου πάνω από τη ζώνη αναπνοής, όπως συμβαίνει στο χώρο γραφείου.



Σχήμα 4.53: Η κατανομή των συγκεντρώσεων φωσγενίου στα οριζόντια επίπεδα της ζώνης αναπνοής, τις χρονικές στιγμές 5, 10, 15 και 20 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του, στην αίθουσα εκδηλώσεων.

Το νέφος συγκέντρωσης μεγαλύτερης του IDLH καταλαμβάνει τη χρονική στιγμή 5 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του ένα μικρό χώρο κοντά στην πηγή μέχρι το οριζόντιο επίπεδο 1.60m AGL. Σταδιακά το νέφος κινείται προς τα ανοιγόμενα υαλοστάσια στα βόρεια της αίθουσας εκδηλώσεων και εντοπίζεται μόνο στα χαμηλότερα εξεταζόμενα οριζόντια επίπεδα (μέχρι το 1.40m AGL για χρόνο έκθεσης 10 λεπτά – μέχρι το 1.20m AGL για χρόνους έκθεσης 15 και 20 λεπτά).

Το κύριο σώμα του νέφους μοιράζεται σε δύο μέρη και εξέρχεται και από τα δύο ανοιγόμενα υαλοστάσια. Ωστόσο, λόγω της θέσης της πηγής σε σχέση με τις εισόδους-εξόδους των ρευμάτων αέρα, οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις παρατηρούνται προς τα βορειοανατολικά. Το ίδιο παρατηρήθηκε και στην περίπτωση της αμμωνίας, μόνο που εκεί λόγω του μεγέθους του νέφους και της θέσης όπου εκείνο συσσωρεύεται, το νέφος δεν διαχωρίστηκε προς τα δύο ανοιγόμενα υαλοστάσια αλλά κατευθύνθηκε προς εκείνο που βρίσκεται ανατολικά της αίθουσας (για προσανατολισμό βλ. **Σχήμα 4.29**).

Στον **Πίνακα 4.12** παρουσιάζεται η επιφάνεια που καταλαμβάνει το νέφος φωσγενίου συγκέντρωσης μεγαλύτερης του IDLH σε καθένα από τα εξεταζόμενα οριζόντια επίπεδα, περιοχή η οποία απεικονίζεται στο **Σχήμα 4.53**.

Πίνακας 4.12: Επιφάνεια νέφους φωσγενίου συγκέντρωσης μεγαλύτερης του IDLH σε διάφορα επίπεδα AGL, τις χρονικές στιγμές 5,10,15 και 20 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του, στην αίθουσα εκδηλώσεων.

Horizontal level	exposure time: 5 min		exposure time: 10 min		exposure time: 15 min		exposure time: 20 min	
	Level area over IDLH		Level area over IDLH		Level area over IDLH		Level area over IDLH	
	%	(m ²)	%	(m ²)	%	(m ²)	%	(m ²)
1.20 m AGL	0.829	4.54	0.088	0.48	0.179	0.98	0.245	1.34
1.40 m AGL	0.525	2.88	0.091	0.50	0.000	0.000	0.000	0.000
1.60 m AGL	0.298	1.63	0.035	0.19	0.000	0.000	0.000	0.000
1.80 m AGL	0.000	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00

Στον πίνακα φαίνεται πως σε κάθε εξεταζόμενη χρονική στιγμή, η επιφάνεια που καταλαμβάνει το νέφος συγκέντρωσης μεγαλύτερης του IDLH είναι μεγαλύτερη στα χαμηλότερα εξεταζόμενα επίπεδα συγκριτικά με τα ψηλότερα, κάτι αναμενόμενο για ένα χημικό παράγοντα βαρύτερο του αέρα. Σημειώνεται πως το IDLH είναι όριο κατωφλιού και επομένως το νέφος συγκέντρωσης μεγαλύτερης του IDLH δεν είναι ομοιογενές. Έτσι, στο επίπεδο αναπνοής 1.20m AGL, το νέφος παρουσιάζει μικρή αύξηση της επιφάνειάς του με την πάροδο του χρόνου, η συνολική του συγκέντρωση ωστόσο είναι συνολικά μικρότερη (**Σχήμα 4.47**).

4.2.4.3 Όρια AEGIs φωσγενίου στην αίθουσα εκδηλώσεων

Για την περίπτωση του φωσγενίου ορίζονται μόνο τα δύο από τα τρία όρια AEGI, αφού δεν υπάρχουν αρκετά στοιχεία για τον ασφαλή ορισμό του AEGI-1. Οι τροποποιημένες τιμές τους για τις εξεταζόμενες περιόδους έκθεσης των 10 και 30 λεπτών παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.6**.

Σε χρόνο 10 λεπτά μετά την απελευθέρωση του φωσγενίου, νέφος συγκέντρωσης μεγαλύτερης από το AEGI-2 καταλαμβάνει ένα μεγάλο μέρος του χώρου γύρω από την πηγή, φτάνοντας ως την οροφή του (**Σχήμα 4.54**). Εξετάζεται η συγκέντρωση του νέφους σε διάφορα ύψη από το δάπεδο ως την οροφή του χώρου στην θέση “C” που βρίσκεται προς την πλευρά που κινείται το ρεύμα αέρα και στην θέση “D” που βρίσκεται στην αντίθετη κατεύθυνση. Οι δύο θέσεις επιλέχθηκαν λόγω της υπέρβασης σε αυτές των οριακών τιμών AEGI στα περισσότερα οριζόντια επίπεδα και παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.29**.

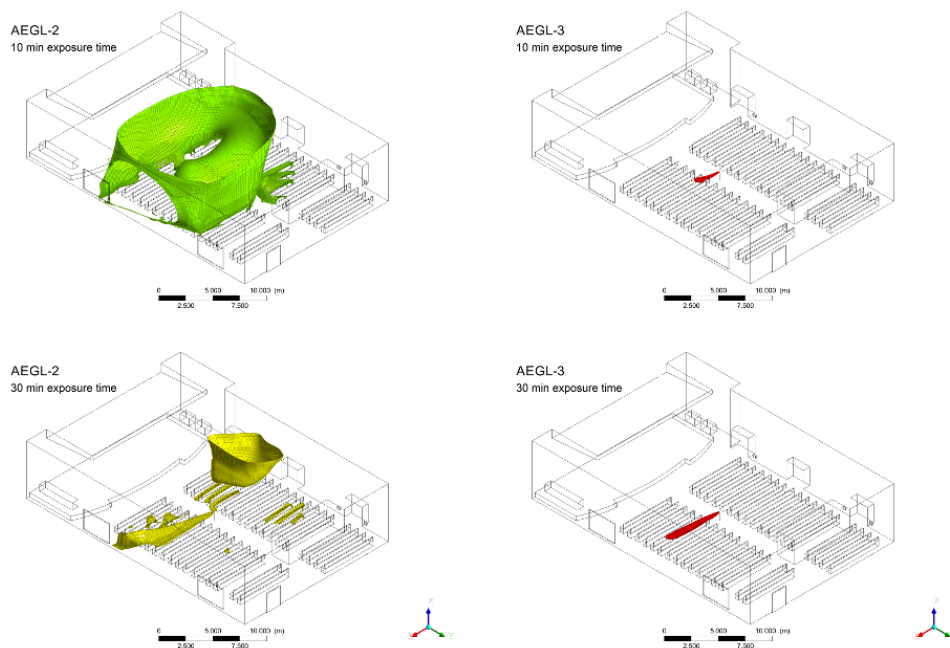
Στη θέση “C” το νέφος φωσγενίου υπερβαίνει την οριακή τιμή AEGI-2 σε όλα τα οριζόντια επίπεδα από το έδαφος μέχρι το 1.80m AGL. Παρατηρείται στη συνέχεια μια πτώση της συγκέντρωσης του νέφους κάτω του ορίου κατωφλιού AEGI-2 μέχρι τα 3.60m AGL, επίπεδα που φαίνεται πως ο φυσικός αερισμός είναι πιο αποτελεσματικός. Τέλος, στα επίπεδα πάνω από τα 3.60m AGL, που βρίσκονται πάνω από τα πρέκια των ανοιγμάτων της αίθουσας και η ταχύτητα των ρευμάτων αέρα είναι μικρότερη, παρατηρείται αύξηση της συγκέντρωσης σε τιμές πάνω από το AEGI-2 μέχρι και την οροφή του χώρου. Η οριακή τιμή AEGI-3 υπερβαίνεται μόνο στα οριζόντια επίπεδα 1.10-1.50m AGL (**Σχήμα 4.55**).

Στη θέση “D” η κατάσταση είναι καλύτερη, αφού αυτή βρίσκεται προς τα νότια της αίθουσας, αντίθετα της πλευράς προς την οποία κινείται το νέφος του φωσγενίου, υπό την επίδραση των ρευμάτων αέρα. Η οριακή τιμή AEGI-2 υπερβαίνεται και εδώ σε όλα τα οριζόντια επίπεδα, με την συγκέντρωση του νέφους να είναι πιο αυξημένη κοντά στο δάπεδο, μέχρι του ύψους των 0.80m AGL. Νέφος συγκέντρωσης μεγαλύτερης του AEGI-3 δεν σχηματίζεται σε κανένα επίπεδο (**Σχήμα 4.56**).

Σε χρόνο 30 λεπτών μετά την απελευθέρωση του φωσγενίου, νέφος συγκέντρωσης μεγαλύτερης του AEGI-2 εντοπίζεται στα χαμηλότερα επίπεδα της βόρειας πλευράς του χώρου, προς την πλευρά κίνησης δηλαδή των ρευμάτων αέρα. Επιπλέον, νέφος συγκέντρωσης μεγαλύτερης του AEGI-2 παραμένει και στην νότια πλευρά του χώρου, στα επίπεδα ψηλότερα από τα πρέκια των ανοιγμάτων, όπου η ταχύτητα του ρεύματος αέρα είναι μικρότερη (**Σχήμα 4.54**). Ομοίως με την χρονική στιγμή έκθεσης 10 λεπτών, εξετάζεται

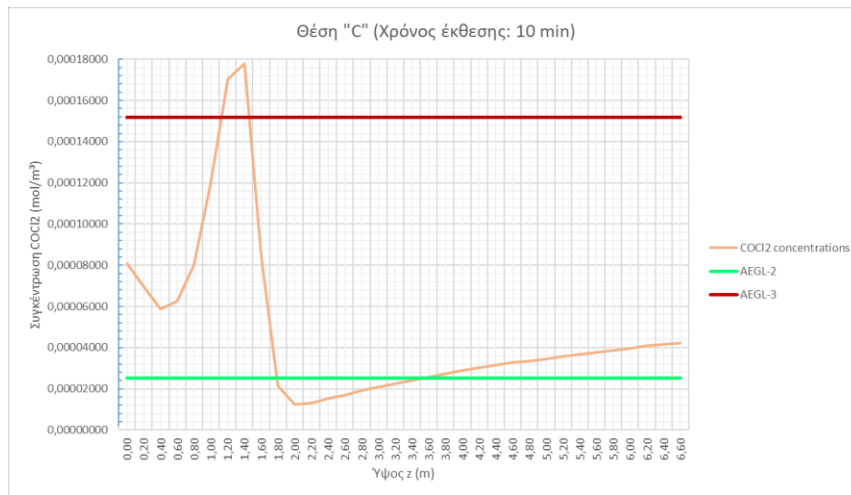
και εδώ η συγκέντρωση του νέφους στις θέσεις “Ε” και “F” που παρουσιάζονται στο **Σχήμα 4.29**.

Στη θέση “Ε”, η οριακή τιμή AEGL-2 υπερβαίνεται στα επίπεδα από 0.90m μέχρι 1.90m AGL, ενώ στα επίπεδα από 1.10m μέχρι 1.40m AGL παρατηρείται υπέρβαση και του ορίου AEGL-3, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4.57**. Στην θέση “F” που βρίσκεται νότια της πηγής, στην πλευρά αντίθετα της κίνησης του νέφους φωσγενίου, οι οριακές τιμές AEGL-2 και AEGL-3 δεν υπερβαίνονται σε κανένα οριζόντιο επίπεδο μέχρι και την μέση του ύψους του χώρου. Νέφος συγκέντρωσης μεγαλύτερο του AEGL-2 παραμένει στα επίπεδα από τα 3.50m AGL μέχρι την οροφή του χώρου, στην περιοχή πάνω από τα πρέκια των ανοιγμάτων, όπου ο φυσικός αερισμός είναι λιγότερο αποτελεσματικός (**Σχήμα 4.58**).

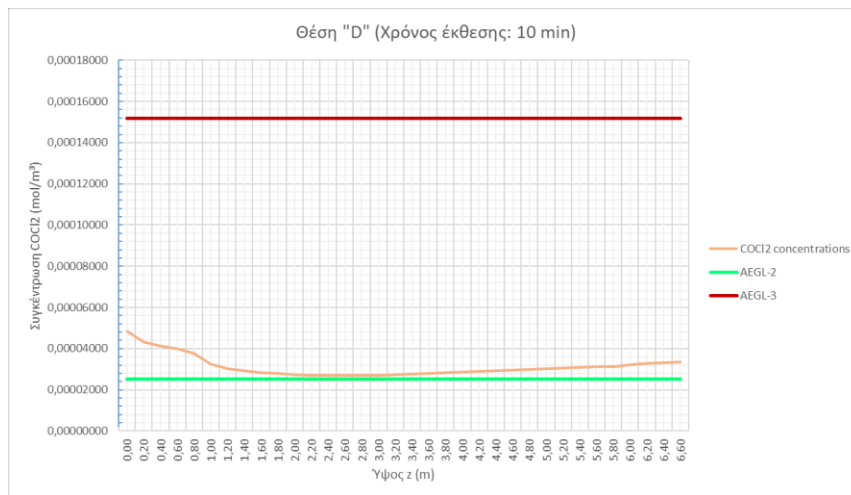


Σχήμα 4.54: Νέφη συγκεντρώσεων μεγαλύτερων των οριακών τιμών AEGL για το φωσγένιο στην αίθουσα εκδηλώσεων, για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτά.

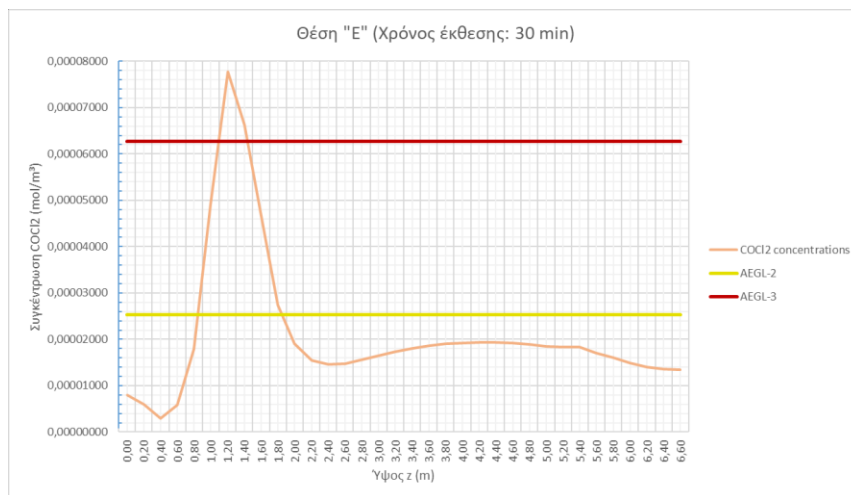
Αποτελέσματα



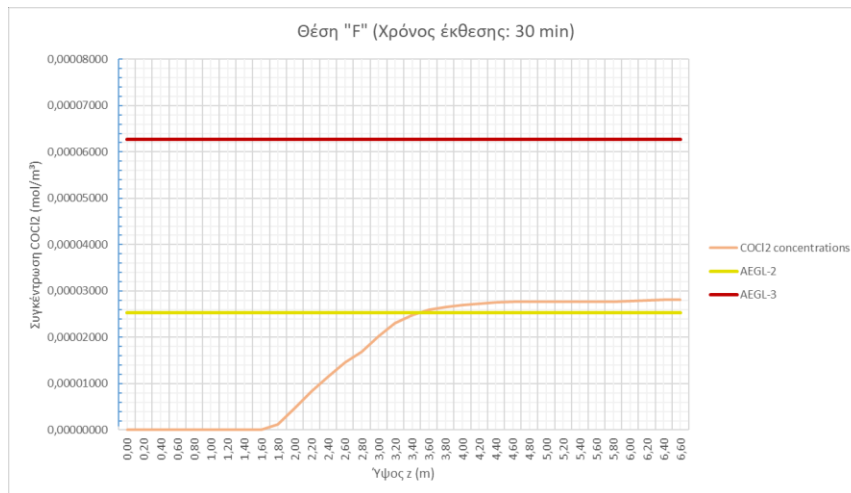
Σχήμα 4.55: Συγκεντρώσεις φωσγενίου σε διάφορα ύψη στη θέση "C" της αίθουσας εκδηλώσεων, συγκριτικά με τα AEGL-2 και AEGL-3, για χρόνο έκθεσης 10 λεπτά.



Σχήμα 4.56: Συγκεντρώσεις φωσγενίου σε διάφορα ύψη στη θέση "D" της αίθουσας εκδηλώσεων, συγκριτικά με τα AEGL-2 και AEGL-3, για χρόνο έκθεσης 10 λεπτά.



Σχήμα 4.57: Συγκεντρώσεις φωσγενίου σε διάφορα ύψη στη θέση "E" της αίθουσας εκδηλώσεων, συγκριτικά με τα AEGL-2 και AEGL-3, για χρόνο έκθεσης 30 λεπτά.



Σχήμα 4.58: Συγκεντρώσεις φωσγενίου σε διάφορα ύψη στη θέση "F" της αίθουσας εκδηλώσεων, συγκριτικά με τα AEGl-2 και AEGl-3, για χρόνο έκθεσης 30 λεπτά.

Συγκεντρώσεις μικρότερες του AEGl-2 στα εξεταζόμενα επίπεδα αναπνοής

Οι περιοχές με μπλε χρώμα στο **Σχήμα 4.59** και με γαλάζιο στο **Σχήμα 4.60**, αντιπροσωπεύουν τις περιοχές των επιπέδων αναπνοής 1.20m και 1.80m AGL, όπου η συγκέντρωση του φωσγενίου δεν υπερβαίνει την τιμή AEGl-2, για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτών αντίστοιχα. Οι επιφάνειες των επιπέδων αναπνοής που καταλαμβάνουν τα νέφη αυτά παρουσιάζονται στον **Πίνακας 4.13**.

- Στο επίπεδο αναπνοής 1.20m AGL, τα νέφη συγκεντρώσεων μικρότερων του AEGl-2 καταλαμβάνουν το 79.53% (435.82m²) της επιφάνειάς του επιπέδου αναπνοής για χρόνο έκθεσης 10 λεπτών και το 98.56% (540.11m²) για χρόνο έκθεσης 30 λεπτών.
- Στο επίπεδο αναπνοής 1.80m AGL, τα νέφη συγκεντρώσεων μικρότερων του AEGl-2 καταλαμβάνουν το 86.08% (471.72m²) της επιφάνειας του επιπέδου αναπνοής για χρόνο έκθεσης 10 λεπτών και το 99.30% (544.16m²) για χρόνο έκθεσης 30 λεπτών.

Οι περιοχές αυτές καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο ποσοστό της επιφάνειας των επιπέδων αναπνοής και για τους δύο εξεταζόμενους χρόνους έκθεσης. Σε αυτές, οι συγκεντρώσεις του φωσγενίου δεν έχουν αδρανοποιητική δράση και οι χρήστες του χώρου δεν μπορούν με τις αισθήσεις τους (όσφρηση, γεύση, όραση) να αντιληφθούν την παρουσία του χημικού παράγοντα. Η απουσία ερεθισμάτων που θα μπορούσαν να προειδοποιήσουν εγκαίρως τους χρήστες του χώρου, μπορεί να παρατείνει τον χρόνο παραμονής τους στο μολυσμένο περιβάλλον, με αποτέλεσμα πιθανή έκθεσή τους σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις.

Συγκεντρώσεις μεγαλύτερες του AEGl-2 στα εξεταζόμενα επίπεδα αναπνοής

Οι περιοχές με πράσινο χρώμα στο **Σχήμα 4.59** και κίτρινο χρώμα στο **Σχήμα 4.60** αντιπροσωπεύουν τις περιοχές των δύο εξεταζόμενων επιπέδων αναπνοής 1.20m AGL και 1.80m AGL όπου η συγκέντρωση του φωσγενίου υπερβαίνει την τιμή AEGl-2, για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτών. Οι επιφάνειες των επιπέδων αναπνοής που καταλαμβάνουν τα νέφη αυτά παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.13**.

- Στο επίπεδο αναπνοής 1.20m AGL, τα νέφη συγκεντρώσεων μεγαλύτερων του AEGl-2 καταλαμβάνουν το 20.34% (111.46m²) της επιφάνειάς του επιπέδου αναπνοής για χρόνο έκθεσης 10 λεπτών και το 0.84% (4.60m²) για χρόνο έκθεσης 30 λεπτών.
- Στο επίπεδο αναπνοής 1.80m AGL, τα νέφη συγκεντρώσεων μεγαλύτερων του AEGl-2 καταλαμβάνουν το 13.92% (76.28m²) της επιφάνειας του επιπέδου αναπνοής για χρόνο έκθεσης 10 λεπτών και το 0.70% (3.84m²) για χρόνο έκθεσης 30 λεπτών.

Οι περιοχές αυτές μπορούν να θεωρηθούν επικίνδυνες, αφού οι συγκεντρώσεις του φωσγενίου έχουν αδρανοποιητική δράση και δεν επιτρέπουν την ασφαλή διαφυγή των χρηστών από το μολυσμένο περιβάλλον. Οι χρήστες του χώρου είναι πιθανό να αντιληφθούν την οσμή του φωσγενίου στο χώρο για τις δύο περιόδους έκθεσης, δεν μπορούν ωστόσο να την ταυτοποιήσουν (**Πίνακας 4.7**), με αποτέλεσμα να υπάρχει και εδώ κίνδυνος αύξησης του χρόνου έκθεσης τους στο χημικό παράγοντα. Επιπλέον, είναι πιθανή η εμφάνιση χημικής πνευμονίας στους χρήστες, η οποία μπορεί να εκδηλωθεί μέχρι και 72 ώρες μετά την έκθεσή.

Συγκεντρώσεις μεγαλύτερες του AEGl-3 στα εξεταζόμενα επίπεδα αναπνοής

Οι περιοχές με κόκκινο χρώμα στο **Σχήμα 4.59** και στο **Σχήμα 4.60** αντιπροσωπεύουν τις περιοχές των επιπέδων αναπνοής 1.20m AGL και 1.80m AGL όπου η συγκέντρωση του φωσγενίου υπερβαίνει την οριακή τιμή AEGl-3. Οι επιφάνειες των επιπέδων αναπνοής που καταλαμβάνουν τα νέφη αυτά παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.13**.

- Στο επίπεδο αναπνοής 1.20m AGL, τα νέφη συγκεντρώσεων μεγαλύτερων του AEGl-3 καταλαμβάνουν το 0.13% (0.71m²) της επιφάνειας του επιπέδου αναπνοής για χρόνο έκθεσης 10 λεπτών και το 0.60% (3.29m²) για χρόνο έκθεσης 30 λεπτών.
- Στο επίπεδο αναπνοής 1.80m AGL δεν παρατηρείται υπέρβαση της οριακής τιμής AEGl-3 για κανένα από τους δύο χρόνους έκθεσης.

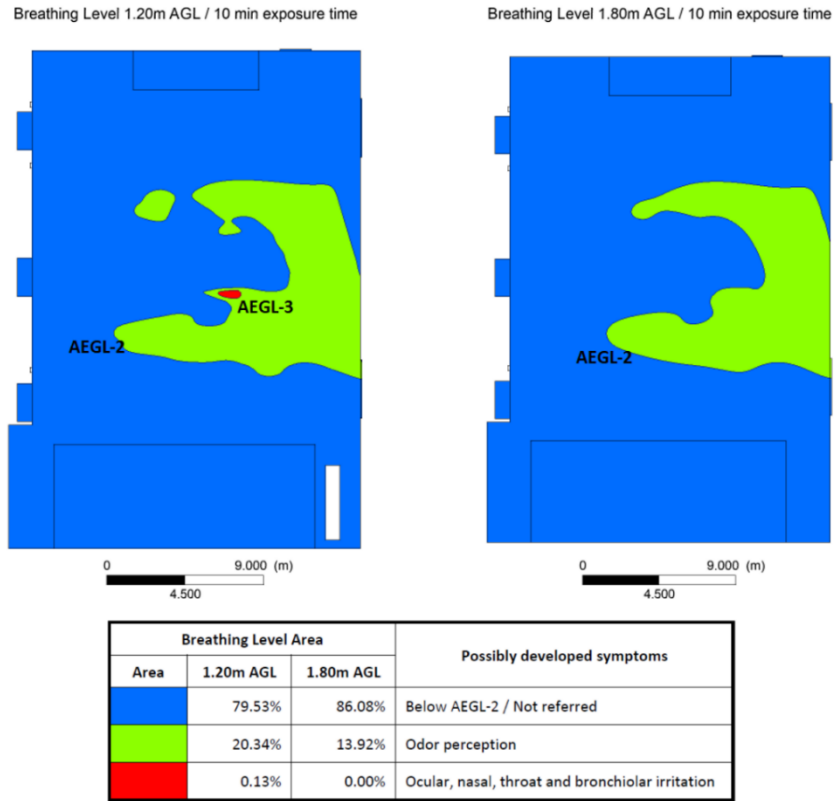
Η παρουσία περιοχών υπέρβασης της οριακής τιμής AEGL-3 μόνο στο χαμηλότερο επίπεδο αναπνοής δικαιολογείται από τις ιδιότητες του φωσγενίου (χημικός παράγοντας βαρύτερος του αέρα που κινείται σε χαμηλότερα επίπεδα). Για χρόνο έκθεσης 10 λεπτών η περιοχή υπέρβασης περιορίζεται γύρω από την πηγή, με αποτέλεσμα η πιθανότητα πρόκλησης οφθαλμικής, ρινικής ή βρογχιολικής όχλησης στους χρήστες του χώρου να είναι πολύ μικρή. Για χρόνο έκθεσης 30 λεπτών, καθώς το νέφος φωσγενίου κινείται προς τα βόρεια, η περιοχή υπέρβασης του AEGL-3 καταλαμβάνει ένα μικρό αλλά ικανό μέρος των βόρειων καθισμάτων. Οι χρήστες του χώρου στην περιοχή αυτή αντιλαμβάνονται την οσμή του χημικού παράγοντα και την ταυτοποιούν με την οσμή του φρεσκοκομμένου χορταριού. Οι συγκεντρώσεις του νέφους στις περιοχές υπέρβασης του AEGL-3 έχουν αδρανοποιητική και πιθανώς θανατηφόρα δράση, αν και ο θάνατος μπορεί να εμφανιστεί μέχρι και 72 ώρες μετά την έκθεση.

Σημειώνεται πως τα συμπτώματα που παρουσιάζουν οι χρήστες μετά από έκθεση σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες του AEGL-3 περιγράφονται σοβαρότερα για χρόνο έκθεσης 10 λεπτά σε σχέση με τα αντίστοιχα για χρόνο έκθεσης 30 λεπτά, γιατί η οριακή τιμή AEGL-3 για το φωσγένιο είναι αρκετά μεγαλύτερη για χρόνο έκθεσης 10 λεπτά σε σχέση με την αντίστοιχη για χρόνο έκθεσης 30 λεπτά (**Πίνακας 4.7**).

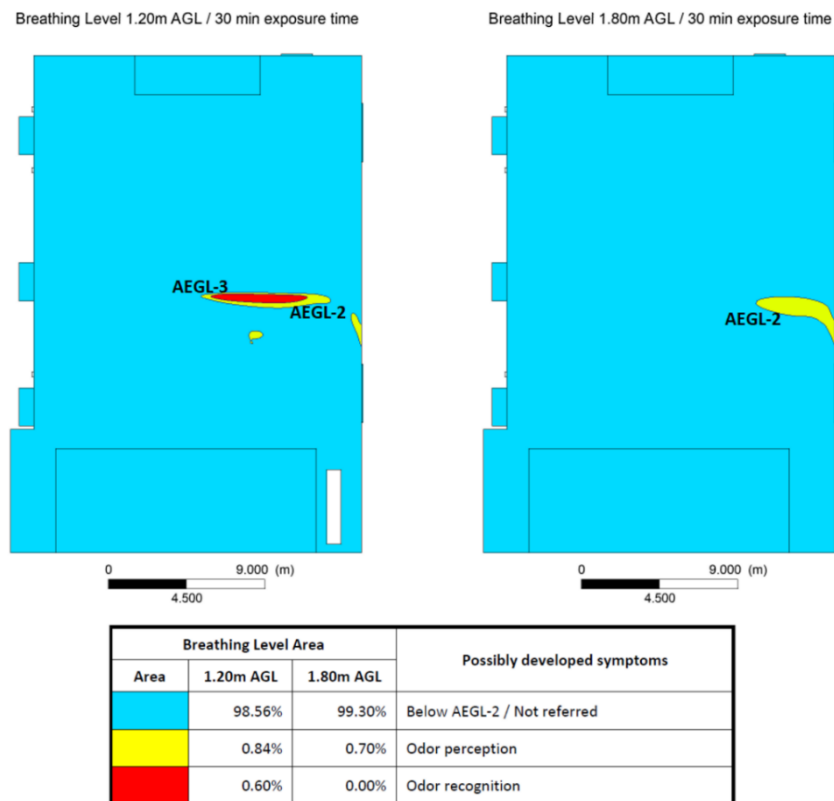
Πίνακας 4.13: Επιφάνεια των επιπέδων αναπνοής που καταλαμβάνουν τα νέφη φωσγενίου συγκριτικά με τα AEGLs, για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτά, στην αίθουσα εκδηλώσεων.

COCl ₂ concentration		Breathing Level: 1.20m AGL		Breathing Level: 1.80m AGL	
		Level area		Level Area	
		(%)	(m ²)	(%)	(m ²)
exposure time 10	below AEGL-2	79.53	435.82	86.08	471.72
	over AEGL-2	20.34	111.46	13.92	76.28
	over AEGL-3	0.13	0.71	0.00	0.00
	Total	100	548.00	100.00	548.00
exposure time 30	below AEGL-2	98.56	540.11	99.30	544.16
	over AEGL-2	0.84	4.60	0.70	3.84
	over AEGL-3	0.60	3.29	0.00	0.00
	Total	100.00	548.00	100.00	548.00

Αποτελέσματα



Σχήμα 4.59: Οριακές τιμές AEGL για το φωσγένιο, στα επίπεδα αναπνοής 1.20m και 1.80m AGL, για χρόνο έκθεσης 10 λεπτά, στην αίθουσα εκδηλώσεων.



Σχήμα 4.60: Οριακές τιμές AEGL για το φωσγένιο, στα επίπεδα αναπνοής 1.20m και 1.80m AGL, για χρόνο έκθεσης 30 λεπτά, στην αίθουσα εκδηλώσεων.

5 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία ασχολείται με την εκτίμηση της επίδρασης δύο χημικών παραγόντων, της αμμωνίας και του φωσγενίου, σε χώρους όπου οι χρήστες τους δεν είναι εξοικειωμένοι με την παρουσία χημικών παραγόντων στον περιβάλλοντα αέρα και επομένως δεν είναι προετοιμασμένοι να εφαρμόσουν μέτρα έκτακτης ανάγκης.

Για κάθε χημικό παράγοντα μελετήθηκε ξεχωριστά η απελευθέρωση και η διασπορά του, κάτω από την επίδραση του φυσικού αερισμού, σε δύο εσωτερικούς χώρους: σε ένα τυπικό χώρο γραφείου και στην αίθουσα εκδηλώσεων «Γεώργιος Μυλωνάς», τον κύριο χώρο εκδηλώσεων του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων. Οι δύο χώροι έχουν σημαντικές διαφορές κυρίως ως προς το μέγεθός τους (εμβαδόν – ύψος - όγκος) έχουν όμως κοινά χαρακτηριστικά σε ότι αφορά την θέση της πηγής και την κυκλοφορία του εσωτερικού αέρα.

Οι χημικοί παράγοντες που χρησιμοποιήθηκαν έχουν μεταξύ τους σημαντικές διαφορές. Η αμμωνία, με μοριακό βάρος μικρότερο του αέρα, έχει την τάση να κινείται προς υψηλότερα επίπεδα μετά την απελευθέρωσή της και έχει χαμηλή τοξικότητα. Η ποσότητα αμμωνίας που χρησιμοποιήθηκε και για τους δύο χώρους είναι ίδια. Η επιλογή έγινε με τη λογική αυτή να μπορεί να μεταφερθεί μέσα σε ένα μικρού μεγέθους, όχι εύκολα αντιληπτού δοχείου, από ένα και μόνο άτομο, το οποίο θα επιθυμούσε να δημιουργήσει ένα χημικό περιστατικό.

Η ποσότητα αμμωνίας που τελικά απελευθερώνεται στους δύο χώρους χωράει σε ένα δοχείο περιεκτικότητας ενός λίτρου και είναι ικανή να δημιουργήσει περιοχές όπου οι χρήστες μπορούν να αισθανθούν ήπια ενόχληση του αναπνευστικού, κυρίως 10 λεπτά μετά την απελευθέρωσή της και στους δύο χώρους. Η κατάσταση είναι σαφώς πιο επιβαρυσμένη στον χώρο γραφείου, που για χρόνο έκθεσης 10 λεπτά οι περιοχές αυτές καταλαμβάνουν σημαντικό μέρος της επιφάνειας των επιπέδων αναπνοής, ενώ στην αίθουσα εκδηλώσεων η περιοχή περιορίζεται κοντά στη θέση της πηγής. Στο μεγαλύτερο μέρος της αίθουσας εκδηλώσεων οι χρήστες του χώρου είναι πιθανό να μην αντιληφθούν την παρουσία της αμμωνίας.

Σε ότι αφορά την διασπορά της αμμωνίας, στο χώρο γραφείου κινείται, όπως θα ήταν αναμενόμενο, προς υψηλότερα επίπεδα δημιουργώντας μια πιο επιβαρυσμένη κατάσταση στο επίπεδο αναπνοής 1.80m AGL σε σχέση με εκείνη στο 1.20m AGL. Στην αίθουσα εκδηλώσεων και πάλι κινείται ανοδικά μέχρι ενός ύψους, δεν φαίνεται όμως να υπάρχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις ανάμεσα στα δύο εξεταζόμενα επίπεδα αναπνοής, κάτι που

Συμπεράσματα

οφείλεται στο μεγάλο μέγεθος της αίθουσας και την μικρή ποσότητα αμμωνίας (για ενός τέτοιου μεγέθους χώρο) που απελευθερώθηκε. Στους δύο εξεταζόμενους χώρους, τα έπιπλα και ο εξοπλισμός δεν φαίνεται να παίζουν ρόλο στην διασπορά του ρύπου και την αποσυμφόρηση του περιβάλλοντος αέρα.

Ο φυσικός αερισμός κρίνεται αποτελεσματικός και στους δύο χώρους, όπου 30 λεπτά μετά την απελευθέρωσή της αμμωνίας οι περιοχές συγκέντρωσης μεγαλύτερης του AEG1-1 περιορίζονται σημαντικά στα επίπεδα αναπνοής, ενώ πολύ μικρές περιοχές όπου η συγκέντρωση της αμμωνίας ξεπερνά το AEG1-2 για χρόνο έκθεσης 10 λεπτών (κυρίως στην περίπτωση του χώρου γραφείου), εξαφανίζονται. Σε καμία χρονική στιγμή δεν δημιουργούνται στους δύο χώρους συνθήκες έκτακτης ανάγκης, με τους χρήστες να κινδυνεύουν από σοβαρές, μη αναστρέψιμες επιπτώσεις στην υγεία τους ή θάνατο.

Συμπερασματικά, δεν είναι εφικτό ένα μόνο άτομο να μπορέσει να δημιουργήσει ένα σοβαρό χημικό περιστατικό με αμμωνία, σε κανένα από τους δύο χώρους και δεν θεωρείται απαραίτητη η συμβολή τεχνητού αερισμού για την αποτελεσματική αποσυμφόρηση του χώρου και αποκατάσταση της IAQ.

Το φωσγένιο είναι αέριο με μοριακό βάρος μεγαλύτερο του αέρα που μετά την απελευθέρωσή του ρέει προς χαμηλότερες περιοχές, εκτοπίζοντας από αυτές το οξυγόνο. Είναι ένας χημικός παράγοντας με υψηλή τοξικότητα και για το λόγο αυτό προσομοιώθηκε η απελευθέρωση μικρότερης ποσότητας φωσγενίου σε σχέση με την περίπτωση της αμμωνίας. Στους δύο εξεταζόμενους χώρους απελευθερώθηκε ίδια ποσότητα φωσγενίου, η οποία καθορίστηκε με το ίδιο σκεπτικό που ακολουθήθηκε και στην περίπτωση της αμμωνίας.

Η ποσότητα φωσγενίου που χρησιμοποιήθηκε μπορεί να χωρέσει σε ένα δοχείο περιεκτικότητας 100ml και είναι ικανή να δημιουργήσει στους δύο χώρους περιοχές που η συγκέντρωσή του έχει αδρανοποιητική ή και θανατηφόρα δράση. Η κατάσταση είναι σαφώς πιο επιβαρυνμένη στο χώρο γραφείου, που οι περιοχές αυτές για χρόνο έκθεσης 10 λεπτών καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο τμήμα της επιφάνειας των επιπέδων αναπνοής και η κατάσταση παραμένει εξαιρετικά σοβαρή και 30 λεπτά μετά την απελευθέρωσή του. Στην αίθουσα εκδηλώσεων, η κατάσταση είναι πιο επικίνδυνη για χρόνο έκθεσης 10 λεπτών όπου δημιουργείται περιοχή που το νέφος φωσγενίου έχει αδρανοποιητική δράση, ενώ δεν εντοπίζεται αξιοσημείωτου μεγέθους περιοχή όπου το νέφος έχει θανατηφόρα δράση.

Σε ότι αφορά την ροή του φωσγενίου, και στους δύο χώρους παρατηρούνται μεγαλύτερες περιοχές υψηλών συγκεντρώσεων στο χαμηλότερο επίπεδο αναπνοής σε σχέση

με το υψηλότερο. Το γεγονός πως η επίπλωση και ο εξοπλισμός των δύο χώρων βρίσκεται κοντά στο δάπεδο ωστόσο έχει σαν αποτέλεσμα τα νέφη υψηλών συγκεντρώσεων να εντοπίζονται και σε μεγαλύτερα ύψόμετρα.

Στον χώρο του γραφείου, νέφη συγκεντρώσεων μεγαλύτερων του AEGl-2 και AEGl-3 σχηματίζονται από το δάπεδο μέχρι την οροφή του χώρου, κυρίως στην δυτική του πλευρά όπου η ταχύτητα του ρεύματος αέρα είναι μικρότερη, για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτών. Στην αίθουσα εκδηλώσεων, εντοπίζονται κυρίως περιοχές με νέφη συγκέντρωσης μεγαλύτερης του AEGl-2, που καταλαμβάνουν μια ικανού μεγέθους περιοχή στο κέντρο του χώρου, όπου βρίσκεται και η πηγή και τα οποία επίσης φτάνουν μέχρι την οροφή του, για χρόνους έκθεσης 10 και 30 λεπτών. Για χρόνο έκθεσης 30 λεπτών, εντοπίζεται και μια μικρού μεγέθους περιοχή νέφους συγκέντρωσης μεγαλύτερης του AEGl-3, στην πλευρά των βόρειων καθισμάτων, στο επίπεδο αναπνοής 1.20m AGL.

Ο φυσικός αερισμός δεν φαίνεται να είναι αποτελεσματικός σε ότι αφορά την αποσυμφόρηση του περιβάλλοντος αέρα από την παρουσία του φωσγενίου, για κανένα από τους δύο χώρους. Στην περίπτωση του γραφείου, στην ανατολική πλευρά όπου πνέει το ρεύμα αέρα, και στα δύο επίπεδα αναπνοής εντοπίζεται μια περιοχή όπου η συγκέντρωση του φωσγενίου είναι μικρότερη του AEGl-2, για χρόνο έκθεσης 10 λεπτών, η οποία αυξάνει σε μέγεθος για χρόνο έκθεσης 30 λεπτών. Στην δυτική πλευρά του χώρου ωστόσο, παραμένουν νέφη συγκεντρώσεων μεγαλύτερων των AEGl-2 και AEGl-3 στο μεγαλύτερο ποσοστό της επιφάνειας και των δύο επιπέδων αναπνοής.

Στην περίπτωση της αίθουσας εκδηλώσεων, δημιουργούνται νέφη συγκεντρώσεων μεγαλύτερων του AEGl-2, με αδρανοποιητική δράση, που καταλαμβάνουν μεγάλο μέρος του κέντρου του χώρου για χρόνο έκθεσης 10 λεπτών. Σε χρόνο 30 λεπτά μετά την απελευθέρωση του φωσγενίου η κατάσταση στην αίθουσα εκδηλώσεων είναι σαφώς καλύτερη, νέφη συγκεντρώσεων μεγαλύτερων του AEGl-2 ωστόσο παραμένουν. Ενδιαφέρον παρουσιάζει 30 λεπτά μετά την απελευθέρωση, η παραμονή νέφους συγκέντρωσης μεγαλύτερης του AEGl-2 στην περιοχή πάνω από το ύψος των πρεκίων των ανοιγμάτων του χώρου, όπου τα ρεύματα αέρα έχουν μικρότερες ταχύτητες.

Συμπερασματικά, είναι δυνατό να δημιουργηθεί ένα πολύ σοβαρό χημικό περιστατικό από ένα μόνο άτομο και στους δύο εξεταζόμενους χώρους. Στην περίπτωση του χώρου γραφείου μάλιστα πάνω από το μισό των επιπέδων αναπνοής καταλαμβάνεται από νέφη αδρανοποιητικών ή θανατηφόρων συγκεντρώσεων. Ο φυσικός αερισμός δεν μπορεί να

Συμπεράσματα

αποσυμφορήσει αποτελεσματικά το χώρο και να αποκαταστήσει την IAQ και η συμβολή του τεχνητού αερισμού θεωρείται απαραίτητη.

Η χαμηλή τοξικότητα της αμμωνίας και η αδυναμία της να δημιουργήσει σοβαρά χημικά περιστατικά στους δύο χώρους, στρέφει το ενδιαφέρον της μελλοντικής έρευνας περισσότερο προς την περίπτωση του φωσγενίου. Αρχικά, μπορεί να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα του φυσικού αερισμού στην περίπτωση του φωσγενίου σε μεγαλύτερους χρόνους μετά την απελευθέρωσή του (π.χ. για χρόνο έκθεσης μιας ώρας) και να συγκριθεί με τις αντίστοιχες τιμές AEGIs. Επιπλέον, μπορεί να εξεταστεί η συμβολή του τεχνητού αερισμού στην αποκατάσταση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα, με χρήση του υφιστάμενου συστήματος επιτοίχιου εξαερισμού στον χώρο γραφείου και την αίθουσα εκδηλώσεων. Τέλος, μπορεί να εξεταστεί η συμβολή ενός συστήματος εξαερισμού οροφής στους δύο χώρους και να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων ώστε να προσδιοριστεί η αποτελεσματικότερη μέθοδος για την κατά το δυνατόν πιο άμεση αποκατάσταση της ποιότητας εσωτερικού αέρα.

Παραρτήματα

Ι. Χημικά Περιστατικά ανθρωπογενούς προέλευσης

Τα χημικά περιστατικά ανθρωπογενούς προέλευσης μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες: τα **χημικά ατυχήματα**, τα **χημικά περιστατικά σε καιρό ειρήνης** και τα **χημικά περιστατικά σε καιρό πολέμου**. Στο Παράρτημα αυτό γίνεται μια ενδεικτική αναφορά σε χημικά περιστατικά καθεμίας από τις παραπάνω κατηγορίες.

ι. Χημικά ατυχήματα

Μποπάλ, Ινδία (1984)

Στις 2 Δεκεμβρίου 1984, στο Μποπάλ της Ινδίας συνέβη ένα σοβαρότατο χημικό περιστατικό στο εργοστάσιο εντομοκτόνων της Union Carbide India Limited. Σε χρονικό διάστημα όχι μεγαλύτερο των 2 ωρών, απελευθερώθηκαν σε μια πυκνοκατοικημένη περιοχή περίπου 27 μετρικοί τόνοι ισοκυανικού μεθυλίου (MIC), ενός άχρωμου πτητικού υγρού εξαιρετικά δυσάρεστης και πνιγηρής οσμής (δακρυγόνο). Υπήρξε επίσης πιθανή απελευθέρωση ποσοτήτων φωσγενίου, υδροκυανίου, νιτρικών οξέων και μονοξειδίου του άνθρακα [42].

Οι χαμηλές ταχύτητες του αέρα και η θερμοκρασιακή αναστροφή δεν ευνόησαν την διασπορά των χημικών ουσιών, με αποτέλεσμα την έκθεση 200.000 κατοίκων της πόλης. Οι άμεσες απώλειες που καταγράφηκαν αρχικά ήταν 2.500 άτομα, μέχρι σήμερα ωστόσο εκτιμάται από ανεξάρτητους οργανισμούς πως λόγω του ατυχήματος έχουν χάσει τη ζωή τους 15.000 – 20.000 άτομα. Επιπλέον, μεγάλο κομμάτι του εκτιθέμενου πληθυσμού ανέπτυξε μη αναστρέψιμα αναπνευστικά προβλήματα, προβλήματα όρασης, αναπαραγωγική και γονιδιακή τοξικότητα, ενώ με το περιστατικό συνδέθηκαν και πολλές καρκινογένεσεις τα επόμενα χρόνια. Τέλος, σημαντικό κομμάτι του πληθυσμού ανέπτυξε μετά το περιστατικό νευροτοξικές διαταραχές της συμπεριφοράς και ψυχολογικές διαταραχές [42].

Το ατύχημα του Μποπάλ, για το οποίο υπήρξε έντονη αντιπαράθεση σχετικά με το αν ήταν πραγματικά βιομηχανικό ατύχημα ή τρομοκρατική ενέργεια [19], είχε μεγάλο αντίκτυπο στην κοινή γνώμη, η οποία ευαισθητοποιήθηκε γύρω από το ζήτημα της έκθεσης πληθυσμού σε επικίνδυνες χημικές και οδήγησε στην έναρξη μιας προσπάθειας για αναλυτική καταγραφή των επικίνδυνων χημικών παραγόντων και κατάστρωση σχεδίων αντιμετώπισης κρίσεων από την πλευρά των κυβερνήσεων [43] [44].

Τέξας, Η.Π.Α. (1987)

Στις 30 Οκτωβρίου 1987, σε εργοστάσιο πετροχημικών της εταιρείας Marathon Petroleum στο Τέξας, δύο αγωγοί μιας από τις δεξαμενές αποθήκευσης έσπασαν κατά την διάρκεια των εργασιών συντήρησης, με αποτέλεσμα την απελευθέρωση 24.036 κιλών υδροφθορικού οξέος (HF), μιας τοξικής, καυστικής χημικής ένωσης, με διαβρωτική δράση και πιθανώς μεταλλαξιγόνο. Η επαφή του HF με το δέρμα προκαλεί χημικά εγκαύματα, είναι ερεθιστικό των ματιών και σε περίπτωση εισπνοής ή κατάποσης ικανής ποσότητας είναι θανατηφόρο.

Μέσα στα πρώτα 7 λεπτά από το ατύχημα, η περιοχή οροθετήθηκε από ένα υδάτινο παραπέτασμα με σκοπό τον περιορισμό της διασποράς του αερίου. Παρόλα αυτά, δημιουργήθηκε ένα νέφος ατμών πάνω από την κοινότητα 41.000 κατοίκων, που βρισκόταν σε απόσταση 4 χιλιομέτρων από το εργοστάσιο, για διάστημα περίπου 48 ωρών. Οι περιοχές που βρισκόταν σε ακτίνα 8 χιλιομέτρων από το εργοστάσιο εκκενώθηκαν, κάτι που σήμαινε την απομάκρυνση 3.000 ατόμων.

Στα δύο νοσοκομεία της περιοχής αναζήτησαν ιατρική βοήθεια 939 άτομα, από τα οποία τα 845 ανέφεραν σχετικά ήπια συμπτώματα όπως ερεθισμούς των ματιών, της μύτης και του δέρματος, κάψιμο του λαιμού και πονοκέφαλο και δεν νοσηλεύτηκαν. Οι υπόλοιποι 94 παρουσίασαν επιπλέον μειωμένη πνευμονική λειτουργία και δύσπνοια, υποξαιμία και υπασβεσταμία και έχρηζαν νοσηλείας, ενώ δεν υπήρξε κανένας νεκρός [45].

ii. Χημικά περιστατικά σε καιρό ειρήνης

Ματσουμότο, Ιαπωνία (1994)

Στις 27 Ιουνίου 1995, μέλη της παραθρησκευτικής σχέτας Aum Shinrikyo, απελευθέρωσαν σε οικιστική περιοχή της πόλης Ματσουμότο στην Ιαπωνία, μια αρκετά μεγάλη, όπως εικάζεται, ποσότητα σαρίν. Το σαρίν είναι οργανική ένωση του φωσφόρου, άχρωμη, άγευστη και άοσμη, που χρησιμοποιείται σαν χημικό όπλο επειδή προσβάλλει το νευρικό σύστημα (νευροτοξικός παράγοντας). Τα θύματα μιας επίθεσης με σαρίν βιώνουν συνήθως μύση (συστολή της κόρης του ματιού), σπασμούς, αδυναμία, δύσπνοια και μειωμένη συνείδηση, ενώ η αναπνευστική ανεπάρκεια μπορεί να οδηγήσει σε θάνατο.

Τα μέλη της σχέτας πίστευαν στην έλευση της συντέλειας του κόσμου και στην επιβίωση μόνο των ιδίων και υιοθετούσαν συχνά βίαιες πρακτικές για να την επισπεύσουν. Η επίθεση πραγματοποιήθηκε τα μεσάνυχτα, ώστε να καθυστερήσουν κατά το δυνατό οι

ενέργειες διάσωσης. Περίπου 600 άτομα εκτέθηκαν στον χημικό παράγοντα, εκ των οποίων 58 χρειάστηκαν νοσηλεία και 7 κατέληξαν. Ανάμεσα στους 95 γιατρούς και διασώστες που συμμετείχαν στη διάσωση, οι 8 παρουσίασαν ήπια συμπτώματα δηλητηρίασης.

Όλες οι ενέργειες διάσωσης έγιναν χωρίς χρήση αντιασφυξιογόνων μασκών ή μεθόδων αποσυμφόρησης του περιβάλλοντος αέρα, παρόλα αυτά, ο μηχανισμός αντιμετώπισης κρίσεων που είχε στηθεί στην περιοχή για την αντιμετώπιση καταστροφών (πυρκαγιές, σεισμοί κλπ.), φάνηκε εξαιρετικά αποτελεσματικός [46].

Τόκιο, Ιαπωνία (1995)

Στις 20 Μαρτίου 1995 η ίδια παραθρησκευτική οργάνωση Aum Shinrikyo πραγματοποίησε δεύτερη τρομοκρατική επίθεση με σαρίν, αυτή τη φορά στο μετρό του Τόκιο. Η επίθεση έλαβε χώρα νωρίς το πρωί, που αναμενόταν πως η πληρότητα των βαγονιών θα ήταν στο ζενίθ. Πέντε μέλη της σχέτας επιβιβάστηκαν σε ισάριθμα, γεμάτα βαγόνια, έχοντας ο καθένας μαζί του από μια πλαστική σακούλα με υγρό σαρίν, την οποία στη συνέχεια τρύπησαν και απελευθερώθηκε τοξικό αέριο.

Το πλησιέστερο νοσοκομείο προετοιμάστηκε σε λιγότερο από μια ώρα να προφέρει τις υπηρεσίες του στα θύματα της επίθεσης και μέσα στις επόμενες δύο ώρες ζήτησαν ιατρική βοήθεια περίπου 500 άτομα, ενώ ο συνολικός αριθμός ατόμων που αναζήτησαν ιατρική βοήθεια την μέρα της επίθεσης ανέρχεται στους 640. Για την αντιμετώπιση του μεγάλου όγκου των θυμάτων, το νοσοκομείο κατηγοριοποίησε τα περιστατικά σε ήπιας, μέτριας και υψηλής σοβαρότητας. Ήπια περιστατικά χαρακτηρίστηκαν αυτά που ανέφεραν μόνο οφθαλμικά συμπτώματα (μύση, πόνο, μειωμένη ορατότητα κλπ.). Η μεγάλη πλειοψηφία των περιστατικών (82.5%) που αναζήτησαν ιατρική βοήθεια την πρώτη ημέρα ήταν ήπιας σοβαρότητας. Μέτριας σοβαρότητας περιστατικά (ποσοστό 16.7% των συνολικών) χαρακτηρίστηκαν εκείνα που παρουσίαζαν αδυναμία, μυϊκούς σπασμούς και δύσπνοια, χωρίς όμως να απαιτείται μηχανική υποστήριξη. Τέλος, 5 περιστατικά (0.78%) χαρακτηρίστηκαν ως σοβαρά, ασθενείς που τελικά κατέληξαν. Μέσα στο σύντομο επόμενο χρονικό διάστημα συνολικά 5000 άτομα αναζήτησαν ιατρική βοήθεια για συμπτώματα που οφειλόταν στην επίθεση [47].

Συνολικά καταγράφηκαν 14 θάνατοι, 13 από τους οποίους μέχρι το τέλος του 1996. Το τελευταίο νεκρό θύμα είχε υποστεί σοβαρή εγκεφαλική βλάβη και κατέληξε το 2021. Η επίθεση στο μετρό του Τόκιο θεωρείται η μεγαλύτερη καταστροφή λόγω νευροτοξικού παράγοντα που συνέβη παγκοσμίως σε καιρό ειρήνης [47].

Χημικά Περιστατικά Ανθρωπογενούς Προέλευσης

Μόσχα, Ρωσία (2002)

Στις 26 Οκτωβρίου 2002 οι ρωσικές ειδικές δυνάμεις χρησιμοποίησαν αδιευκρίνιστο αναισθητικό αέριο σε επιχείρηση διάσωσης ομήρων, στο Κέντρο Θεάτρου Ντουμπρόβκα της Μόσχας. Τρεις μέρες νωρίτερα, στις 23 Οκτωβρίου, 800 περίπου άτομα βρέθηκαν σε καθεστώς ομηρίας, όταν ομάδα 50 Τσετσένων αυτονομιστών, οι μισοί περίπου από τους οποίους ζωσμένοι με εκρηκτικά, εισέβαλαν στο χώρο και απείλησαν πως θα τον ανατινάξουν.

Η ρωσική κυβέρνηση δεν έδωσε πολλές πληροφορίες για τον τύπο και την δόση του αναισθητικού που χρησιμοποιήθηκε, κάτι που εικάζεται πως σχετίζεται με την Σύμβαση για τα Χημικά Όπλα, ή οποία είχε τεθεί σε εφαρμογή στις 29 Απριλίου 1997. Ο Ρώσος υπουργός υγείας ανακοίνωσε τέσσερις ημέρες μετά την επιδρομή πως χρησιμοποιήθηκε παράγωγο φαιτανύλης, ενός συνθετικού οπιοειδούς, το οποίο δεν μπορούσε από μόνο του να χαρακτηριστεί θανατηφόρο. Οι κλινικοί τοξικολόγοι δεν κατάφεραν να ταυτοποιήσουν επακριβώς το αέριο από τα κλινικά αποτελέσματα και έτσι αυτό παραμένει μέχρι σήμερα άγνωστο.

Αρκετές ώρες πριν την επιδρομή, στρατιωτικοί γιατροί είχαν συμβουλέψει τους παρόχους υγειονομικής περίθαλψης να αυξήσουν τις προμήθειές τους σε ναλοξόνη, φάρμακο που μεταξύ άλλων εμποδίζει την επίδραση των οπιοειδών, παρόλα αυτά το ιατρικό σύστημα δεν ήταν σε επαρκή ετοιμότητα για να περιθάλψει τα εκατοντάδες θύματα. Παρά τους ισχυρισμούς του υπουργού υγείας, 127 από τους 800 πέθαναν λόγω του αερίου και πάνω από 650 επιζώντες χρειάστηκαν νοσηλεία, κάτι που ο ίδιος απέδωσε στην περιορισμένη τροφή και νερό που λάμβαναν και στην ακινησία τους κατά το διάστημα της αιχμαλωσίας. Μέχρι και 12 ημέρες μετά την επιδρομή, 67 όμηροι και 9 διασώστες παρέμεναν νοσηλεύόμενοι, 5 από τους οποίους σε κρίσιμη κατάσταση [48].

iii. Χημικά περιστατικά σε καιρό πολέμου

Υπρ, Βέλγιο, (1915)

Στις 22 Απριλίου 1915, κατά τη διάρκεια του 1^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου, ξεκίνησε η 2^η Μάχη του Υπρ. Εναρκτήριο γεγονός ήταν η απελευθέρωση περίπου 150 μετρικών τόνων χλωρίνης (Cl) από τον γερμανικό στρατό κατά μήκος του βόριου τόξου του Υπρ στο Βέλγιο. Η επιλογή του αερίου έγινε βάση του μοριακού του βάρους (βαρύτερο του ξηρού αέρα) και της τοξικότητάς του και η απελευθέρωση έγινε όταν η φορά του ανέμου ήταν κατάλληλη ώστε να διασπαρθεί προς την πλευρά των αντίπαλων δυνάμεων. Μέσα σε λίγα λεπτά από την εκπομπή δημιουργήθηκαν πυκνά νέφη του ασφυζιογόνου αερίου, τα οποία μέσω του

ανέμου μεταφέρθηκαν σε απόσταση 6,5 χιλιομέτρων, προς τη Συμμαχική γραμμή που κρατούσαν γαλλικά, μαροκινά και αλγερινά τάγματα του γαλλικού στρατού [49].

Περιγράφοντας τις αντιδράσεις των θυμάτων, ο Γάλλος στρατηγός Jean Jules Henri Mordacq πώς οι στρατιώτες έτρεχαν αποπροσανατολισμένοι, ανοίγοντας τα πανωφόρια τους, φωνάζοντας για νερό και φτύνοντας αίμα, ενώ μερικοί κυλιόταν ακόμα και στο έδαφος κάνοντας απεγνωσμένες προσπάθειες να αναπνεύσουν. Υπολογίζεται πως 800 – 1.400 στρατιώτες σκοτώθηκαν από την επίθεση και 2.000 – 3.000 κατέστησαν ανίκανοι να συνεχίσουν να πολεμούν (50). Ο 1^{ος} Παγκόσμιος Πόλεμος αποτέλεσε ορόσημο στην χρήση χημικών όπλων με τρεις χημικές ουσίες να ευθύνονται για τον μεγαλύτερο αριθμό τραυματισμών και θανάτων λόγω χημικών: τη χλωρίνη, το φωσγένιο και το αέριο μουστάρδας.

Βιετνάμ, Κορέα (1962-1971)

Την περίοδο μεταξύ 1962 και 1971, ο αμερικάνικος στρατός χρησιμοποίησε στον πόλεμο του Βιετνάμ έναν χημικό παράγοντα με την κωδική ονομασία Πορτοκαλί Παράγοντας (Agent Orange) για την αποψίλωση των δασών του Βιετνάμ. Στόχος ήταν από τη μια η καταστροφή της κάλυψης των βιετναμέζικων δυνάμεων και από την άλλη η καταστροφή της αγροτικής παραγωγής, άρα του ανεφοδιασμού των αντιπάλων τους.

Ο Agent Orange είναι μίγμα 50:50 των ζιζανιοκτόνων τριχλωροφαινολικό οξύ 2,4,5 (2,4,5 – T) και διχλωροφαινοξυοξικό οξύ (2,4-D), που παρασκευάστηκε για λογαριασμό του αμερικανικού στρατού κυρίως από την εταιρεία Monsanto. Το όνομά του προέρχεται από τις πορτοκαλί ρίγες που έφεραν τα βαρέλια όπου φυλασσόταν και εκτός από αυτό, στον πόλεμο του Βιετνάμ χρησιμοποιήθηκαν και άλλα ζιζανιοκτόνα με αντίστοιχες κωδικές ονομασίες, όπως Agent White, Agent Purple, Agent Blue, Agent Pink και Agent Green.

Αυτό που έκανε τον Agent Orange ιδιαίτερα τοξικό ήταν η παρουσία στο 2,4,5-T, της διοξίνης 2,3,7,8-τετραχλωροδιβενζο-ρ-διοξίνη (TCDD), υποπροϊόν της παραγωγής ζιζανιοκτόνου και τοξική ακόμα και σε μικρές ποσότητες. Η TCDD θεωρείται η τοξικότερη από όλες τις διοξίνες, η παρουσία της σε φυσικά περιβάλλοντα μπορεί να διαρκέσει για πολλά χρόνια και έχει χαρακτηριστεί καρκινογόνος για τον άνθρωπο από τον Διεθνή Οργανισμό Ερευνών του Καρκίνου του Π.Ο.Υ.. Υπολογίζεται πως 50 εκατομμύρια λίτρα Agent Orange, που περιείχαν περίπου 170 kg διοξίνης έπεσαν στο Βιετνάμ κατά την διάρκεια των στρατιωτικών επιχειρήσεων.

Τα άτομα που έρχονται σε επαφή με τον Agent Orange μπορεί να αναπτύξουν δερματικές παθήσεις ή συγγενείς παραμορφώσεις και καρκίνο. Μακροπρόθεσμα, έχει επιπτώσεις στην κύηση, όπως αποβολές και μη φυσιολογική ανάπτυξη του εμβρύου. Επιπλέον έχει συνδεθεί με διαβήτη τύπου 2, καρδιακές παθήσεις, διαταραχή των ορμονών και δυσλειτουργία του μυϊκού και του ανοσοποιητικού συστήματος.

Το Βιετνάμ αναφέρει ότι περίπου 400.000 άνθρωποι έχουν υποστεί θάνατο ή μόνιμο τραυματισμό από την έκθεση στον Agent Orange. Επιπλέον, υπολογίζεται ότι 2.000.000 άνθρωποι υπέφεραν από ασθένειες που προκαλούνται από την έκθεση, ενώ περίπου 500.000 βρέφη γεννήθηκαν με γενετικές ανωμαλίες εξαιτίας του. Ο Agent Orange πιστεύεται πως μέχρι και σήμερα εξακολουθεί να επηρεάζει την υγεία των Βιετναμέζων και ενώ οι βετεράνοι των ΗΠΑ έχουν αποζημιωθεί για την έκθεσή τους σε αυτό μετά από μήνυση που κατέθεσαν το 1979, οι προσπάθειες των Βιετναμέζων να εξασφαλίσουν παρόμοια αποζημίωση σε μια αγωγή του 2004 απορρίφθηκαν από δικαστήριο των Η.Π.Α., με την Monsanto να αρνείται πως ο πορτοκαλί παράγοντας έχει μακροχρόνιες επιπτώσεις στην υγεία [51].

Συρία (2013 - 2017)

Οι σοβαρότατες επιπτώσεις της χρήσης χημικών όπλων σε πολεμικές συρράξεις οδήγησαν στην σύσταση του διακυβερνητικού Οργανισμού για την Απαγόρευση των Χημικών Όπλων (Organisation for the Prohibition of Chemical Weapons – OPCW) με έδρα την Χάγη, που αποτελείται από 193 κράτη-μέλη και είναι φορέας εφαρμογής της διεθνούς Σύμβασης για τα Χημικά Όπλα. Η Σύμβαση τέθηκε σε εφαρμογή στις 29 Απριλίου 1997 και απαγορεύει την ανάπτυξη, παραγωγή, αποθήκευση και χρήση χημικών όπλων, ενώ απαιτεί και την καταστροφή των ήδη υπαρχόντων. Ο OPCW τιμήθηκε το 2013 με το Νόμπελ Ειρήνης «για τις εκτεταμένες προσπάθειές του για την εξάλειψη των χημικών όπλων».

Παρόλα αυτά, στην περίπτωση του Συριακού Εμφυλίου φαίνεται πως οι εμπλεκόμενες δυνάμεις έχουν κάνει επανειλημμένως χρήση χημικών όπλων εναντίον αμάχων, παραβιάζοντας το διεθνές δίκαιο. Οι επιθέσεις εντοπίζονται πίσω στο 2013 και τα χημικά όπλα που χρησιμοποιούνται είναι το χλώριο, το αέριο μουστάρδας και το σαρίν.

Σύμφωνα με πρόσφατα στατιστικά στοιχεία, έχουν σημειωθεί 234 ξεχωριστές και τεκμηριωμένες επιθέσεις με χημικά από την αρχή του συριακού πολέμου, που είχαν σαν αποτέλεσμα πάνω από 3.415 νεκρούς και 13.000 τραυματίες. Στις 211 από αυτές χρησιμοποιήθηκε χλώριο ή χλώριο με ίχνη σαρίν. Ο οργανισμός Ηνωμένων Εθνών έχει επιβεβαιώσει πολλά περιστατικά χρήσης χημικών στη Συρία, με την Εξεταστική Επιτροπή για

την Συρία να τεκμηριώνει «25 περιστατικά χρήσης χημικών όπλων στην Αραβική Δημοκρατία της Συρίας, εκ των οποίων τα 20 διαπράχθηκαν από κυβερνητικές δυνάμεις και χρησιμοποιήθηκαν κυρίως εναντίον αμάχων», κατά την περίοδο από τον Μάρτιο 2013 μέχρι τον Μάρτιο 2017 [52].

II. Μέση Θανατηφόρος Συγκέντρωση

Στις αρχές του 1900, η τοξικότητα ενός χημικού παράγοντα εκφραζόταν ποσοτικά από την Ελάχιστη Θανατηφόρο Δόση (Minimal Lethal Dose). Ο όρος δεν ερμηνευόταν πάντα με τον ίδιο τρόπο από το σύνολο των τοξικολόγων της εποχής, η επικρατέστερη ερμηνεία όμως ήταν αυτή που προτάθηκε από τον J. W. Trevan το 1927, πως πρόκειται για την δόση ενός χημικού παράγοντα που μπορεί να σκοτώσει το 50% των οργανισμών ενός δεδομένου πληθυσμού, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Ο όρος Ελάχιστη Θανατηφόρος Δόση αντικαταστάθηκε από τον Μέση Θανατηφόρος Δόση (Lethal Dose 50 – LD50) και αποτέλεσε διαχρονικά ένα αμφιλεγόμενο ζήτημα μεταξύ βιολόγων και ηθικών δεοντολόγων, αφού για τον προσδιορισμό της θα έπρεπε να εξοντωθεί το 50% του πληθυσμού πειραματόζων ενός πειράματος [20].

Στην τοξικολογία, ο όρος **δόση** περιγράφει την ποσότητα μιας τοξικής ουσίας στην οποία εκτίθεται ένας οργανισμός και εκφράζεται ως ποσότητα ανά μονάδα βάρους του οργανισμού (π.χ. mg/g). Στην περίπτωση των αερομεταφερόμενων χημικών παραγόντων, οι παράμετροι που καθορίζουν την δόση στην οποία εκτίθεται ένα άτομο είναι η συγκέντρωση της χημικής ουσίας στον αέρα, το χρονικό διάστημα κατά το οποίο το άτομο εισπνέει τον μολυσμένο αέρα χωρίς κάποιο μέτρο προστασίας και ο ρυθμός αναπνοής του ατόμου, παράμετρος που συνδέεται με το επίπεδο δραστηριότητάς του.

Η τοξικότητα χημικών ουσιών σε υγρή μορφή εκφράζεται ως θανατηφόρα δόση (Lethal Dose - LD). Το ισοδύναμο μέγεθος για την περίπτωση εισπνεόμενων χημικών ουσιών (ατμός ή αερολύματα) είναι η θανατηφόρα συγκέντρωση (Lethal Concentration - LC), επειδή ωστόσο στους αερομεταφερόμενους χημικούς παράγοντες παίζει πρωτεύοντα ρόλο και ο χρόνος έκθεσης, χρησιμοποιείται συνήθως το μέγεθος Lethal Concentration Time – LCT.

Για την θανατηφόρα συγκέντρωση ορίζονται τα παρακάτω όρια κατωφλιού:

- LCT1 (Lethal Concentration Time 1) ορίζεται ως η συγκέντρωση μιας τοξικής ουσίας στον αέρα, η οποία είναι πιθανό να προκαλέσει θάνατο στο 1% του πληθυσμού λόγω εισπνοής για καθορισμένο χρόνο έκθεσης 30 λεπτών.
- LCT50 (Lethal Concentration Time 50) ορίζεται ως η συγκέντρωση μιας τοξικής ουσίας στον αέρα, η οποία είναι πιθανό να προκαλέσει θάνατο στο 50% του πληθυσμού λόγω εισπνοής για καθορισμένο χρόνο έκθεσης 30 λεπτών.

Μέση Θανατηφόρος Συγκέντρωση

- LCT100 (Lethal Concentration Time 100) ορίζεται ως η συγκέντρωση μιας τοξικής ουσίας στον αέρα, η οποία είναι πιθανό να προκαλέσει θάνατο στο σύνολο του πληθυσμού λόγω εισπνοής για καθορισμένο χρόνο έκθεσης 30 λεπτών.

Από τα τρία όρια κατωφλίου χρησιμοποιείται συνήθως το LCT50, το οποίο λέγεται μέση θανατηφόρα συγκέντρωση.

Η μέση θανατηφόρος δόση και μέση θανατηφόρος συγκέντρωση χρησιμοποιούνταν κατά κόρον στο παρελθόν για τον προσδιορισμό της τοξικότητας μιας χημικής ουσίας αλλά και για τον καθορισμό της δόσης φαρμάκων. Ο τρόπος προσδιορισμού τους ωστόσο θεωρούνταν πάντα αμφιλεγόμενος, ενώ σήμερα θεωρείται εξαιρετικά αναχρονιστικός. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές για τη δοκιμή χημικών ουσιών του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (ΟΟΣΑ), ένα παραδοσιακό πείραμα προσδιορισμού των ορίων κατωφλίου, περιλαμβάνει ομάδες πειραματόζων που εκτίθενται σε μια συγκέντρωση (ή μια σειρά συγκεντρώσεων) για μια καθορισμένη χρονική περίοδο (συνήθως 4 ώρες) και στη συνέχεια παρακολουθούνται κλινικά για έως και 14 ημέρες. Ο προσδιορισμός της μέσης θανατηφόρας δόσης που απαιτεί το 50% του πληθυσμού των πειραματόζων να θανατωθεί, γνωστή ως Test Guideline 401, επικρίθηκε ως περιττή, απάνθρωπη και στερούμενη επιστημονικής αξίας και έχει πλέον καταργηθεί, ενώ εργαστήρια και ρυθμιστικές αρχές έχουν υιοθετήσει εναλλακτικές δοκιμές προτεινόμενες από τον ΟΟΣΑ [20] [53].

ΙΙΙ. Παράγοντες Αβεβαιότητας (Τοξικολογία)

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της τοξικότητας ενός χημικού παράγοντα περιλαμβάνουν πολλά αβέβαια στοιχεία. Θα ήταν αδύνατο, για παράδειγμα, να αποδειχθεί ότι έκθεση σε μια χημική ουσία μπορεί να προκαλέσει καρκινογένεση στον άνθρωπο με πιθανότητα 1/1.000.000, διενεργώντας ένα πείραμα που να περιλαμβάνει έκθεση 1 εκατομμυρίου ανθρώπων στη χημική ουσία για το υπόλοιπο της ζωής τους. Για αυτόν τον λόγο, τα πειράματα εκτίμησης τοξικότητας διενεργούνται συνήθως σε πειραματόζωα, με αποτέλεσμα οι εκτιμήσεις να εμπεριέχουν αβεβαιότητες.

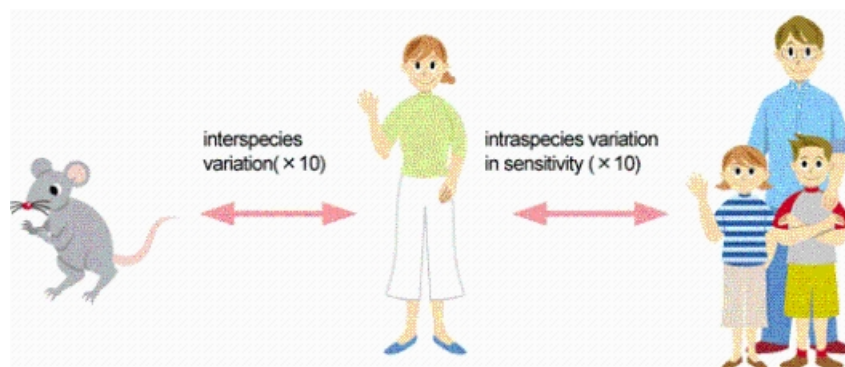
Ο **Παράγοντας Αβεβαιότητας (Uncertainty Factor – UF)** είναι ένα μέγεθος που επιτρέπει την εκτίμηση κινδύνου, αποφεύγοντας υποεκτιμήσεις λόγω αβεβαιοτήτων. Παράγοντες αβεβαιότητας μπορεί να χρησιμοποιηθούν για παραμέτρους όπως η διαφοροποίηση μεταξύ των ειδών (interspecies variation), η ενδοειδική διαφοροποίηση (intraspecies variation), η χρονική διάρκεια του πειράματος, το επίπεδο αξιοπιστίας του πειράματος κλπ.

Οι UFs παίρνουν συνήθως τιμές 1 ή 10, χωρίς να αποκλείονται και οι ενδιάμεσες τιμές, ανάλογα με τον βαθμό αβεβαιότητας που χρειάζεται να εκφραστεί. Προς το παρόν, δεν υπάρχουν παγκόσμιοι κανόνες για τους UFs, με τις χώρες και τους οργανισμούς αξιολόγησης να επιλέγουν τις τιμές που κρίνουν κατάλληλες.

Όταν σε μια εκτίμηση ρίσκου λαμβάνονται υπόψιν περισσότεροι του ενός παράγοντες αβεβαιότητας, αυτοί πολλαπλασιάζονται μεταξύ τους ώστε να προκύψει ο ολικός UF. Για παράδειγμα, στα αποτελέσματα ενός πειράματος που διενεργείται σε πειραματόζωα, για να γίνει εκτίμηση κινδύνου στον άνθρωπο εφαρμόζεται παράγοντας αβεβαιότητας για την διαφοροποίηση μεταξύ των ειδών ίσος με 10 ($UF_{\text{interspecies variation}}=10$) και για να συμπεριληφθούν στην εκτίμηση κινδύνου και οι πλέον ευαίσθητες ομάδες του πληθυσμού εφαρμόζεται παράγοντας ενδοειδικής αβεβαιότητας ίσος με 10 ($UF_{\text{intraspecies variation}}=10$) (Εικόνα ΙΙΙ-1). Έτσι, ο ολικός παράγοντας αβεβαιότητας UF θα είναι:

$$UF = UF_{\text{interspecies variation}} \cdot UF_{\text{intraspecies variation}} = 10 \cdot 10 = 100$$

Παράγοντες Αβεβαιότητας (Τοξικολογία)

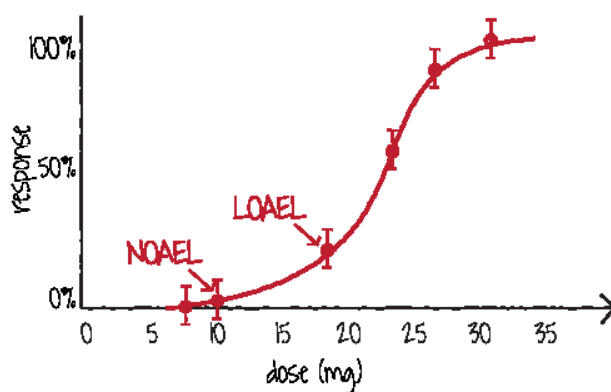


Εικόνα III-i: Ολικός UF για διαφοροποίηση μεταξύ ειδών και ενδοειδική διαφοροποίηση Πηγή: [54]

Καθώς η τιμή του ολικού UF αυξάνεται, η αξιολόγηση κινδύνου γίνεται λιγότερο αξιόπιστη. Ο Ολικός Παράγοντας Αβεβαιότητας υπολογίζεται από τον γενικό τύπο

$$UFs = UF_{interspecies\ variation} \cdot UF_{intraspecies\ variation} \cdot UF_{LOAEL} \cdot UF_{test\ period} \cdot UF_{correction\ coefficient}$$

Ως *LOAEL* (*Lowest Observed Adverse Effect Level*), ορίζεται η χαμηλότερη δόση ενός χημικού παράγοντα για την οποία παρατηρήθηκε κάποια τοξική ή ανεπιθύμητη ενέργεια. Στην τοξικολογία χρησιμοποιείται επίσης και το *NOAEL* (*No Observed Adverse Effect Level*), το οποίο εκφράζει την υψηλότερη δόση ενός χημικού παράγοντα για την οποία δεν παρατηρήθηκε καμία τοξική ή ανεπιθύμητη ενέργεια (Εικόνα III-2). Στον Πίνακα III.-1 παρουσιάζονται τιμές των παραγόντων αβεβαιότητας που συνήθως χρησιμοποιούνται στην εκτίμηση της τοξικότητας ενός χημικού παράγοντα.



Εικόνα III-ii: Επίπεδα LOAEL και NOAEL τοξικής ουσίας. Πηγή: (55)

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τιμές των παραγόντων αβεβαιότητας που συνήθως χρησιμοποιούνται στην εκτίμηση ρίσκου.

Πίνακας ΙΙΙ.ι: Συνήθεις τιμές παραγόντων αβεβαιότητας. Πηγή: [54]

Παράγοντας Αβεβαιότητας (UF)	Τιμή	
Διαφοροποίηση μεταξύ ειδών (<i>Interspecies variation</i>)	• 10	
Ενδοειδική διαφοροποίηση (<i>Intraspecies variation</i>)	• 10	
LOAEL (<i>Lowest Observed Adverse Effect Level</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • 10 αν το LOAEL μετατραπεί σε NOAEL • 1 αν χρησιμοποιηθεί NOAEL 	
Χρονική περίοδος πειράματος (<i>Test period</i>)	Τιμή	Χρονική περίοδος
	10	1 μήνας
	5	3 μήνες
	2	6 μήνες
	1	> 6 μήνες
Συντελεστής διόρθωσης (<i>Correction coefficient</i>)	<p>Ορίζεται βάση της κρίσης ενός εμπειρογνώμονα, ώστε να εκφράσει αβεβαιότητες που σχετίζονται για παράδειγμα:</p> <ul style="list-style-type: none"> • με το επίπεδο αξιοπιστίας του πειράματος, βάση του αν ικανοποιούνται ή όχι οι απαιτήσεις GLP⁴ • με τις διαφορές ανάμεσα στους μηχανισμούς έκθεσης στον χημικό παράγοντα (π.χ. μετατροπή του κινδύνου λόγω εισπνοής του χημικού παράγοντα σε κίνδυνο λόγω κατάποσης κλπ.) <p>Όταν ο συντελεστής διόρθωσης δεν υπολογίζεται στον ολικό UF, η τιμή του λαμβάνεται ίση με 1.</p>	

⁴ GLP (Good Laboratory Practice): Το σύστημα GLP στοχεύει στη διασφάλιση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων των δοκιμών μέσω του ελέγχου της επιχειρησιακής διαχείρισης, των εγκαταστάσεων δοκιμών, των σχεδίων δοκιμών, του συστήματος εσωτερικού ελέγχου, του συστήματος εγγύησης αξιοπιστίας, των αποτελεσμάτων των δοκιμών και ούτω καθεξής. Κάθε τρία χρόνια απαιτείται επιβεβαίωση και ανανέωση (54).

Αναφορές

1. **Lance A. Wallace.** *Total Exposure Assessment Methodology (team) Study Summary and Analysis.* Washington, DC : U.S. Environmental Protection Agency, 1987. EPA/600/6-87/002A (NTIS PB88100060).
2. **Darrell W. Peper, David Carrington.** *Modeling Indoor Air Pollution.* London : Imperial College Press, 2009. ISBN-13 987-1-84816-324-9.
3. **U.S. Environmental Protection Agency.** *Indoor air research: Characterizing air emissions from indoor sources.* s.l. : U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development ; Air and Energy Engineering Research Laboratory, 1994. EPA/600/F-95/005.
4. **Ioannis K. Panagopoulos, Athanasios N. Karayannis, Pavlos Kassomenos and Kostantinos Aravossis.** A CFD Simulation Study of VOC and Formaldehyde Indoor Air Pollution Dispersion in an Apartment as Part of an Indoor Pollution Management Plan. *Aerosol Air Quality Research.* 2011, Vol. 11, 6, pp. 758-762.
5. **Li Yang, Miao Ye, Bao-Jie He.** CFD simulation research on residential indoor air quality. *Science of the Total Environment.* December 2013, pp. 1137-1144.
6. **Bin Liu, Xiong Liu, Cheng Lu, Ajit Godbole, Guillaume Michal, Anh Kiet Tieu.** Computational fluid dynamics simulation of carbon dioxide dispersion in a complex environment. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries.* 2016, Vol. 40, pp. 419 - 432.
7. **Jin-Yeu Tsou.** Strategy on applying computational fluid dynamic for building performance evaluation. *Automation in Construction.* 2001, Τόμ. 10, 3, σσ. 327-335.
8. **Guilherme Carrilho da Graca, Q Chen, Leon R. Glicksman and Leslie K .Norford.** Simulation of wind-driven ventilative cooling systems for an apartment building in Beijing and Shanghai. *Energy and Buildings.* 2002, Vol. 34, 1, pp. 1-11.
9. **Guan Heng Yeoh, R.K.K. Yuen, S.M. Lo, and D.H. Chen.** On numerical comparison of enclosure fire in a multi-compartment building. *Fire Safety Journal.* 2003, Vol. 38, 1, pp. 85-94.

10. **Shumei Murakami, Shinsuke Kato, Kazuhide Ito and Qinxiang Zhu.** Modeling and CFD prediction for diffusion and adsorption within room with various adsorption isotherm. *Indoor air*. 2003, Vol. 13, 6, pp. 20-27.

11. **Martin Bartak, Ian Beausoleil-Morrison, Joe A. Clarke, Jordan Denev, Frantisek Drkal, Molis Lain, Iain A. Macdonald, Arsen Melikov, Zbigniew Popiolek, P. Stankov.** Integrating CFD and building simulation. *Building and Environment*. 2002, Vol. 37, 8-9, pp. 865-871.

12. **Pavlos Kassomenos, Athanasios N. Karayannis, Ioannis K. Panagopoulos, Spyros Karakitsios, Michael C. Petrakis.** Modelling the dispersion of a toxic substance at a workplace. *Environmental Modelling & Software*. 2008, Vol. 23, 1, pp. 82 - 89.

13. **Jianfeng Li, Ya-Fei Zhou.** Occupational hazards control of hazardous substances in clean room of semiconductor manufacturing plant using CFD analysis. *Toxicology and Industrial Health*. 2015, Τόμ. 31, 2, σσ. 123-139.

14. **Longxiang Dong; Hongchao Zuo; Liang Hu; Bin Yang; Licheng Li; Liyang Wu.** Simulation of heavy gas dispersion in a large indoor space using CFD model. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2017, Τόμ. 46, σσ. 1-12.

15. **Council of the European Union.** Council Directive 98/24/EC on the protection of the health and safety of workers from the risks related to chemical agents at work. *Official Journal L131*. April 7, 1998, Vol. 41, pp. 11-23.

16. **Health and Safety Authority (HSA).** Your Steps to Chemical Safety. *Health and Safety Authority (HSA)*. [Online] 2011. [Cited: April 10, 2022.] https://www.hsa.ie/eng/publications_and_forms/publications/chemical_and_hazardous_substances/your_steps_to_chemical_safety.html. 978-1-84496-147-4.

17. **European Commission, Directorate-General for Employment, Social Affairs and Inclusion.** *Practical Guidelines of a non-binding nature on the protection of the health and safety of the workers from the risks related to chemical agents at work*. Luxembourg : Publications Office, 2007. 92-894-9651-7.

18. **World Health Organization (WHO).** Chemical Incidents. [Online] 2022. [Cited: April 10, 2022.] https://www.who.int/health-topics/chemical-incidents#tab=tab_1.

19. **Robert G. Hendrickson** . Terrorist Chemical Releases: Assessment of Chemical Risk and Implications for Emergency Preparedness. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. 2005, Vol. 11, 3, pp. 487-499.

20. **Sadasivan Kalathil Pillai, Katsumi Kobayashi, Mathews Michael, Thomson Mathai, Bhavana Sivakumar, Parvathy Sadasivan**. John William Trevan's concept of Median Lethal Dose (LD50/LC50) – more misused than used. *Journal of Pre-Clinical and Clinical Research*. 2021, Vol. 15, 3, pp. 137-141.

21. **National Research Council**. *Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals: Volume 2*. Washington, DC : The National Academies Press, 2002.

22. —. *Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborn Chemicals: Volume 6*. Washington, DC : The National Academies Press, 2008.

23. **NIOSH**. Immediately Dangerous To Life or Health (IDLH) Values. *The National Institute for Occupational Safety and Health*. [Online] Centers for Disease Control and Prevention, May 10, 2019. [Cited: April 2, 2022.] <https://www.cdc.gov/niosh/idlh/default.html>.

24. -. Anhydrous Ammonia NH₃ (Revised 1970). *American Industrial Hygiene Association Journal*. 02 01, 1971, Vol. 32, 2, pp. 139-142.

25. **NIOSH**. Ammonia Solution, Ammonia, Anhydrous: Lung Damaging Agent. *Emergency Response Safety and Health Database - Lung Damaging Agents*. [Online] May 12, 2011. [Cited: April 1, 2022.] https://www.cdc.gov/niosh/ershdb/EmergencyResponseCard_29750013.html.

26. **CHEMM**. Choking/Lung/Pulmonary Agents (Irritant/Corrosive - Inhalation Toxidrome). *Chemical Hazards Emergency Medical Management: CHEMM*. [Online] November 17, 2022. [Cited: Απρίλιος 01, 2022.] <https://chemm.hhs.gov/lungagents.htm>.

27. **NIOSH**. Ammonia - Immediately Dangerous to Life or Health Concentrations. *The National Institute for Occupational safety and Health*. [Online] Centers for Disease Control and Prevention, December 4, 2014. [Cited: April 2, 2022.] <https://www.cdc.gov/niosh/idlh/7664417.html>.

28. —. Phosgene (CG): Lung Damaging Agent. *The National Institute for Occupational Safety and Health*. [Online] May 12, 2011. [Cited: April 1, 2022.] https://www.cdc.gov/niosh/ershdb/EmergencyResponseCard_29750023.html.

29. —. Phosgene. *The National Institute for Occupational Safety and Health*. [Online] Centers for Disease Control and Prevention, November 19, 2010. [Cited: April 1, 2022.] <https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0504.html>.

30. **Alfred M. Sciuto, Urmila P. Kodavanti**. Chapter 34 - The respiratory toxicity of chemical warfare agents. *Handbook of Toxicology of Chemical Warfare Agents*. 3. s.l. : Ramesh C. Gupta, 2020, 34, pp. 515-544.

31. **William D. Currie, Gary E. Hatch, Michael F. Frosolono**. Pulmonary alterations in rats due to acute phosgene inhalation. *Fundamental and Applied Toxicology*. 1987, Vol. 8, 1, pp. 107-114.

32. **Cheryl B. Bast, Dana F. Glass-Mattie**. Chapter 25 - Phosgene. *Handbook of Toxicology of Chemical Warfare Agents*. 2. s.l. : Ramesh C. Gupta, 2015, 25, pp. 327-335.

33. **NIOSH**. Phosgene - Immediately Dangerous to Life or Health Concentrations (IDLH). *The National Institute for Occupational Safety and Health*. [Online] Centers for Disease Control and Prevention, December 4, 2014. [Cited: April 2, 2022.] <https://www.cdc.gov/niosh/idlh/75445.html>.

34. **Werner F. Diller, R. Zante**. A Literature Review: Therapy for Phosgene Poisoning. *Toxicology and Industrial Health*. 1985, Vol. 1, 12, pp. 117-128.

35. **Ιωάννης Σούλης**. *Υπολογιστικές Τεχνικές Υδραυλικής Μηχανικής*. Αθήνα : Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις, 2015. 978-960-603-044-4.

36. **Li Yang, Miao Ye, Bao-Jie he**. CFD simulation research on residential indoor air quality. *Science of The Total Environment*. 12 20, 2014, Vol. 472, pp. 1137 - 1144.

37. **Woowon Jeong, Jaehoon Seong**. Comparison of effects on technical variances of computational fluid dynamics (CFD) software based on finite element and finite volume methods. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2014, Vol. 78, pp. 19-26.

38. **Rodriguez, Sal**. *Applied Computational Fluid Dynamics and Turbulence Modeling*. s.l. : Springer Cham, 2019. 978-3-030-28691-0.

39. **Bert Blocken**. LES over RANS in building simulation for outdoor and indoor applications: A foregone conclusion? *Building Simulation*. October 2018, Vol. 11, 5, pp. 821-870.

40. **ANSYS Fluent.** ANSYS Fluent 14.0 user's guide. Canonsburge, PA : ANSYS Inc., 2011.
41. **Jelena Srebric, Vladimir Vukovic, Guoqing He, Xudong Yang.** CFD boundary conditions for contaminant dispersion, heat transfer and airflow simulations around human occupants in indoor environments. *Building and Environment*. 2008, Vol. 43, 3, pp. 294 - 303.
42. **V. Ramana Dhara, Rosaline Dhara.** The Union Carbide Disaster in Bhopal: A Review of Health Effects. *Archives of Environmental Health: An International Journal*. 2002, Vol. 57, 5, pp. 391-404.
43. **National Research Council.** *Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals*. Washington, DC : The National Academies Press, 2002. Vol. 2. 978-0-309-18270-6.
44. —. *Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborn Chemicals*. Washington, DC : The National Academies Press, 2008. Vol. 6. 978-0-309-17774-0.
45. **Jessie S. Wing, Lee M. Sanderson, Jean D. Brender, Dennis M. Perrotta, Richard A. Beauchamp.** Acute Health Effects in a Community after a Release of Hydrofluoric Acid. *Archives of Environmental Health: An International Journal*. 1991, Τόμ. 46, 3, σσ. 155-160.
46. **Hiroshi Okudera, Hiroshi Morita, Tomomi Iwashita, Tatsuhiko Shibata, Testurato Otagiri, Shigeaki Kobayashi, Nobuo Yanagisawa.** Unexpected nerve gas exposure in the city of Matsumoto: Report of rescue activity in the first sarin gas terrorism. *The American Journal of Emergency Medicine*. 1997, Vol. 15, 5, pp. 527-528.
47. **Tetsu Okumura, Nobukatsu Takasu, Shinichi Ishimatsu, Shou Miyanoki, Akihiro Mitsuhashi, Keisuke Kumada, Kazutoyo Tanaka, Shigeaki Hinohara.** Report on 640 Victims of the Tokyo Subway Sarin Attack. *Annals of Emergency Medicine*. 1996, Vol. 28, 2, pp. 129-135.
48. **Paul M. Wax, Charles E. Becker, Steven C. Curry.** Unexpected "gas" casualties in Moscow: a medical toxicology perspective. *Annals of Emergency Medicine*. 2003, Vol. 41, 5, pp. 700-705.
49. **Ulrich Trumpener.** The Road to Ypres: The Beginnings of Gas Warfare in World War I. *The Journal of Modern History*. 1975, Vol. 47, 3, pp. 460-480.
50. **Elizabeth Greenhalgh.** Chapter 7 - 1918: German offensives. [book auth.] Elizabeth Greenhalgh. *The French Army and the First World War*. Cambridge : Cambridge University Press, 2014, pp. 271-311.

51. **Britanica, The Editors of Encyclopedia.** Agent Orange. *Encyclopedia Britannica*. [Online] November 21, 2022. [Cited: March 20, 2023.] <https://www.britannica.com/science/Agent-Orange>.

52. **Julia Brooks, Timothy B. Erickson, Stephanie Kayden, Raul Ruiz, Stephen Wilkinson, Frederick M. Burkle Jr.** Responding to chemical weapons violations in Syria: legal, health, and humanitarian recommendations. *Conflict and Health*. February 19, 2018, Vol. 12, 1.

53. **David Cutler.** Death of LD50. *Trends in Pharmacological Sciences*. 2001. Vol. 22, 2, p. 62. 0165-6147.

54. **National Institute of Technology and Evaluation (NITE).** Risk Assessment on chemicals-For Better Understanding. *NITE - Chemical management - Publications*. [Online] [Cited: November 23, 2022.] <https://www.nite.go.jp/en/chem/shiryo/yoriyoku.html>.

55. **Toxicology Mentoring and Skills Development Training.** NOAEL and LOAEL. *Tox Tutor - Learn Essential principles of toxicology*. [Online] [Cited: November 23, 2022.] <https://www.toxmsdt.com/26-noael-and-loael.html>.

56. **Γεώργιος Συλαίος, Κωνσταντίνος Μουτσόπουλος.** *Περιβαλλοντική υπολογιστική - Προσομοίωση υδατικών συστημάτων με έμφαση στην προστασία περιβάλλοντος*. Αθήνα : Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις, 2015. 978-960-603-433-6.

57. **Spyros Sclavounos, Fotis Rigas.** Validation of turbulence models in heavy gas dispersion over obstacles. *Journal of Hazardous Materials*. April 30, 2004, pp. 9-20.

58. **Άγγελος Θ. Παπαιωάννου.** *Μηχανική των Ρευστών*. Αθήνα : Κοράλι, 2002. Τόμ. Ι. 978-960-8028-12-8.

59. **Γεώργιος Νουτσόπουλος, Γεώργιος Χριστοδούλου.** *Μαθήματα Μηχανικής των Ρευστών*. Αθήνα : Φούντας, 2010. 978-960-330-728-0.

60. **Ιάκωβος Γ. Γκανούλης.** *Εισαγωγή στη Μηχανική των Ρευστών*. Θεσσαλονίκη : Επίκεντρο, 1981. 978-960-88731-8-6.

61. **Παύλος Κασσωμένος.** *Φυσική Περιβάλλοντος*. Αθήνα : Κλειδάριθμος, 2017. 9789604617906.