



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ & ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

« Απλοποιημένο μοντέλο διαφυγής από πλοία σε περίπτωση πυρκαγιάς »

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΑΝΔΡΙΑΝΑΚΗΣ

Επιβλέπων

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΒΕΝΤΙΚΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2015

*ποταμοῖσι τοῖσιν αὐτοῖσιν ἐμβαίνουσιν
ἕτερα καὶ ἕτερα ὕδατα ἐπιρρεῖ(…)*

(αυτοί που μπαίνουν στα ίδια ποτάμια
δέχονται συνέχεια και άλλα νερά)

Ηράκλειτος, *Τὸ Γίγνεσθαι* .41(12)

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με το πέρας της διαδρομής μου στην Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλο το διδακτικό και επιστημονικό προσωπικό της σχολής καθώς, σε καιρούς δύσκολους, διατηρούν υψηλό το επίπεδο των σπουδών και του παραγόμενου ερευνητικού έργου. Ευχαριστώ από καρδιάς τον επιβλέποντα της παρούσας εργασίας, Επίκουρο Καθηγητή κ. Νικόλαο Βεντίκο. Χωρίς την υπομονή και την πολύτιμη καθοδήγησή του, η εργασία αυτή δεν θα είχε ολοκληρωθεί. Θέλω επίσης να ευχαριστήσω τους γονείς μου Βασίλη και Δήμητρα και την αδελφή μου Αγγελική για την διαρκή υποστήριξή τους. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον εξάδελφό μου Τρύφωνα Φαρμακάκη, Διπλ. Ηλεκτρολόγο Μηχανικό ΕΜΠ, για την πολύτιμη βοήθειά του στην υλοποίηση του προγραμματιστικού κώδικα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα ασχοληθούμε με την ανάπτυξη ενός απλοποιημένου μοντέλου διαφυγής για πλοία σε περίπτωση πυρκαγιάς. Τα μοντέλα διαφυγής είναι μια σχετικά καινούρια εξέλιξη στον τομέα της ασφάλειας των επιβατηγών πλοίων και χρησιμοποιούνται για να εξακριβώσουν αν τα μέσα διαφυγής που έχουν σχεδιαστεί σύμφωνα με τους υποδείξεις της σύμβασης SOLAS επαρκούν για την έγκαιρη και ασφαλή διαφυγή από το εσωτερικό ενός πλοίου σε κίνδυνο.

Για την ανάπτυξη του μοντέλου έχουμε βασιστεί σε ένα υπάρχον μοντέλο διαφυγής για κτίρια που έχει αναπτυχθεί στο πανεπιστήμιο Carleton του Καναδά, καθώς και στην οδηγία MSC.1/Circ.1238 που προδιαγράφει δυο προτεινόμενες μεθοδολογίες για τη διενέργεια ανάλυσης της διαδικασίας διαφυγής από υπάρχοντα και υπο κατασκευή πλοία. Επίσης έχουμε χρησιμοποιήσει στοιχεία από σχετικά ερευνητικά προγράμματα όπως το SAFEGUARD και έχουμε εισάγει στο μοντέλο διάφορες λειτουργίες όπως τον υπολογισμό των επιδράσεων του περιβάλλοντος στην βιωσιμότητα των επιβατών.

Περιεχόμενα

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ & ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	10
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
1.1 Πρόλογος.....	13
1.2 Παγκόσμιος επιβατηγός στόλος & ναυτικά ατυχήματα.....	15
1.3 Σκοπός εργασίας - Προεπισκόπηση.....	17
1.4 Δομή εργασίας.....	17
2. ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΝΟΝΙΣΜΩΝ.....	19
2.1 Εισαγωγή.....	19
2.2 Ιστορική εξέλιξη κανονισμών.....	20
2.3 Η Διεθνής Σύμβαση για την Ασφάλεια της Ανθρώπινης Ζωής στη Θάλασσα (SOLAS 1974).....	28
2.4 Ο κώδικας Fire Safety Systems (FSS Code).....	33
2.5 Η οδηγία MSC.1/Circ.1238.....	35
2.5.1 Απλή μέθοδος.....	37
2.5.2 Σύνθετη μέθοδος.....	41
3. ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΙΑΦΥΓΗΣ.....	45
3.1 Ορισμός μοντέλων διαφυγής.....	45
3.2 Κατηγοριοποίηση μοντέλων διαφυγής κατά Gwynne et al.....	46
3.3 Κατηγοριοποίηση μοντέλων διαφυγής κατά Xiaoping, Tingkuan & Mengting.....	51
3.4 Υπάρχοντα μοντέλα.....	53
3.4.1 Μοντέλο EVI.....	53
3.4.2 Μοντέλο Maritime Exodus.....	57
3.4.3 Μοντέλο AENEAS.....	61
3.4.4 Μοντέλο BYPASS.....	64
3.4.5 Μοντέλο IMEX.....	66
3.4.6 Μοντέλο EVDEMON.....	69
3.4.7 Μοντέλο VELOS.....	72
4. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΕ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΙΝΔΥΝΟΥ.....	75
4.1 Γενική θεώρηση.....	75
4.2 Λήψη αποφάσεων σε καταστάσεις κινδύνου.....	77
4.3 Κατηγορίες συμπεριφοράς και παράγοντες επιλογής.....	78

4.4	Τυπικές συμπεριφορές κατά την διαδικασία της διαφυγής από έναν χώρο.....	81
4.5	Πανικός	82
4.6	Ταχύτητες κίνησης κατά τη διαφυγή.....	85
4.6.1	Κλίση και κίνηση του πλοίου	85
4.6.2	Πυκνότητα επιβατών	89
4.6.3	Ορατότητα	91
5.	ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΑΦΥΓΗΣ ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ.....	95
5.1	Εισαγωγικά στοιχεία.....	95
5.2	Μοντέλο πυρκαγιάς CFAST.....	98
5.3	Μοντέλο του Purser για την τοξικότητα της πυρκαγιάς.....	103
5.4	Μοντέλο διαφυγής	111
5.4.1	Μοντελοποίηση του χώρου.....	111
5.4.2	Κατηγορίες επιβατών και δημογραφικό δείγμα	119
5.4.3	Κατανομή επιβατών στον χώρο.....	120
5.4.4	Χρόνος απόκρισης (ή εκκίνησης).....	121
5.4.5	Ταχύτητες κίνησης	125
5.4.6	Κλίση και κίνηση του πλοίου	128
5.4.7	Επιλογή εξόδου.....	131
5.4.8	Υπολογισμός απόστασης	133
5.4.9	Πέρασμα πόρτας και σχηματισμός ουράς	134
5.4.10	Μοντελοποίηση πανικού.....	137
5.4.11	Πορεία προσομοίωσης	138
5.4.12	Εισαγωγή δεδομένων	141
5.4.13	Εξαγωγή αποτελεσμάτων	143
5.5	Επιβεβαίωση (validation) του μοντέλου διαφυγής σύμφωνα με την οδηγία MSC.1/Circ.1238 ...	145
5.5.1	Δοκιμές συστατικών μερών (component testing).....	145
5.5.2	Ποιοτική επιβεβαίωση (Qualitative verification)	151
5.6	Σενάρια επίδειξης	161
5.6.1	Περιγραφή σεναρίων.....	161
5.6.2	Αποτελέσματα - σχολιασμός	167
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	181
	Βιβλιογραφία	185

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	191
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	195
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.....	205

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ & ΣΧΗΜΑΤΩΝ

- 1.1.1 Εξέλιξη παγκόσμιου επιβατηγού στόλου κατά τα έτη 1998-2006
- 1.1.2 Συχνότητα ατυχημάτων στον παγκόσμιο επιβατηγό στόλο
- 2.2.1 Το φλεγόμενο Morro Castle
- 2.2.2 Το Herald of Free Enterprise
- 2.2.3 Οι προσπάθειες κατάσβεσης της πυρκαγιάς στο Scandinavian Star
- 2.2.4 Το Estonia στο Tallinn, λίγους μήνες πριν το ατύχημα
- 2.3.1 Main vertical zones
- 2.3.2 Σύμβολα σύμφωνα με τον κανονισμό A.760(18)
- 2.5.1.1 Κατάτμηση χρόνου ολοκλήρωσης διαδικασίας διαφυγής σύμφωνα με την απλή μέθοδο της οδηγίας MSC.1/Circ.1238
- 2.5.2.1 Κατάτμηση χρόνου ολοκλήρωσης διαδικασίας διαφυγής σύμφωνα με την σύνθετη μέθοδο της οδηγίας MSC.1/Circ.1238
- 3.2.1 Μοντελοποίηση συμπεριφοράς ανά τύπο μοντέλου
- 3.4.1.1 Αναπαράσταση χώρου στο μοντέλο EVI
- 3.4.1.2 Προσδιορισμός πυκνότητας επιβατών στο μοντέλο EVI
- 3.4.1.3 Μορφή εξαγωγίμων αποτελεσμάτων μοντέλου EVI
- 3.4.2.1 3-D αναπαράσταση επιβατών στο μοντέλο maritimeExodus
- 3.4.2.2 Τα υπο-μοντέλα του maritimeExodus
- 3.4.3.1 2-D αναπαράσταση επιβατών στο μοντέλο AENEAS
- 3.4.3.2 Grid mapping στο μοντέλο AENEAS
- 3.4.3.3 Διαδικασία εισαγωγής υπο μελέτη χώρου στο μοντέλο AENEAS
- 3.4.3.4 Τυπικές καμπύλες διαμήκους και εγκάρσιας κλίσης
- 3.4.4.1 Απεικόνιση του χώρου και των ατόμων στο μοντέλο BYPASS
- 3.4.4.2 Διάγραμμα λειτουργίας του μοντέλου IMEX
- 3.4.4.3 Αλληλεπίδραση του ατόμου με άλλα άτομα
- 3.4.4.4 Αλληλεπίδραση του ατόμου με διαχωριστικά και εμπόδια
- 3.4.4.5 Διάγραμμα μοντέλου ανθρώπινης συμπεριφοράς
- 3.4.6.1 Πιθανές κατευθύνσεις του επιβάτη
- 3.4.6.2 2 ½ -D αναπαράσταση στο μοντέλο EVDEMON
- 3.4.7.1 Η αρχιτεκτονική του συστήματος του VELOS
- 3.4.7.2 3-D αναπαράσταση στο μοντέλο VELOS
- 3.4.7.3 Γράφος χώρου στο μοντέλο VELOS
- 4.6.1.1 Αποτελέσματα έρευνας ινστιτούτου TNO Human Factors
- 4.6.1.2 Αποτελέσματα ερευνών για την κίνηση υπό κλίση
- 4.6.1.3 Αποτελέσματα ερευνών του NMRI για την κίνηση υπο δυναμική κλίση
- 4.6.2.1 Αποτελέσματα ερευνών για την κίνηση σε χώρους με μεγάλη πυκνότητα επιβατών

- 4.6.3.1 Η πειραματική διάταξη SHEBA
- 4.6.3.2 Πρόσοψη και κάτοψη της πειραματικής διάταξης SHEBA
- 4.6.3.3 Δημογραφική κατανομή των ατόμων στην έρευνα της BMT Fleet Technology
- 4.6.3.4 Μέγιστες ταχύτητες προς την κατεύθυνση της σκάλας
- 4.6.3.5 Μέγιστες ταχύτητες προς την κατεύθυνση του χώρου συγκέντρωσης
- 4.6.3.6 Μέγιστες ταχύτητες ανόδου της σκάλας
- 4.6.3.7 Μέγιστες ταχύτητες καθόδου της σκάλας
- 5.1.1 Δομή υπο-μοντέλου απόκρισης του μοντέλου του Carleton
- 5.2.1 Η θεωρία των διζωνικών μοντέλων
- 5.2.2 Κατασκευή καμπύλης ρυθμού έκλυσης θερμότητας (HRR curve) στο CFAST
- 5.2.3-5 3-D αναπαράσταση της εξέλιξης της πυρκαγιάς και της διασποράς καπνού στο CFAST
- 5.3.1 Καμπύλη υποξίας
- 5.3.2 Αύξηση εισπνεόμενης ποσότητας αέρα λόγω συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα
- 5.3.3 Διαθέσιμος χρόνος μέχρι την πρόκληση σοβαρών βλαβών στο δέρμα εξαιτίας της θερμότητας δ'ακτινοβολίας
- 5.3.4 Χρόνος ανοχής στην θερμότητα εξ επαγωγής
- 5.4.1.1 Απλός γράφος
- 5.4.1.2 Επίλυση του προβλήματος των «7 Γεφυρών του Königsberg»
- 5.4.1.3 Απλός, κατευθυνόμενος και σταθμισμένος γράφος
- 5.4.1.4 Παράδειγμα χώρου
- 5.4.1.5 Ο γράφος που δημιουργείται από το μοντέλο
- 5.4.2.1 Δημογραφικό δείγμα σύμφωνα με την οδηγία MSC.1/Circ.1238
- 5.4.4.1 Κατανομή χρόνου απόκρισης για σενάριο ημέρας σε πλοίο RO-PAX
- 5.4.4.2 Κατανομή χρόνου απόκρισης για σενάριο ημέρας σε κρουαζιερόπλοιο
- 5.4.4.3 Κατανομή χρόνου απόκρισης για σενάριο νύχτας σε κρουαζιερόπλοιο
- 5.4.5.1 Κατανομές ταχυτήτων στο επίπεδο σύμφωνα με την οδηγία MSC.1/Circ.1238
- 5.4.5.2 Κατανομές ταχυτήτων στο επικλινές σύμφωνα με την οδηγία MSC.1/Circ.1238
- 5.4.7.1 Διάγραμμα ροής αλγόριθμου επιλογής εξόδου
- 5.4.9.1 Διάγραμμα ροής αλγόριθμου κίνησης επιβάτη
- 5.4.9.2 Διάγραμμα ροής αλγόριθμου περάσματος πόρτας
- 5.4.11.1 Γενικό διάγραμμα ροής του μοντέλου
- 5.4.12.1 Δομή αρχείου εισαγωγής χώρου
- 5.4.12.2 Παράθυρο εισαγωγής στοιχείων σεναρίου
- 5.4.13.1 Δομή αρχείου δεδομένων κίνησης των επιβατών
- 5.5.1.1 Χρόνος ολοκλήρωσης 1^{ου} τεστ
- 5.5.1.2 Χρόνος ολοκλήρωσης 2^{ου} τεστ
- 5.5.1.3 Χρόνος ολοκλήρωσης 3^{ου} τεστ
- 5.5.1.5 Ροή εξόδου στο 4^ο τεστ

- 5.5.1.6 Σύγκριση κατασκευαζόμενης και υπολογιζόμενης κατανομής για την περίπτωση ημέρας σε κρουαζιερόπλοιο
- 5.5.1.7 Σύγκριση κατασκευαζόμενης και υπολογιζόμενης κατανομής για την περίπτωση νύχτας σε κρουαζιερόπλοιο
- 5.5.1.8 Σύγκριση κατασκευαζόμενης και υπολογιζόμενης κατανομής για την περίπτωση ημέρας σε πλοίο RO-PAX
- 5.5.1.9 Σύγκριση κατασκευαζόμενης και υπολογιζόμενης κατανομής για την περίπτωση νύχτας σε πλοίο RO-PAX
- 5.5.1.10 Ο χώρος στο 6^ο τεστ
- 5.5.1.11 Κατανομή ταχυτήτων στο 7^ο τεστ
- 5.5.2.1 Ο χώρος στο 8^ο τεστ
- 5.5.2.2 Ο Χώρος στο 9^ο τεστ
- 5.5.2.3 Διάγραμμα διαφυγόντων ατόμων κατά το 1^ο τρέξιμο
- 5.5.2.4 Διάγραμμα διαφυγόντων ατόμων κατά το 2^ο τρέξιμο
- 5.5.2.5 Ο χώρος στο 10^ο τεστ
- 5.5.2.6 Ο χώρος του 10^{ου} τεστ όπως εισάγεται στο μοντέλο
- 5.5.2.7 Ο χώρος του 11^{ου} τεστ
- 5.6.1.1 Ο χώρος των σεναρίων
- 5.6.1.2 Ο χώρος των σεναρίων όπως μοντελοποιείται από το πρόγραμμα CFAST
- 5.6.2.1 Αποτελέσματα σεναρίων
 - 5.6.2.23

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Πρόλογος

Κατά τη διάρκεια της εικοσαετίας 1980-2000, δυο μεγάλα ναυτικά ατυχήματα συγκλόνισαν, όχι μόνο την ναυτιλιακή κοινότητα αλλά και την παγκόσμια κοινή γνώμη. Ήταν η ανατροπή του πλοίου *Herald of Free Enterprise* τον Μάρτιο του 1987 ανοιχτά του βελγικού λιμανιού Zeebrugge και η βύθιση, τον Σεπτέμβριο του 1994, του πλοίου *Estonia* στην θάλασσα της Βαλτικής. Τα ατυχήματα αυτά, πέρα από τον μεγάλο αριθμό θυμάτων που προκάλεσαν (188 και 852 νεκροί και αγνοούμενοι αντίστοιχα), έφεραν σημαντικές αλλαγές στον τρόπο με τον οποίο προσεγγιζόταν μέχρι τότε το θέμα της ασφάλειας των επιβατηγών, κυρίως, πλοίων. Πιο συγκεκριμένα, οι διάφοροι εμπλεκόμενοι φορείς οι οποίοι εξέδιδαν κανονισμούς (IMO, Σημαίες, Port Authorities, Νηογνώμονες) συνειδητοποίησαν ότι η διαδικασία μέσω της οποίας προτεινόταν και εφαρμόζονταν οι συγκεκριμένοι κανονισμοί είχε καταστεί ανεπαρκής. Η ανεπάρκεια αυτή οφειλόταν κατά κύριο λόγο στο γεγονός ότι η λογική ατύχημα-έρευνα-επικαιροποίηση κανονισμών αφενός ήταν χρονοβόρα, αφετέρου δεν μπορούσε πλέον να ακολουθήσει τον ρυθμό με τον οποίο εξελισσόταν η τεχνολογία ναυπήγησης των πλοίων.

Το πρόβλημα γινόταν μεγαλύτερο και πιο σύνθετο όσον αφορά τον πολύ σημαντικό τομέα της εγκατάλειψης (evacuation) του πλοίου, στην περίπτωση ατυχήματος που έθετε σε κίνδυνο το πλοίο και τους επιβάτες. Η τάση στην παγκόσμια επιβατηγό ναυτιλία (και ειδικά στην αγορά της κρουαζιέρας) ήταν η ναυπήγηση όλο και μεγαλύτερων πλοίων, με υπηρεσίες που πλησιάζουν και ξεπερνούν αυτές των μεγάλων ξενοδοχειακών μονάδων. Το γεγονός αυτό δημιουργούσε τεράστιες προκλήσεις όσον αφορά τον σχεδιασμό και την επάρκεια των μέσων διαφυγής (means of escape) του πλοίου, καθώς οι υπάρχοντες κανονισμοί επιβάλλουν συστήματα και διαδικασίες με βάση αρκετά μικρότερα πλοία (και άρα αριθμό επιβατών) και με συμβατική σχεδίαση των χώρων ενδιαίτησης των επιβατών.

Για να αντιμετωπίσει το πρόβλημα, Ο IMO ως ο κατεξοχήν αρμόδιος οργανισμός επέβαλλε μέσω επικαιροποίησης της σύμβασης SOLAS την διενέργεια λεπτομερούς ανάλυσης της διαδικασίας εγκατάλειψης πλοίου στο στάδιο της προμελέτης των επιβατηγών πλοίων (Ro-Ro Passenger Ships). Σύμφωνα με αυτήν, η ανάλυση «θα χρησιμεύσει στην αναγνώριση και αντιμετώπιση, στο μέτρο του δυνατού, της συμφόρησης που ενδεχομένως να παρουσιαστεί κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εγκατάλειψης, λόγω της κίνησης επιβατών και πληρώματος μέσω των οδών διαφυγής, λαμβάνοντας υπόψη την πιθανότητα το πλήρωμα να χρειαστεί να κινηθεί με κατεύθυνση αντίθετη προς αυτή των επιβατών. Επίσης, η ανάλυση θα πρέπει να αποδεικνύει ότι οι διαρρυθμίσεις διαφυγής και εγκατάλειψης είναι επαρκώς ευέλικτες, ώστε να μπορούν να αντιμετωπίσουν την πιθανότητα κάποιες οδοί διαφυγής, σταθμοί

συγκέντρωσης και αποβίβασης ή σωσίβιες λέμβοι να είναι μη διαθέσιμα λόγω κάποιας απώλειας». (IMO SOLAS Reg. II-2/12-7.4).

Το κύριο εργαλείο για την διενέργεια μιας τέτοιας ανάλυσης είναι ένα **μοντέλο διαφυγής** (evacuation model), όπου θα προσομοιώνονται αναλυτικά οι διάφορες διαδικασίες και θα εκτιμώνται ρεαλιστικά τα ζητούμενα αυτής. Τα μοντέλα διαφυγής ξεκίνησαν να αναπτύσσονται για κτίρια και χώρους συγκέντρωσης μεγάλου πλήθους (γήπεδα, συναυλιακοί και εκθεσιακοί χώροι κλπ.) ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του 1960 αλλά γνώρισαν μεγάλη άνθηση από το 1980 και μετά, λόγω κυρίως της ραγδαίας εξέλιξης της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Στα πλοία όμως, λόγω του αρκετά πιο σύνθετου προβλήματος αλλά και λόγω της μη απαίτησης διενέργειας αντίστοιχης ανάλυσης από τους ισχύοντες μέχρι τότε κανονισμούς, η σχετική έρευνα ήταν ακόμα σε αρχικά στάδια και κατ'επέκταση μη εφαρμόσιμη στην πράξη όταν τέθηκε σε ισχύ η απαίτηση της σύμβασης SOLAS. Αναγνωρίζοντας το γεγονός, ο IMO επανήλθε στο θέμα και με το έγγραφο MSC/Circ. 909/1999 *“Interim guidelines for a simplified evacuation analysis on Ro-Ro passenger ships”* πρότεινε μια απλή μεθοδολογία ανάλυσης. Οκτώ χρόνια αργότερα, με το MSC.1/Circ. 1238/2007 *“Guidelines for evacuation analysis of new and existing passenger ships”* πρόσθεσε μια πιο σύνθετη μεθοδολογία στο προτεινόμενο πλαίσιο. Και στα δυο αυτά έγγραφα τονίζεται ότι οι προτεινόμενες μεθοδολογίες είναι αρκετά γενικές στην περιγραφή της διαδικασίας και θεωρούνται αποδεκτές έως ότου να αναπτυχθούν πιο σύνθετα και κατ'επέκτασιν ρεαλιστικότερα μοντέλα.

Με αφορμή αυτές τις οδηγίες του IMO, πανεπιστήμια, ερευνητικές ομάδες αλλά και νηογνώμονες ασχολήθηκαν με το συγκεκριμένο αντικείμενο και τα αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά. Μοντέλα όπως το EVI (Evacuability Index) των σκωτσέζικων πανεπιστημίων Γλασκώβης και Strathclyde, το maritimeExodus του πανεπιστημίου Greenwich και το AENEAS του Γερμανικού Νηογνώμονα (Germanischer Lloyd) έχουν παρουσιαστεί και ήδη χρησιμοποιούνται από μελετητές και ναυπηγεία. Τα περισσότερα από αυτά τα μοντέλα έχουν προκύψει από ήδη υπάρχοντα μοντέλα για κτίρια και επίγειες κατασκευές και αυτό όχι μόνο λόγω της μεγαλύτερης εξέλιξης των τελευταίων αλλά και λόγω της παρόμοιας συμπεριφοράς που παρουσιάζουν τα εμπλεκόμενα άτομα σε κάθε περίπτωση.

1.2 Παγκόσμιος επιβατηγός στόλος & ναυτικά ατυχήματα

Τα τελευταία περίπου 20 χρόνια έχει υπάρξει μια μεγάλη αύξηση τόσο στον αριθμό του παγκόσμιου επιβατηγού στόλου, όσο και στο μέγεθος των πλοίων. Η αλλαγή αυτή είναι περισσότερο εμφανής στην κατηγορία των κρουαζιερόπλοιων, όπου οι χωρητικότητες στα νεοαναπηγηθέντα πλοία έχουν φτάσει στην τάξη των 6000 επιβατών (π.χ. το πλοίο Allure of the Seas της εταιρίας Royal Caribbean International, ναυπήγησης 2010 και χωρητικότητας 6296 επιβατών και πληρώματος). Σε έγγραφο που κατέθεσε η αντιπροσωπεία της Δανίας στην γενική συνέλευση του IMO τον Ιούλιο του 2008, αναφέρεται ότι ο συνολικός αριθμός των επιβατών αυξάνεται από το 2004 και μετά σε ποσοστό περίπου 10% ετησίως (IMO, MSC 85/INF.2, FSA - Cruise ships: Details of the Formal Safety Assessment, 2008). Η τάση αυτή προκαλεί συνεπακόλουθη αύξηση του παγκόσμιου στόλου κρουαζιερόπλοιων, με το μεγαλύτερο μέρος των νέων ναυπηγήσεων να αφορούν μεγάλα πλοία (άνω των 100 μέτρων μήκους). Στο ίδιο έγγραφο αναφέρεται ότι ο συνολικός αριθμός κρουαζιερόπλοιων στο τέλος του 2004 έφτανε στα 264 πλοία, τα 172 από τα οποία ήταν χωρητικότητας άνω των 20,000 GRT. Αντίστοιχα στοιχεία μας δίνουν και οι Lois, Wang, Wall και Ruxton, τα οποία συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Table 1
World cruise fleet (1998–2006)

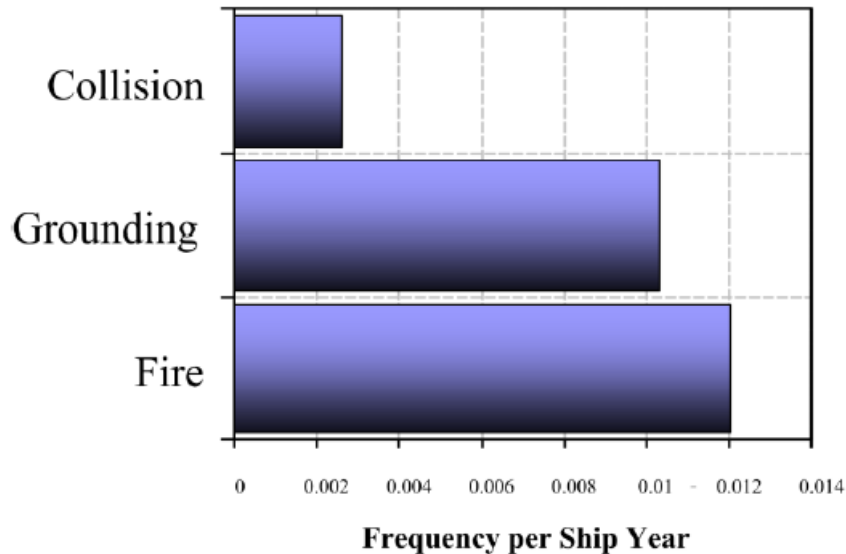
	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Ships	217	228	240	255	268	271	289	292	293
Berths	182,407	199,116	219,337	245,213	269,353	297,169	313,043	319,843	321,843
Market capacity (million)	9300	10,279	11,465	12,801	14,134	15,487	16,509	16,715	16,795
% Increase in capacity		10.5	11.5	11.7	10.4	9.6	6.6	1.3	0.5

Πίνακας 1.1.1: εξέλιξη παγκόσμιου επιβατηγού στόλου κατά τα έτη 1998-2006 (Lois, Wang, Wall, & Ruxton, 2004)

Η συγκέντρωση ενός τόσο μεγάλου αριθμού επιβατών σε έναν περιορισμένο χώρο όπως το πλοίο, καθώς και η κίνηση αυτού σε περιοχές αρκετά απομακρυσμένες από οργανωμένα κέντρα άμεσης βοήθειας σε περίπτωση ατυχήματος αυξάνει το ρίσκο και δημιουργεί νέες προκλήσεις όσον αφορά την ασφάλεια του πλοίου αλλά και των επιβατών.

Οι σημαντικότεροι κίνδυνοι (hazards) στους οποίους υπόκεινται το πλήρωμα και οι επιβάτες ενός πλοίου είναι η εισροή υδάτων λόγω σύγκρουσης ή προσάραξης και η πυρκαγιά. Σε δημοσιεύσεις που έχουν γίνει στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος FIREPROOF, αναφέρεται ότι οι παραπάνω κίνδυνοι αφορούν το 90% περίπου των αναφερθέντων

ατυχημάτων σε επιβατηγά πλοία, με την πυρκαγιά να εμφανίζει την μεγαλύτερη συχνότητα, όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.1.2. (Vassalos, Spyrou, Themelis, & Mermiris, 2010)



Εικόνα 1.1.2: συχνότητα ατυχημάτων στον παγκόσμιο επιβατηγό στόλο (Nilsen, 2004)

Παρόμοια εικόνα μας δίνουν οι G. Fowler και E. Sorgard, μετά από ανάλυση στοιχείων που εξήχθησαν από την βάση δεδομένων LMIS για την περιοχή της Βόρειας Θάλασσας και της ανατολικής εισόδου του καναλιού της Μάγχης. Ο μέσος όρος συμβάντων ανά χρόνο για την περίοδο μεταξύ 1986 και 1996 ήταν 0.52 συμβάντα σύγκρουσης, 0.27 συμβάντα προσάραξης, 0.93 συμβάντα πυρκαγιάς/έκρηξης και 0.24 συμβάντα αστοχίας της κατασκευής. (Fowler & Sorgard, 2000)

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η πυρκαγιά είναι ένας σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει την ασφάλεια ενός επιβατηγού πλοίου. Ενώ όμως, όπως αναφέραμε προηγουμένως, αρκετά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί για την προσομοίωση της διαφυγής από το εσωτερικό ενός πλοίου, ελάχιστα από αυτά λαμβάνουν υπόψη την περίπτωση πυρκαγιάς.

1.3 Σκοπός εργασίας - Προεπισκόπηση

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός απλοποιημένου μοντέλου διαφυγής από το εσωτερικό ενός επιβατηγού πλοίου σε περίπτωση πυρκαγιάς. Στόχος είναι το μοντέλο αυτό να αποτελέσει ένα εργαλείο ώστε ο μελετητής να έχει την δυνατότητα να ελέγξει καταρχήν την συμβατότητα των σχεδιαζόμενων χώρων του πλοίου με τις υποδείξεις των διάφορων κανονισμών του IMO, πριν χρησιμοποιήσει άλλα, πιο λεπτομερή μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη και άλλους παράγοντες, όπως η κίνηση του πλοίου ή η κλίση του. Το μοντέλο αυτό είναι πιθανοθεωρητικό (probabilistic) και χρησιμοποιεί κατάλληλες στατιστικές κατανομές για τους διάφορους παράγοντες που υπεισέρχονται στην διαδικασία, όπως ο χρόνος αντίδρασης, η επιλογή διαδρομής και η ταχύτητα κίνησης του επιβάτη. Αυτό συνεπάγεται ότι σε κάθε τρέξιμο του μοντέλου το αποτέλεσμα θα είναι διαφορετικό. Η παράμετρος αυτή μας δίνει την δυνατότητα, μέσω πολλαπλών εκτελέσεων του μοντέλου, να εξάγουμε κατανομές για τα διάφορα στοιχεία που ζητά ο IMO στην ανάλυση εγκατάλειψης (συνολικός χρόνος διαδικασίας, πυκνότητα επιβατών στους διάφορους χώρους, queuing).

Το μοντέλο μας βασίζεται σε αντίστοιχο μοντέλο που έχει αναπτύξει η ομάδα του καθηγητή G. Hadjisophocleous στο πανεπιστήμιο Carleton του Καναδά και έχει παρουσιαστεί στις παρακάτω δημοσιεύσεις:

- Zhang X., Li X., Hadjisophocleous G. (2013). A probabilistic occupant evacuation model for fire emergencies using Monte Carlo methods, *Fire Safety Journal*, 58
- Gruchy D.F.H. (2004). *Modeling occupant evacuation during fire emergencies in buildings*. Master of Applied Sciences Thesis. Ottawa: Carleton University

Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει αναπτυχθεί για κτίρια, ωστόσο με κατάλληλες αλλαγές και λαμβάνοντας υπόψη και τις υποδείξεις του IMO και χρησιμοποιώντας στοιχεία από έρευνες, το έχουμε προσαρμόσει για επιβατηγά πλοία και το έχουμε εμπλουτίσει με χρήσιμα εργαλεία.

1.4 Δομή εργασίας

Στο 1^ο κεφάλαιο κάνουμε μια εισαγωγή στο θέμα της διαφυγής και εγκατάλειψης του πλοίου και παραθέτουμε κάποια στατιστικά στοιχεία σχετικά με τα ναυτικά ατυχήματα και την πυρκαγιά στα επιβατηγά πλοία.

Στο 2^ο κεφάλαιο παραθέτουμε ένα ιστορικό των κανονισμών ασφάλειας στα επιβατηγά πλοία, βλέπουμε τους ισχύοντες κανονισμούς σχετικά με την διαφυγή στα επιβατηγά πλοία και περιγράφουμε αναλυτικά τις σχετικές διατάξεις της σύμβασης SOLAS καθώς και τις

μεθοδολογίες που έχει προτείνει ο IMO σχετικά με την διενέργεια ανάλυσης των διαδικασιών διαφυγής.

Στο 3^ο κεφάλαιο ασχολούμαστε με τα μοντέλα διαφυγής, τις κατηγορίες τους ανάλογα με την προσέγγιση της συμπεριφοράς, την μοντελοποίηση του χώρου και των επιβατών καθώς και την χρήση τους. Ακολουθώντας παρουσιάζουμε αναλυτικά τα υπάρχοντα μοντέλα σχετικά με την διαφυγή στα επιβατηγά πλοία.

Στο 4^ο κεφάλαιο βλέπουμε τα υπάρχοντα στοιχεία της βιβλιογραφίας σχετικά με τη συμπεριφορά σε καταστάσεις κινδύνου, την λήψη αποφάσεων υπό καθεστώς στρες, τυπικές συμπεριφορές (patterns) που παρατηρούνται στα πλοία καθώς και τον πανικό. Τέλος, βλέπουμε δεδομένα που έχουν προκύψει από έρευνες σχετικά με την μείωση των ταχυτήτων κίνησης λόγω χαμηλής ορατότητας από την παρουσία καπνού καθώς και λόγω της κλίσης και της κίνησης του πλοίου.

Στο 5^ο κεφάλαιο περιγράφουμε το μοντέλο που αναπτύξαμε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, με παραδείγματα και αιτιολόγηση σχετικά με τις αλλαγές και τις προσθήκες που κάναμε στο μοντέλο του Carleton στο οποίο και βασιστήκαμε. Επίσης, βλέπουμε την διαδικασία επιβεβαίωσης των μοντέλων διαφυγής που προτείνει ο IMO και παραθέτουμε τα αποτελέσματα αυτής στο μοντέλο. Τέλος, κατασκευάζουμε κάποια σενάρια προκειμένου να δείξουμε τις δυνατότητες του μοντέλου και παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα αυτών.

Στο 6^ο κεφάλαιο παραθέτουμε τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας σχετικά με το μοντέλο που αναπτύχθηκε καθώς και προτάσεις για την περαιτέρω ανάπτυξη του μοντέλου.

Στο παράρτημα Α βλέπουμε μια έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τους Ν. Βεντίκο και Μ. Πέτσιου στα πλαίσια του προγράμματος FIREPROOF σχετικά με την πυρκαγιά. Τα στοιχεία που αναφέρονται σε αυτήν δίνουν μια εικόνα για την επικινδυνότητα της πυρκαγιάς στην επιβατηγό ναυτιλία και μπορούν να χρησιμεύσουν στον μελετητή ναυπηγό ώστε εντοπίσει τα σενάρια με τη μεγαλύτερη συχνότητα και επικινδυνότητα.

Στο παράρτημα Β παραθέτουμε αναλυτικές οδηγίες για την χρήση του προγράμματος που αναπτύξαμε προκειμένου να εκτελέσουμε τις προσομοιώσεις του μοντέλου. Τέλος, στο παράρτημα Γ παραθέτουμε οδηγίες χρήσης για το πρόγραμμα CFAST που χρησιμοποιήσαμε για την εξαγωγή δεδομένων πυρκαγιάς.

2. ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΝΟΝΙΣΜΩΝ

2.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή, η εγκατάλειψη του πλοίου σε περίπτωση ενός ατυχήματος είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα όσον αφορά την ασφάλεια στις θαλάσσιες μεταφορές και ειδικότερα στον τομέα της επιβατηγού ναυτιλίας. Κατά συνέπεια ο ΙΜΟ έχει ασχοληθεί εκτεταμένα με το αντικείμενο και έχει εκδώσει έναν μεγάλο αριθμό οδηγιών, εγκυκλίων και κανονισμών, τα οποία και επικαιροποιεί τακτικά. Το σύνολο σχεδόν των ανωτέρω περιλαμβάνεται στην διεθνή σύμβαση SOLAS 74/78 (*Safety of life at Sea*), η οποία ορίζει κάποιες ελάχιστες προϋποθέσεις όσον αφορά την κατασκευή, τον εξοπλισμό και την λειτουργία ενός πλοίου, με έμφαση στην ασφάλεια του πληρώματος και των επιβατών.

Επίσης, είδαμε ότι η πυρκαγιά αποτελεί έναν από τους κυριότερους παράγοντες κινδύνου στην επιβατηγό ναυτιλία, καθώς αποτελεί τον συχνότερο παράγοντα στα καταγεγραμμένα ατυχήματα σε πλοία RO-PAX και κρουαζιερόπλοια. Οι σχετικοί κανονισμοί περιέχονται, εκτός από τη SOLAS, στους εξής κώδικες:

A) στον κώδικα FSS (*International Code for Fire Safety Systems*), που ασχολείται με τα συστήματα και τις διαδικασίες εντοπισμού, περιορισμού και κατάσβεσης της πυρκαγιάς

B) στον κώδικα FTP (*Fire Test Procedures Code*), ο οποίος καθορίζει τις διαδικασίες ελέγχου των διαφόρων υλικών και συστημάτων που χρησιμοποιούνται σε ένα πλοίο με σκοπό την αποφυγή της πυρκαγιάς και των συνεπειών της.

Στις επόμενες σελίδες θα δούμε το ιστορικό εξέλιξης των κανονισμών σχετικά με την ανθρώπινη ασφάλεια και την προστασία έναντι πυρκαγιάς και θα αναφερθούμε αναλυτικά στις διατάξεις της σύμβασης SOLAS που αφορούν τα μέσα και τις διαδικασίες διαφυγής. Τέλος, θα δούμε την οδηγία *MSC.1/Circ.1238* και θα περιγράψουμε αναλυτικά τις δυο μεθόδους που προτείνει για την διενέργεια της ανάλυσης της διαδικασίας διαφυγής από επιβατηγά πλοία.

2.2 Ιστορική εξέλιξη κανονισμών

Σύμβαση SOLAS 1914

Το γεγονός-ορόσημο για την εξέλιξη των διαφόρων διεθνών κανονισμών ασφαλείας ήταν το ατύχημα του *Τιτανικού* στον βόρειο Ατλαντικό, την 15^η Απριλίου του 1912. Η βύθισή του και ο θάνατος 1.517 εκ συνόλου 2.224 επιβατών και πληρώματος προκάλεσε ιδιαίτερη αίσθηση στην κοινή γνώμη και ώθησε για πρώτη φορά την διεθνή ναυτιλιακή κοινότητα να ασχοληθεί σοβαρά και από κοινού με το ζήτημα της ασφάλειας. Αποτέλεσμα των διεργασιών αυτών ήταν η πρώτη σύμβαση SOLAS (*International Convention for the Safety of Life at Sea*), η οποία υπεγράφη στο Λονδίνο στις 20 Ιανουαρίου του 1914 από τις κυβερνήσεις των μεγάλων ναυτιλιακών δυνάμεων της εποχής (ΗΠΑ, Μ. Βρετανία, Γερμανία, Γαλλία, Ισπανία, Ιταλία, Νορβηγία, Κάτω Χώρες και Ρωσία). Η SOLAS του 1914 περιλάμβανε διατάξεις όσον αφορά κυρίως τις στεγανές και αντιπυρικές υποδιαιρέσεις, τα μέσα κατάσβεσης πυρκαγιάς, τις ραδιοτηλεπικοινωνίες και την επάρκεια των σωστικών μέσων. Το ξέσπασμα όμως του Α΄ Παγκοσμίου Πολέμου ανέστειλε και εν τέλει ματαίωσε την εφαρμογή της Σύμβασης. Ωστόσο, το σύνολο των ανωτέρω κρατών εισήγαγαν μέρη αυτής στις εθνικές τους νομοθεσίες.

Σύμβαση SOLAS 1929

Η επόμενη σημαντική εξέλιξη συνέβη στην διεθνή διάσκεψη του Λονδίνου το 1929. Εκεί, οι κυβερνήσεις που είχαν υπογράψει την αρχική σύμβαση SOLAS του 1914, μαζί με το σύνολο των σκανδιναβικών κρατών, την Ινδία, την Ιρλανδία, την Αυστραλία και την Σοβιετική Ένωση, υιοθέτησαν την επόμενη μορφή της SOLAS. Η νέα σύμβαση, η οποία τέθηκε σε ισχύ το 1932, περιλάμβανε επικαιροποιημένες όλες τις διατάξεις της SOLAS του 1914 και γνώρισε ευρεία αποδοχή και εφαρμογή ακόμα και από χώρες που δεν συμμετείχαν στην διάσκεψη.

Δυο χρόνια μετά την εφαρμογή του SOLAS 1929, και πιο συγκεκριμένα στις 5 Σεπτεμβρίου του 1934, ξέσπασε πυρκαγιά στο επιβατηγό πλοίο *Morro Castle* καθώς αυτό έπλεε πλησίον των ακτών του New Jersey. Η πυρκαγιά είχε ως αποτέλεσμα τον θάνατο 137 ατόμων και την καταστροφή μεγάλου μέρους του πλοίου, το οποίο και χαρακτηρίστηκε ως ολική τεκμαρτή απώλεια (*constructive total loss*). Το ατύχημα αυτό είχε ως αποτέλεσμα την υιοθέτηση τεχνολογιών όπως τα πυρίμαχα υλικά και οι αυτόματες θύρες πυροπροστασίας. Επίσης, άμεση αντίδραση στο γεγονός αυτού ήταν η ίδρυση της αμερικανικής Ακαδημίας Εμπορικού Ναυτικού και η υποχρεωτική πλέον εκπαίδευση των πληρωμάτων και τα τακτικά γυμνάσια πάνω στις διαδικασίες αντιμετώπισης αντίστοιχων περιστατικών και οργάνωσης διαδικασιών εκκένωσης πλοίων που βρίσκονται σε κίνδυνο.



Εικόνα 2.2.1: το φλεγόμενο *Morro Castle*

Σύμβαση SOLAS 1948 και ίδρυση του IMO

Η ραγδαία τεχνολογική εξέλιξη που συντελέστηκε κατά τις δεκαετίες του 1930 και 1940, η εμπειρία που αποκτήθηκε κατά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο και η παρουσίαση νέων τύπων πλοίων (π.χ. τα φορτηγά τύπου *Liberty*) κατέστησε ανεπαρκές το μέχρι τότε ισχύον κανονιστικό πλαίσιο. Η επιβεβλημένη επικαιροποίηση του πλαισίου αυτού οδήγησε στην αναθεωρημένη SOLAS του 1948, στην οποία προστέθηκαν νέοι κανονισμοί που αφορούσαν αποκλειστικά την πυροπροστασία και οι οποίοι είναι σε ισχύ μέχρι και σήμερα (πιο συγκεκριμένα οι παράγραφοι *D*, *E* και *F* του *Κεφαλαίου II*). Η SOLAS του 1948 ήταν η πρώτη σύμβαση αυτού του είδους στην οποία υπήρχε η πρόβλεψη της τακτικής επικαιροποίησης (*amendment*) και όχι πλήρους αναθεώρησης.

Αργότερα την ίδια χρονιά, σε διεθνή συνδιάσκεψη που πραγματοποιήθηκε στην έδρα του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών στη Γενεύη, ιδρύθηκε ως ανεξάρτητη υπηρεσία υπό την αιγίδα του ΟΗΕ ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (*International Maritime Organization, IMO*). Ο οργανισμός αυτός δημιουργήθηκε με σκοπό να αποτελέσει το κατεξοχήν αρμόδιο όργανο που θα εκδίδει και θα ελέγχει την εφαρμογή διεθνών κανονισμών όσον αφορά την ναυτική ασφάλεια. Κατά συνέπεια, η σύμβαση SOLAS τέθηκε υπο την δικαιοδοσία του νεοϊδρυθέντος Οργανισμού. Ιδιαίτερης σημασίας ήταν και η δημιουργία στα πλαίσια του IMO δυο μόνιμων επιτροπών: της Επιτροπής Ναυτικής Ασφάλειας (*Maritime Safety Committee, MSC*) και της Υπο-επιτροπής Πυρασφάλειας (*Sub-committee on Fire Protection, FP*).

Σύμβαση SOLAS 1960

Λόγω της μεγάλης καθυστέρησης στην σύσταση του Οργανισμού, η πρώτη γενική συνέλευσή του πραγματοποιήθηκε μόλις το 1959. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την διαρκώς επιταχυνόμενη τεχνολογική εξέλιξη και την ραγδαία ανάπτυξη του διεθνούς ναυτιλιακού εμπορίου τα πρώτα μεταπολεμικά χρόνια, κατέστησε την SOLAS του 1948 πρακτικά μη εφαρμόσιμη. Τα εκπροσωπούμενα στον IMO κράτη αποφάσισαν ότι θα ήταν προτιμότερο να συνταχθεί εξ αρχής μια νέα σύμβαση, παρά να αναθεωρηθεί η ισχύουσα. Έτσι, το 1960 πραγματοποιήθηκε στο Λονδίνο η πρώτη μεγάλη διάσκεψη υπο την αιγίδα του IMO. Αποτέλεσμα αυτής ήταν η Σύμβαση SOLAS του 1960, την οποία και υπέγραψαν οι αντιπροσωπείες 55 κρατών, 21 περισσότερα από αυτά που είχαν υπογράψει την αντίστοιχη 12 χρόνια πριν. Η SOLAS 1960 όριζε ένα σύνολο από πιστοποιητικά τα οποία θα πρέπει να φέρουν όλα τα εμπορικά και επιβατηγά πλοία άνω των 300 τόνων που πραγματοποιούν διεθνείς πλόες, καθώς και τους ελέγχους που απαιτούνται πριν από την έκδοσή τους. Επίσης, περιέγραφε τις διαδικασίες μέσω των οποίων κάθε κυβέρνηση κράτους-μέλους θα μπορούσε να καταθέσει τις προτάσεις της σχετικά με την επικαιροποίηση των κανονισμών καθώς και στοιχεία από διερεύνηση ναυτικών ατυχημάτων που δικαιολογούσαν τις προτεινόμενες αλλαγές. Η Σύμβαση επέφερε επίσης αλλαγές στους ήδη ισχύοντες κανονισμούς σχετικά με τις ραδιοτηλεπικοινωνίες, την πυρασφάλεια (ένα μέρος των κανονισμών πυροπροσφάλειας εφαρμόστηκε για πρώτη φορά και για εμπορικά πλοία) και τα σωστικά μέσα. Όσον αφορά το τελευταίο, ήταν η πρώτη σύμβαση που εισήγαγε τις σχεδίες (liferafts) ως συμπλήρωμα των σωσίβιων λεμβών στα επιβατηγά πλοία. Η SOLAS του 1960 περιελάμβανε επίσης 56 ψηφίσματα (resolutions) που αποτέλεσαν κατευθυντήριες γραμμές σχετικά με τους στόχους του IMO τα επόμενα χρόνια. Τα ψηφίσματα αυτά αποτέλεσαν την βάση για την σύνταξη διάφορων ξεχωριστών κωδίκων, όπως ο Κώδικας για την Μεταφορά Επικίνδυνων Φορτίων (*International Maritime Dangerous Goods Code*) του 1965 και ο Κώδικας Γραμμών Φορτώσεως (*Load Lines Code*) του 1966. Μέσα στα επόμενα 15 χρόνια από την υιοθέτηση της SOLAS του 1960 έγιναν έξι εκτεταμένες τροποποιήσεις του περιεχομένου της, οι περισσότερες από τις οποίες αφορούσαν την πυρασφάλεια και πυροπροστασία (πυρίμαχα και θερμομονωτικά υλικά, αυτόματα μέσα εντοπισμού και κατάσβεσης, εξοπλισμός ομάδων κατάσβεσης κλπ.).

Σύμβαση SOLAS 1974

Οι χρονοβόρες διαδικασίες που προδιαγράφονταν από την Σύμβαση του 1960 για την έγκριση και υιοθέτηση τροποποιήσεων των κανονισμών (υπερψήφιση από τα 2/3 των κρατών-μελών και εφαρμογή τους τουλάχιστον 12 μήνες μετά την ψήφισή τους), κατέστησαν για άλλη μια φορά την Σύμβαση ανεπαρκή. Έτσι, τον Νοέμβριο του 1974 υιοθετήθηκε η 5^η κατά σειρά μορφή της SOLAS, η οποία και ισχύει μέχρι σήμερα. Οι σημαντικότερες αλλαγές έναντι της προηγούμενης σύμβασης είναι:

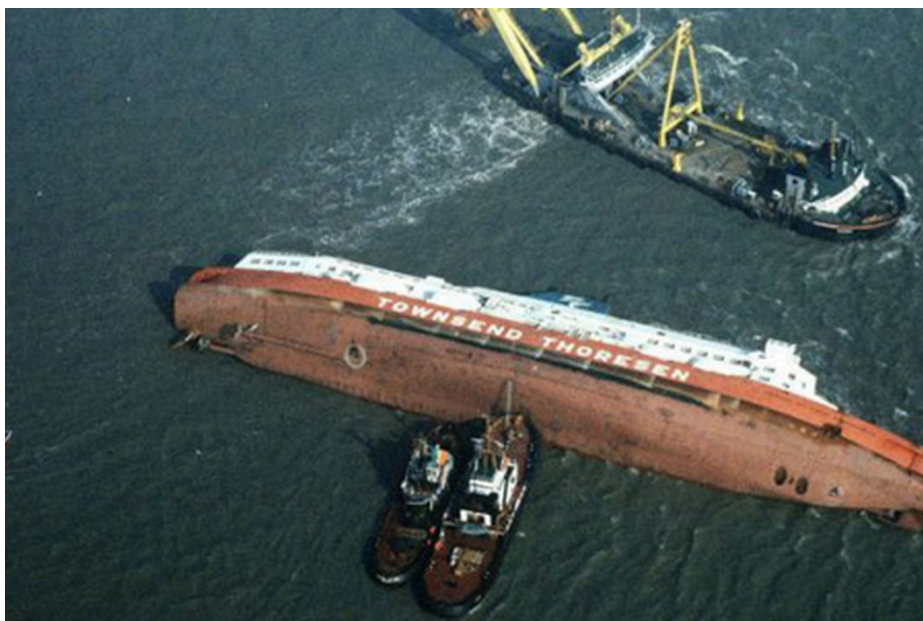
- Η αλλαγή του κεφαλαίου VIII, το οποίο ορίζει την διαδικασία έγκρισης των τροποποιήσεων: κάθε κυβέρνηση πλέον θεωρείται ότι εγκρίνει εξ αρχής την προτεινόμενη τροποποίηση, εκτός και αν γνωστοποιήσει την αντίθεσή της. Επίσης, οι τροποποιήσεις θεωρείται ότι ισχύουν με την ψήφισή τους. Έτσι διευκολύνεται και επιταχύνεται η όλη διαδικασία.
- Η διαίρεση του *Κεφαλαίου II* σε δυο κομμάτια: το *Κεφάλαιο II-1* που αφορά την κατασκευή, την στεγανή υποδιαίρεση, την ευστάθεια και την ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση και το *Κεφάλαιο II-2*, που αφορά την πυρασφάλεια, τον εντοπισμό και την κατάσβεση πυρκαγιάς. Στο νέο κεφάλαιο II-2 περιλαμβάνονται και οι διατάξεις για την διαφυγή από το εσωτερικό του πλοίου, οι οποίες και μας αφορούν άμεσα στην παρούσα εργασία.
- Η εισαγωγή του νέου *Κεφαλαίου VIII*, που αφορά τα πυρινοκίνητα πλοία (Εκείνη την εποχή διαφαινόταν μια αυξημένη τάση προς πυρινοκίνητα, φορτηγά κυρίως, πλοία. Τελικώς, η τεχνολογία αυτή δεν έτυχε ευρείας εφαρμογής και σταδιακά εγκαταλείφθηκε, το σχετικό κεφάλαιο ωστόσο παραμένει στους κανονισμούς).

Η Σύμβαση του 1974 έχει τροποποιηθεί αρκετές φορές από την στιγμή της εφαρμογής της. Οι κυριότερες τροποποιήσεις όσον αφορά τα επιβατηγά πλοία έγιναν μετά από τρία μεγάλα ναυτικά ατυχήματα: την ανατροπή του *Herald of Free Enterprise*, την πυρκαγιά στο *Scandinavian Star* και την βύθιση του *Estonia*.

MS Herald of Free Enterprise

Το *Herald of Free Enterprise* ήταν ένα πλοίο τύπου RO-PAX, το οποίο ναυπηγήθηκε στα γερμανικά ναυπηγεία Schichau-Unterweser το 1980. Στις 6 Μαρτίου του 1987, καθώς το πλοίο αναχωρούσε από το βελγικό λιμάνι Zeebrugge με προορισμό το Dover, ανατράπηκε στην έξοδο του λιμανιού. Αιτία ήταν η εισροή υδάτων από την προωρία θύρα οχημάτων του πλοίου, η οποία είχε μείνει ανοιχτή λόγω αμέλειας του υπεύθυνου αξιωματικού. Η απώλεια ευστάθειας και η ταχεία ανατροπή του (μόλις 90 δευτερόλεπτα) προκάλεσε την παγίδευση στο εσωτερικό του πλοίου και τον θάνατο 193 επιβατών. Ο IMO αντέδρασε άμεσα με την

υιοθέτηση σε δύο φάσεις (Απρίλιος και Οκτώβριος 1988) σημαντικών τροποποιήσεων, κυρίως στο κεφάλαιο II-1, που αφορά την ευστάθεια και την στεγανή υποδιαίρεση. Οι τροποποιήσεις αυτές κατέστησαν υποχρεωτικές, μεταξύ άλλων, την τοποθέτηση σημάτων για τις οδούς διαφυγής και λαμπτήρων με αυτόνομη παροχή ενέργειας σε όλους τους χώρους επιβατών, καθώς και την δυνατότητα άμεσου ελέγχου των αυτόματων θυρών (υδατοστεγών και πυροστεγών) από την γέφυρα του πλοίου.



Εικόνα 2.2.2: το Herald of Free Enterprise

MS Scandinavian Star

Ιδιαίτερα σημαντικό γεγονός από την άποψη της εξέλιξης των κανονισμών πυροπροστασίας, καθώς και διατάξεων για την έγκαιρη και ασφαλή διαφυγή από ένα πλοίο σε κίνδυνο, ήταν η πυρκαγιά στο επιβατηγό πλοίο *Scandinavian Star*. Το *Scandinavian Star*, που ναυπηγήθηκε στην Γαλλία το 1971, εκτελούσε το δρομολόγιο μεταξύ του Όσλο της Νορβηγίας και του Frederikshavn της Δανίας. Τις πρώτες πρωινές ώρες της 7^{ης} Απριλίου του 1990, και ενώ το πλοίο βρισκόταν στο μέσον περίπου της διαδρομής του, ξέσπασε πυρκαγιά ταυτόχρονα σε δυο διαφορετικά καταστρώματα του χώρου ενδιαίτησης των επιβατών (τα στοιχεία που προέκυψαν από την διερεύνηση του ατυχήματος οδήγησαν τις αρμόδιες αρχές στο συμπέρασμα ότι επρόκειτο για εμπρησμό). Ο καθυστερημένος εντοπισμός της πυρκαγιάς, οι λανθασμένοι χειρισμοί του πληρώματος, η κακή σχεδίαση (από άποψη διαρρύθμισης και οδών διαφυγής), οι ελλείψεις στα μέσα ειδοποίησης, αυτόματου περιορισμού και κατάσβεσης καθώς και στη σήμανση οδήγησαν στον θάνατο 159 επιβατών. Ο IMO αντέδρασε με την υιοθέτηση νέων, αυστηρότερων κανονισμών για την πυρασφάλεια και επέβαλλε την

εφαρμογή τους τόσο στις νέες ναυπηγήσεις όσο και στα υπάρχοντα πλοία. Οι κανονισμοί αυτοί περιελάμβαναν διατάξεις για την χρήση συστημάτων ψεκασμού (sprinkler), αυτόματου εντοπισμού (smoke detectors), νέων υλικών για την κατασκευή πυροστεγών φρακτών καθώς και βελτιωμένες διαδικασίες και μέσα για την διευκόλυνση της διαφυγής των επιβατών (φωτισμός χαμηλά στα τοιχώματα των εσωτερικών χώρων, με ανεξάρτητη παροχή ενέργειας). Επίσης, το 1992 η Επιτροπή Πυρασφάλειας έκρινε επιβεβλημένη την πλήρη αναθεώρηση του Κεφαλαίου II-2 της SOLAS, καθώς το πλήθος και η αλληλοεπικάλυψη των διαφόρων διατάξεών του το καθιστούσε ιδιαίτερα δύσχρηστο, τόσο για τους μελετητές όσο και για τις αρμόδιες αρχές.



Εικόνα 2.2.3: οι προσπάθειες κατάσβεσης της πυρκαγιάς στο Scandinavian Star

MS Estonia

Στις 28 Σεπτεμβρίου του 1994 συνέβη ένα από τα μεγαλύτερα ναυτικά ατυχήματα της ιστορίας και ίσως το πιο σημαντικό από την άποψη της εξέλιξης των κανονισμών ασφαλείας στα επιβατηγά πλοία. Το πλοίο *Estonia*, προερχόμενο από το Tallinn με προορισμό την Στοκχόλμη και εν μέσω σφοδρής θαλασσοταραχής, βυθίστηκε σχεδόν άυτανδρο στην Βαλτική Θάλασσα. Αιτία του ναυαγίου ήταν η αστοχία του συστήματος ασφάλισης της πρωραίας θύρας οχημάτων (bow visor). Στις 1:00 περίπου τα ξημερώματα και έπειτα από μια σειρά έντονων ήχων σπασίματος μετάλλου, οι οποίοι έγιναν αντιληπτοί τόσο από το πλήρωμα όσο και από τους επιβάτες, το bow visor αποκολλήθηκε από το υπόλοιπο πλοίο με αποτέλεσμα την εισροή υδάτων στο κύριο κατάστρωμα του πλοίου και μέσω αυτού στα κατώτερα καταστρώματα και

το μηχανοστάσιο. Το πλοίο σε εξαιρετικά σύντομο χρονικό διάστημα (μερικά λεπτά), έχασε την υδροστατική του ισορροπία και απέκτησε πολύ μεγάλη κλίση. Η κλίση αυτή, σε συνδυασμό με την επιταχυνόμενη εισροή υδάτων και τα έντονα καιρικά φαινόμενα, επέφερε την ανατροπή και βύθιση του πλοίου μερικά λεπτά αργότερα. Από τους 989 επιβαίνοντες, επιβάτες και πλήρωμα, διασώθηκαν μέσα στις επόμενες ημέρες μόλις 138. Το ατύχημα του *Estonia* προκάλεσε ιδιαίτερη αίσθηση και οδήγησε τις χώρες της Βαλτικής στην υιοθέτηση μιας τοπικής συμφωνίας (γνωστής ως Συμφωνίας της Στοκχόλμης). Η συμφωνία αυτή όριζε ότι όλα τα πλοία που διαπλέουν τη Βόρεια και τη Βαλτική Θάλασσα θα πρέπει να έχουν συμμορφωθεί με όλες τις αναθεωρήσεις του κεφαλαίου II-1 της SOLAS έως τις 31/12/1998. Επίσης, όριζε ότι τα πλοία αυτά θα πρέπει να διατηρούν την υδροστατική τους ισορροπία μετά από εισροή υδάτων, ακόμα και αν αυτή έχει φθάσει σε ύψος μισού μέτρου εντός του κυρίου καταστρώματος. Η Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Ναυτικής Ασφάλειας (*European Maritime Safety Agency, EMSA*) υιοθέτησε αργότερα την Συμφωνία της Στοκχόλμης για όλα τα επιβατηγά πλοία που διαπλέουν τα ευρωπαϊκά χωρικά ύδατα. Η Συμφωνία της Στοκχόλμης προκάλεσε εμμέσως τον εξυγchronισμό του ευρωπαϊκού επιβατηγού στόλου, καθώς πολλά από τα υπάρχοντα πλοία (ROPAX κυρίως) ήταν αδύνατο ή ασύμφορο να εναρμονιστούν με τους νέους κανονισμούς, γεγονός που επέφερε την πρόωρη απόσυρσή τους από τις εσωτερικές γραμμές.



Εικόνα 2.2.4: το Estonia στο Tallinn, λίγους μήνες πριν το ατύχημα

Κώδικας FTP

Το 1996 ο IMO προχώρησε στην αναθεώρηση του κεφαλαίου II-2 της SOLAS, συντάσσοντας εξ αρχής τα τμήματα Β (μέτρα πυροπροστασίας για επιβατηγά πλοία), C (μέτρα πυροπροστασίας για φορτηγά πλοία) και D (μέτρα πυροπροστασίας για δεξαμενόπλοια). Στα πλαίσια των αλλαγών αυτών, η υπο-επιτροπή FP συνέταξε τον κώδικα FTP (*Fire Test*

Procedures Code). Ο κώδικας αυτός, που τέθηκε σε ισχύ την 1^η Ιουλίου του 1998, περιλαμβάνει τις απαιτήσεις του IMO όσον αφορά τα διάφορα υλικά και συστήματα που εγκαθίστανται σε ένα πλοίο καθώς και προδιαγραφές σχετικά με τον εργαστηριακό έλεγχο, τις διαδικασίες έγκρισης και ελέγχου της λειτουργίας σε πραγματικές συνθήκες.

Κώδικας FSS

Τον Δεκέμβριο του 2000 η επιτροπή MSC υιοθέτησε τον κώδικα FSS (*International Code for Fire Safety Systems*). Ο κώδικας αυτός περιλαμβάνει τις προδιαγραφές σχετικά με τα συστήματα πυροπροστασίας που απαιτούνται από το κεφάλαιο II-2 της SOLAS. Ο λόγος πίσω από την υιοθέτηση του νέου κώδικα ήταν ότι έπρεπε να διαχωριστούν οι κρατικές (statutory) απαιτήσεις που ανήκουν στη SOLAS και αφορούν τις κρατικές αρχές (κυβέρνηση, port state control, σημαία), από τις καθαρά τεχνικές προδιαγραφές των διαφόρων συστημάτων πυροπροστασίας, που αφορούν τους μελετητές και κατασκευαστές. Η σύνταξη του κώδικα FSS έχει γίνει με γνώμονα την φιλικότητα ως προς τον άμεσα ενδιαφερόμενο μελετητή ή κατασκευαστή.

71^η σύνοδος της επιτροπής MSC και ανάλυση διαδικασίας εγκατάλειψης πλοίου

Τον Ιανουάριο του 1999 και κατά την 71^η σύνοδό της, η επιτροπή ναυτικής ασφάλειας του IMO (MSC) υιοθέτησε την οδηγία 909 (IMO MSC Circ. 909 "*Interim Guidelines for the evacuation analysis on Ro-Ro passenger ships*") μέσω της οποίας προτείνει την διενέργεια ανάλυσης της διαδικασίας εγκατάλειψης ενός πλοίου σε κατάσταση κινδύνου. Σκοπός της ανάλυσης αυτής είναι η εξακρίβωση αν οι σχεδιαζόμενες οδοί διαφυγής (κύριες και δευτερεύουσες) επαρκούν για την έγκαιρη και ασφαλή κίνηση των επιβατών προς τους σταθμούς συγκέντρωσης (assembly stations) και εγκατάλειψης του πλοίου. Η πρόταση αυτή εισήχθη τελικώς ως απαίτηση στην SOLAS μέσω των τροποποιήσεων του 2000 και πιο συγκεκριμένα στο τμήμα D του κεφαλαίου II-2. Την οδηγία 909 ακολούθησε η 1001, η οποία αντιστοιχούσε στα επιβατηγά πλοία μεγάλης ταχύτητας (IMO MSC Circ. 1001 "*Interim guidelines for a simplified evacuation analysis of high-speed passenger craft*"). Τον Φεβρουάριο του 2002, η επιτροπή πυρασφάλειας εξέδωσε την οδηγία 1033, στην οποία περιλαμβάνονταν δυο μέθοδοι (μια απλή και μια πιο σύνθετη) για την διενέργεια της απαιτούμενης ανάλυσης, οι οποίες μπορούσαν να εφαρμοστούν πια και σε κρουαζιερόπλοια. Όπως γίνεται εύκολα κατανοητό από τον τίτλο τους, οι τρεις αυτές οδηγίες είχαν προσωρινό χαρακτήρα. Τελικώς, τον Οκτώβριο του 2007 ο IMO εξέδωσε την οδηγία 1238 (IMO MSC Circ. 1238 "*Guidelines for evacuation analysis for new and existing passenger ships*"). Σε αυτήν οριστικοποιούνται οι διατάξεις των προηγούμενων δυο οδηγιών και δίνονται καινούργια δεδομένα στον μελετητή, όσον αφορά τους χρόνους

απόκρισης και τις ταχύτητες κίνησης επιβατών και πληρώματος εντός του χώρου. Τα δεδομένα αυτά προέρχονται από σχετικά ερευνητικά προγράμματα που έχουν διεξαχθεί και περιελάμβαναν στοιχεία από πραγματικά περιστατικά, καθώς και ασκήσεις ετοιμότητας (evacuation drills) σε πλοία RO-PAX και κρουαζιερόπλοια.

2.3 Η Διεθνής Σύμβαση για την Ασφάλεια της Ανθρώπινης Ζωής στη Θάλασσα (SOLAS 1974)

Όπως αναφέραμε και στην προηγούμενη παράγραφο, η σύμβαση SOLAS είναι η πρώτη και σημαντικότερη συνθήκη που αφορά την ασφάλεια σε εμπορικά πλοία. Ο κύριος σκοπός της Σύμβασης είναι να προδιαγράψει τις ελάχιστες απαιτήσεις σχετικά με την κατασκευή, τον εξοπλισμό και την λειτουργία των πλοίων, με γνώμονα την ασφάλεια των επιβατών και του πληρώματος. Έχει εφαρμογή σε όλους τους τύπους πλοίων που εκτελούν διεθνείς πλόες και υπεύθυνες για την τήρησή της είναι οι Σημαίες (Flag States).

Η ισχύουσα έκδοση της Σύμβασης είναι η SOLAS 1974, ή “SOLAS 1974, as amended” λόγω των πολυάριθμων τροποποιήσεων που έχει δεχθεί από την ημέρα της υιοθέτησής της (όπως είδαμε και στην προηγούμενη παράγραφο). Τα περισσότερα από τα κράτη που συμμετέχουν στον IMO (συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας), έχουν υιοθετήσει την SOLAS και την έχουν εντάξει στην εθνική τους νομοθεσία. Η SOLAS αποτελείται από δυο μέρη:

- Το 1ο Μέρος (*Part I*): περιλαμβάνει τα γενικά άρθρα που περιγράφουν τις υποχρεώσεις και τα δικαιώματα των συμμετεχόντων κρατών, το Πρωτόκολλο του 1988 (SOLAS Protocol of 1988) που σκοπό έχει την σύζευξη της SOLAS με τις συμβάσεις MARPOL και Load Lines, και τέλος τα 12 κεφάλαια των κανονισμών.
- Το 2ο μέρος (*Part II*): περιλαμβάνει 4 παραρτήματα, σχετικά με τις διαδικασίες επιθεώρησης και έκδοσης πιστοποιητικών εναρμόνισης με την Σύμβαση καθώς και τις διάφορες τροποποιήσεις και τους χρονικούς τους περιορισμούς.

Το κομμάτι των κανονισμών που μας αφορά στην παρούσα εργασία είναι το Κεφάλαιο II-2 “Construction – Fire protection, fire detection and fire extinction”. Το κεφάλαιο αυτό αποτελείται από τα εξής τμήματα:

- Part A – *General* (application, fire safety objectives and functional requirements, definitions)
- Part B – *Prevention of fire and explosion* (probability of ignition, fire growth potential, smoke generation potential and toxicity)

- Part C – *Suppression of fire* (detection and alarm, control of smoke spread, containment of fire, fire fighting, structural integrity)
- Part D – *Escape* (notification of crew and passengers, means of escape)
- Part E – *Operational requirements* (operational readiness and maintenance, instructions, on-board training and drills, operations)
- Part F – *Alternative design and arrangements*
- Part G – *Special requirements* (helicopter facilities, carriage of dangerous goods, protection of vehicle, special category and ro-ro spaces, casualty threshold, safe return to port and safe areas, design criteria for systems to remain operational after fire casualty, safe centre on passenger ships)

Από τα παραπάνω τμήματα, αυτό που μας ενδιαφέρει κυρίως είναι το τμήμα D. Σε αυτό δίνονται οδηγίες σχετικά με τα συστήματα ειδοποίησης καθώς και τους σχεδιαστικούς περιορισμούς που αφορούν την διαδικασία εκκένωσης από το εσωτερικό του πλοίου. Οι οδηγίες χωρίζονται σε γενικές οδηγίες, οδηγίες για επιβατηγά πλοία, οδηγίες σχετικά με την διαφυγή από το μηχανοστάσιο και το γκαράζ οχημάτων και τέλος ειδικές οδηγίες για τα πλοία Ro-Ro.

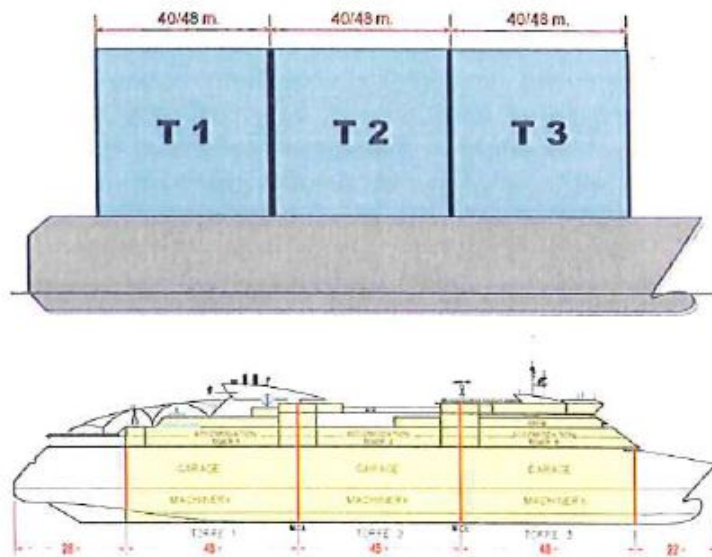
Οι κυριότερες γενικές οδηγίες που έχουν εφαρμογή σε όλα τα πλοία είναι οι ακόλουθες:

- 1) Στο πλοίο θα πρέπει να υπάρχει εγκατεστημένο σύστημα γενικού συναγερμού (general emergency alarm system), που να ειδοποιεί άμεσα το πλήρωμα και τους επιβάτες σε περίπτωση πυρκαγιάς.
- 2) Παρομοίως, θα πρέπει να υπάρχει σύστημα γενικών ανακοινώσεων και οδηγιών (public address system) που να καλύπτει τους χώρους ενδιαίτησης επιβατών και πληρώματος καθώς και τα εξωτερικά καταστρώματα του πλοίου.
- 3) Θα πρέπει να υπάρχουν οδοί διαφυγής (safe escape routes), οι οποίες να οδηγούν από τους χώρους ενδιαίτησης πληρώματος και επιβατών, στο κατάστρωμα όπου βρίσκονται οι σωσίβιες λέμβοι (embarkation deck).
- 4) Οι οδοί αυτοί θα πρέπει να διατηρούνται ασφαλείς και ελεύθερες από εμπόδια. Παρόλα αυτά, θα πρέπει να υπάρχει πρόβλεψη για δευτερεύουσες διαδρομές σε περίπτωση που κάποια οδός διαφυγής δεν είναι διαθέσιμη.
- 5) Τα εσωτερικά κλιμακοστάσια και οι σκάλες μεταξύ των εξωτερικών καταστρωμάτων θα πρέπει να είναι τοποθετημένα με τέτοιο τρόπο ώστε να προσφέρουν άμεση πρόσβαση στο κατάστρωμα αποβίβασης (embarkation deck).
- 6) Οι πόρτες που βρίσκονται πάνω στις οδούς διαφυγής θα πρέπει να ανοίγουν προς την κατεύθυνση του χώρου συγκέντρωσης. Εξαίρεση αποτελούν οι πόρτες στις καμπίνες και

αυτό για να μην προκληθούν τραυματισμοί στους επιβάτες που κινούνται στους διαδρόμους έξω από αυτές.

Τα κυριότερα σημεία για τα επιβατηγά πλοία είναι:

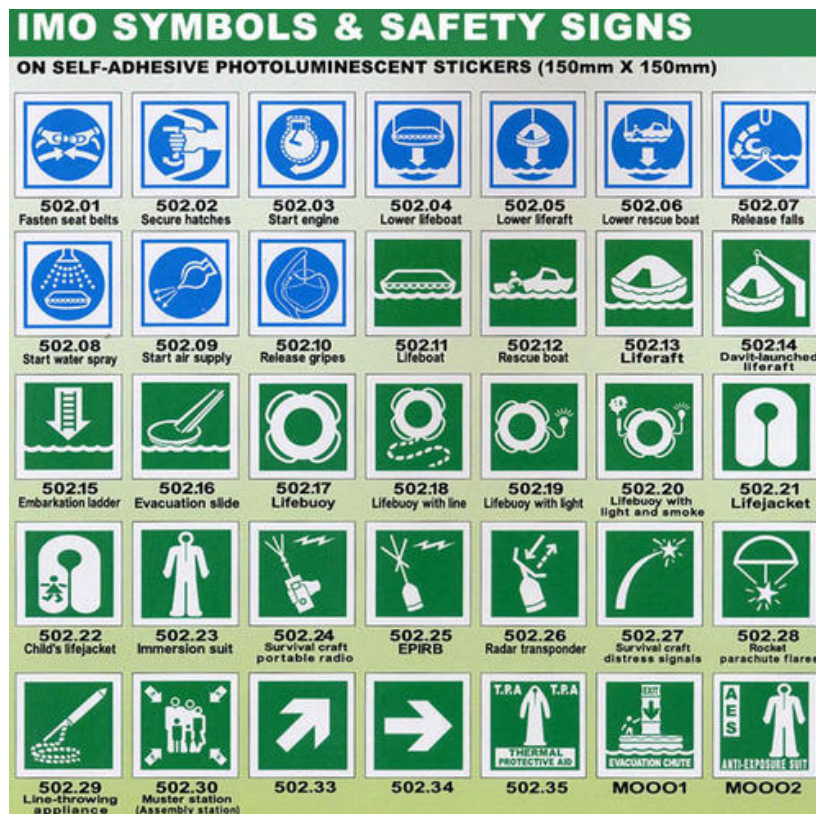
- 1) Για τους χώρους που βρίσκονται κάτω από το ανώτερο κατάστρωμα εγκαρσίων φρακτών (bulkhead deck), θα πρέπει να είναι διαθέσιμοι δυο τρόποι διαφυγής (means of escape), ο ένας όμως εκ των δυο θα πρέπει να είναι ανεξάρτητος από υδατοστεγείς θύρες.
- 2) Για τους χώρους πάνω από το bulkhead deck, θα πρέπει να είναι διαθέσιμοι δυο τρόποι διαφυγής σε κάθε βασική κατακόρυφη ζώνη (main vertical zone). Ως βασική κατακόρυφη ζώνη ορίζεται κάθε τμήμα του πλοίου, το οποίο περικλείεται από διαχωριστικά τύπου "Α" και το μήκος ή πλάτος κάθε καταστρώματος που περιλαμβάνεται σε αυτόν δεν υπερβαίνει τα 40 μέτρα. Ένας από τους τρόπους διαφυγής θα πρέπει να δίνει πρόσβαση σε κλιμακοστάσιο.



Εικόνα 2.3.1: main vertical zones

- 3) Οι διάδρομοι που βρίσκονται σε χώρους ενδιαίτησης ή υπηρεσίας θα πρέπει να δίνουν άμεση πρόσβαση σε κλιμακοστάσια, τα οποία και θα είναι περικλειόμενα από ειδικά θερμομονωτικά τοιχώματα (enclosed stairways). Τα κλιμακοστάσια αυτά θα πρέπει να έχουν τον απαιτούμενο χώρο ώστε να αποφευχθούν τα φαινόμενα συμφόρησης.
- 4) Κάθε επίπεδο εντός αίθουσας που εκτείνεται σε δύο καταστρώματα και άνω (atrium) θα πρέπει να προσφέρει δυο τρόπους διαφυγής. Σε ένα από τα καταστρώματα θα πρέπει να προσφέρεται και απευθείας πρόσβαση σε περικλειόμενο κλιμακοστάσιο.

- 5) Στα διάφορα μέσα διαφυγής, συμπεριλαμβανομένων κλιμακοστασιών και εξόδων, θα πρέπει να έχει τοποθετηθεί φωσφορίζουσα ταινία (photoluminescent strip) σε απόσταση 300 mm από το δάπεδο, ώστε οι επιβάτες να μπορούν να εντοπίσουν την διαδρομή προς την έξοδο σε συνθήκες χαμηλής ορατότητας.
- 6) Οι πόρτες των καμπινών θα πρέπει να διαθέτουν μηχανισμό ξεκλειδώματος από το εσωτερικό της καμπίνας χωρίς την χρήση κλειδιού. Το ίδιο ισχύει και για τις πόρτες που βρίσκονται επάνω στις διαδρομές διαφυγής.
- 7) Οι έξοδοι από κοινόχρηστους χώρους θα πρέπει να διαθέτουν μηχανισμό που να επιτρέπει το άμεσο άνοιγμά τους προς την κατεύθυνση της ροής διαφυγής (escape flow).
- 8) Απαγορεύεται η ύπαρξη τυφλών διαδρόμων (δηλαδή διαδρόμων που δεν προσφέρουν πρόσβαση στις οδούς διαφυγής και από τις δυο πλευρές τους).
- 9) Οι οδοί διαφυγής θα πρέπει να περιλαμβάνουν όσο το δυνατόν λιγότερες αλλαγές κατεύθυνσης. Επίσης, όλα τα μέσα διαφυγής θα πρέπει να φέρουν την κατάλληλη σήμανση, όπως αυτή ορίζεται από τον κανονισμό A.760(18) του IMO.



Εικόνα 2.3.2: σύμβολα σύμφωνα με τον κανονισμό A.760(18)

- 10) Οι κλειστοί χώροι που γειτνιάζουν με ανοιχτά καταστρώματα θα πρέπει να διαθέτουν εξόδους προς αυτά οι οποίες να μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως έξοδοι κινδύνου.
- 11) Τα εξωτερικά καταστρώματα θα πρέπει να επικοινωνούν άμεσα μέσω εξωτερικών διόδων με το embarkation deck.
- 12) Οι οδοί διαφυγής θα πρέπει να είναι ελεύθερες από εμπόδια καθ'όλη την διάρκεια του ταξιδιού, με την εξαίρεση κινητών τραπεζοκαθισμάτων τα οποία να δύναται να μετακινηθούν άμεσα για την ελευθέρωση της οδού.

Τέλος, σύμφωνα με την παράγραφο 7.4 του κανονισμού 13, η αποτελεσματικότητα όλων των μέτρων που ορίζονται στους κανονισμούς του Part D θα πρέπει να εκτιμηθούν μέσω της διενέργειας ανάλυσης της διαδικασίας διαφυγής. Πιο συγκεκριμένα, ο κανονισμός ορίζει ότι:

“Οι οδοί διαφυγής θα πρέπει να αξιολογηθούν μέσω ανάλυσης της διαδικασίας εγκατάλειψης, στα αρχικά ακόμα στάδια της μελέτης. Η ανάλυση πρέπει να πραγματοποιηθεί ώστε να εντοπιστεί και να εξαλειφθεί, στο μέτρο του δυνατού, η συμφόρηση που τυχόν εμφανισθεί κατά την εγκατάλειψη λόγω της κίνησης των επιβατών και του πληρώματος κατά μήκος των οδών διαφυγής, λαμβάνοντας όμως υπόψη την πιθανότητα κάποια μέλη του πληρώματος να χρειαστεί να κινηθούν αντίθετα από την ροή των επιβατών. Επίσης, η ανάλυση θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ώστε να αποδείξει ότι τα μέσα εγκατάλειψης είναι αρκούντως ευέλικτα για να αντιμετωπίσουν την περίπτωση που κάποιες από τις οδούς διαφυγής, τους σταθμούς συγκέντρωσης και εγκατάλειψης ή τις σωσίβιες λέμβους δεν είναι διαθέσιμα”.(SOLAS 74/78, Ch. II-2, Part D, Reg. 13/7.2)

2.4 Ο κώδικας Fire Safety Systems (FSS Code)

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, ο κώδικας FSS περιλαμβάνει τις τεχνικές προδιαγραφές για όλα τα μέσα πυρασφάλειας που εγκαθίστανται σε ένα πλοίο. Ο κώδικας αποτελείται από τα εξής τμήματα:

Chapter 1 – *General*

Chapter 2 – *International shore connections*

Chapter 3 – *Personnel protection*

Chapter 4 – *Fire extinguishers*

Chapter 5 – *Fixed gas fire-extinguishing systems*

Chapter 6 – *Fixed foam fire-extinguishing systems*

Chapter 7 – *Fixed pressure water-spraying and water-mist- fire-extinguishing systems*

Chapter 8 – *Automatic sprinkler, fire detection and fire alarm systems*

Chapter 9 – *Fixed fire detection and fire alarm systems*

Chapter 10 – *Sample extraction smoke detection systems*

Chapter 11 – *Low-location lighting systems*

Chapter 12 – *Fixed emergency fire pumps*

Chapter 13 – *Arrangement of means of escape*

Chapter 14 – *Fixed deck foam systems*

Chapter 15 – *Inert gas systems*

Το κομμάτι που μας ενδιαφέρει εδώ είναι το κεφάλαιο 13. Σε αυτό περιέχονται αναλυτικές οδηγίες σχετικά με την διαστασιολόγηση των κλιμακοστασίων, των διαδρόμων και των θυρών. Βασικός παράγοντας που υπεισέρχεται στους υπολογισμούς των διαστάσεων είναι ο αριθμός των ατόμων που θα κληθεί να εξυπηρετήσει το συγκεκριμένο μέσο διαφυγής σε περίπτωση κινδύνου.

Πολύ σημαντικό στοιχείο στους υπολογισμούς αυτούς είναι και η κατανομή των επιβατών στα διάφορα καταστρώματα του πλοίου κατά την στιγμή της εκκίνησης της διαδικασίας διαφυγής. Σύμφωνα με την παράγραφο 2.1.2.2.2, κατά τον υπολογισμό θα πρέπει να ληφθούν δυο περιπτώσεις:

Περίπτωση 1 (σενάριο νύχτας): Το σύνολο των επιβατών βρίσκεται στις καμπίνες. Τα $\frac{2}{3}$ του πληρώματος βρίσκονται στις αντίστοιχες καμπίνες ενώ το υπόλοιπο $\frac{1}{3}$ στους χώρους υπηρεσίας.

Περίπτωση 2 (σενάριο ημέρας): Τα $\frac{3}{4}$ του συνολικού αριθμού επιβατών βρίσκονται στους κοινόχρηστους χώρους και το υπόλοιπο $\frac{1}{4}$ στις καμπίνες. Από το σύνολο του πληρώματος, το $\frac{1}{3}$ βρίσκεται στους κοινόχρηστους χώρους, το $\frac{1}{3}$ στους χώρους υπηρεσίας και το $\frac{1}{3}$ στις καμπίνες του πληρώματος.

Όπως θα δούμε και παρακάτω, τα δυο αυτά είναι τα βασικά σενάρια που χρησιμοποιούνται τόσο στις προτεινόμενες από τον IMO μεθοδολογίες ανάλυσης, όσο και στα διάφορα μοντέλα διαφυγής.

2.5 Η οδηγία MSC.1/Circ.1238

Όπως είδαμε και προηγουμένως, η Σύμβαση SOLAS απαιτεί την διενέργεια ανάλυσης της διαδικασίας εγκατάλειψης ενός πλοίου σε περίπτωση κινδύνου. Ο σκοπός της ανάλυσης αυτής είναι η εξακρίβωση της επάρκειας, αλλά και της ευελιξίας των μέσων διαφυγής (means of escape) που έχουν σχεδιαστεί με βάση τόσο το κεφάλαιο II-2 της SOLAS όσο και το κεφάλαιο 13 του κώδικα FSS. Προκειμένου να βοηθήσει τους μελετητές, ο IMO έχει εκδώσει τον κανονισμό MSC.1/Circ. 1238 “*Guidelines for evacuation analysis for new and existing passenger ships*”. Ο κανονισμός αυτός αποτελείται από τρία παραρτήματα (annexes):

Annex 1: Guidelines for a simplified evacuation analysis for new and existing passenger ships

Annex 2: Guidelines for an advanced evacuation analysis of new and existing passenger ships

Annex 3: Guidance on validation/verification of evacuation simulation tools

Τα δύο πρώτα παραρτήματα αποτελούν τις προτεινόμενες από τον IMO μεθοδολογίες, ενώ το τρίτο περιλαμβάνει διάφορα test στα οποία θα πρέπει να επιτύχουν τα διάφορα υπολογιστικά μοντέλα διαφυγής ώστε να κριθεί ότι μπορούν να περιγράψουν ικανοποιητικά την διαδικασία.

Οι προτεινόμενες μεθοδολογίες είναι δυο: μια απλοποιημένη και μια πιο σύνθετη. Όπως χαρακτηριστικά αναφέρεται στην εισαγωγή του κανονισμού, η απλοποιημένη μέθοδος βασίζεται σε υποθέσεις οι οποίες περιορίζουν σημαντικά την ρεαλιστικότητά της. Έτσι, σε μεγαλύτερα και πιο πολύπλοκα όσον αφορά την διαρρύθμιση τους πλοία είναι καλύτερο να χρησιμοποιείται η πιο σύνθετη μέθοδος. Ωστόσο, στα αρχικά στάδια της σχεδίασης, όπου χρειαζόμαστε κυρίως μια πρώτη ιδέα για την επάρκεια των μέσων, είναι προτιμότερη η απλή μέθοδος, λόγω και της ευκολίας στην χρήση της.

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να αναφέρουμε εδώ ότι οι περιγραφόμενες μεθοδολογίες δεν επιβάλλονται εν είδη κανονισμού, αλλά προτείνονται από τον IMO για την διενέργεια επαρκούς ανάλυσης. Αυτό συμβαίνει διότι ο IMO θεωρεί ότι τα υπάρχοντα στοιχεία σχετικά με τις επιδράσεις των διαφόρων παραγόντων στην διαδικασία εγκατάλειψης του πλοίου δεν είναι προς το παρόν επαρκή ώστε η οδηγία αυτή να λάβει την μορφή κανονισμού. Επί την βάση αυτή και όπως τονίζεται στην οδηγία, οι συμμετέχουσες κυβερνήσεις θα πρέπει να κοινοποιούν και να συνιστούν τις μεθοδολογίες αυτές σε όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη. Το ίδιο ισχύει επίσης και για τα test που περιγράφονται στο Annex 3. Τέλος, ο IMO προτρέπει τις κυβερνήσεις να καταθέτουν στοιχεία για την αποτελεσματικότητα των μεθοδολογιών, όσο και

πληροφορίες ή δεδομένα που προκύπτουν από την επιστημονική έρευνα πάνω στην ανθρώπινη συμπεριφορά και τα οποία είναι ιδιαίτερα σημαντικά για την μελλοντική αναθεώρηση των μεθοδολογιών αυτών .

Στις επόμενες σελίδες θα περιγράψουμε αναλυτικά τις δυο αυτές μεθόδους. Όσον αφορά τα τεστ για τα μοντέλα διαφυγής που προτείνει ο IMO στο παράρτημα 3 της οδηγίας, αυτά θα περιγραφούν στο 5ο κεφάλαιο, όπου και τα χρησιμοποιούμε για την επιβεβαίωση του μοντέλου που έχουμε αναπτύξει. Επιγραμματικά θα αναφέρουμε εδώ ότι κατά τον Οργανισμό η επιβεβαίωση των μοντέλων είναι 4 ειδών:

- Δοκιμές των διαφόρων μερών του μοντέλου (component testing)
- Επιβεβαίωση της λειτουργίας του (functional verification)
- Ποιοτική επιβεβαίωση (qualitative verification)
- Ποσοτική επιβεβαίωση (quantitative verification)

Η οδηγία περιλαμβάνει 11 τεστ, τα οποία ανήκουν στην 1^η (component testing) και στην 3^η (qualitative verification) κατηγορία. Η επιβεβαίωση της λειτουργίας του μοντέλου γίνεται κατά την κρίση του μελετητή, ο οποίος και θα πρέπει να τρέξει κατάλληλα σενάρια ώστε να διαπιστώσει την ορθή λειτουργία όλων των διαδικασιών του μοντέλου, καθώς και να παράσχει στον χρήστη αναλυτικές οδηγίες για την χρήση του και τις δυνατότητές του. Τέλος, όσον αφορά την ποσοτική επιβεβαίωση, αυτή γίνεται συγκρίνοντας στοιχεία από πραγματικά περιστατικά με τα αποτελέσματα προσομοιώσεων τους στο μοντέλο. Ωστόσο, όπως χαρακτηριστικά αναφέρει η Οδηγία και διαπιστώσαμε και εμείς κατά τη συγκέντρωση της βιβλιογραφίας, υπάρχει σημαντική έλλειψη προς το παρόν σε σχετικά στοιχεία για πλοία. Για αυτό τον λόγο θεωρείται ότι οι διαδικασίες που περιγράψαμε προηγουμένως επαρκούν για τον έλεγχο των προτεινόμενων μοντέλων.

Οι προτεινόμενες μεθοδολογίες του IMO έχουν κατακριθεί εκτενώς στη σχετική βιβλιογραφία για τρεις κυρίως λόγους:

- 1) Δεν λαμβάνουν υπόψη την κλίση και την κίνηση του πλοίου, καθώς και τους διάφορους περιβαλλοντικούς παράγοντες (π.χ. περιορισμένη ορατότητα και τοξικές εκλύσεις σε περίπτωση πυρκαγιάς)
- 2) Δεν λαμβάνουν υπόψη τους ψυχολογικούς παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά τις αποφάσεις των επιβατών.
- 3) Αγνοούνται οι εναλλακτικές διαδρομές που μπορούν να ακολουθήσουν οι επιβάτες σε περίπτωση που η κύρια διαδρομή που χρησιμοποιούν είναι είτε μπλοκαρισμένη είτε η συμφόρηση σε αυτήν είναι μεγάλη. (Lee, Kim, Park, & Park, 2003)

2.5.1 Απλή μέθοδος

Πριν περιγράψουμε την απλή μέθοδο, πρέπει να αναφέρουμε ότι οι δυο μεθοδολογίες χωρίζουν την διαδικασία της εγκατάλειψης του πλοίου σε τέσσερις διακριτές χρονικές περιόδους:

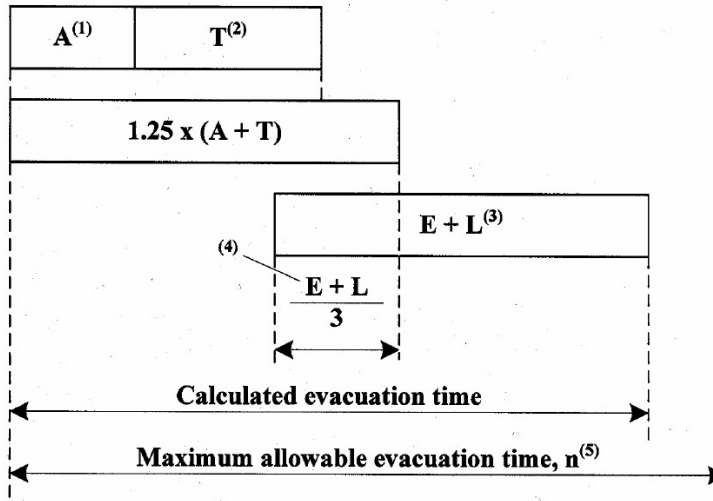
- *Awareness time* (A): ο χρόνος που απαιτείται ώστε να ειδοποιηθούν οι επιβάτες για τον κίνδυνο και να εκκινήσουν προς τους σταθμούς συγκέντρωσης. Ο χρόνος αυτός λαμβάνεται ίσος με 5 min για σενάρια ημέρας (cases 1 & 3) και 10 min για σενάρια νύχτας (cases 2 & 4).
- *Travel time* (T): ο χρόνος που απαιτείται ώστε όλοι οι επιβάτες να φτάσουν στους σταθμούς συγκέντρωσης.
- *Embarkation time* (E): ο χρόνος που απαιτείται ώστε οι επιβάτες να μπουν στις σωσίβιες λέμβους.
- *Launch time* (L): ο χρόνος που χρειάζεται ώστε να αποδεσμευτούν οι λέμβοι.

Κοινός στόχος και των δυο μεθόδων είναι ο υπολογισμός του χρόνου κίνησης T. Η διαφοροποίηση όσον αφορά τους χρόνους έγκειται στον υπολογισμό του συνολικού χρόνου της διαδικασίας, και κυρίως του χρόνου αντίληψης A. Η απλή μέθοδος τον λαμβάνει ως μια καθολική τιμή για όλα τα άτομα, ενώ η σύνθετη μέθοδος τον υπολογίζει για κάθε άτομο ξεχωριστά με βάση συγκεκριμένες κατανομές.

Ο συνολικός χρόνος της διαδικασίας υπολογίζεται από την απλή μέθοδο με βάση την ακόλουθη εξίσωση:

$$1.25(A + T) + 2/3(E + L) \leq n$$

Ο αριθμός 1.25 αποτελεί τον συντελεστή ασφαλείας που εισάγεται για να αντιμετωπίσει τις διάφορες απλοποιήσεις της μεθόδου.. Το κλάσμα 2/3 εισάγεται στον υπολογισμό συνολικού χρόνου, καθώς η πρώτη φάση (A+T) της διαδικασίας αλληλεπικαλύπτεται από την δεύτερη φάση (E+L). Αυτό γίνεται ευκολότερα κατανοητό από το παρακάτω σχήμα:



- (1) 10 min in case 1 and case 3, 5 min in case 2 and case 4
- (2) calculated as in appendix 1 to these Guidelines
- (3) maximum 30 min in compliance with SOLAS regulation III/21.1.4
- (4) overlap time = $1/3 (E+L)$
- (5) values of n (min) provided in 3.5.2

Εικόνα 2.5.1.1: κατάτμηση χρόνου ολοκλήρωσης διαδικασίας σύμφωνα με την απλή μέθοδο της οδηγίας MSC.1/Circ.1238

Ο συνολικός χρόνος, όπως υπολογίζεται από την εξίσωση που μόλις αναφέραμε, αποτελεί και το βασικό κριτήριο της ανάλυσης της διαδικασίας εγκατάλειψης του πλοίου. Ο αριθμός n ισούται με:

- 60 min, για πλοία ro-ro
- 60 min, για όλα τα υπόλοιπα επιβατηγά πλοία, αρκεί αυτά να μην διαθέτουν πάνω από 3 βασικές κατακόρυφες ζώνες
- 80 min, για όλα τα υπόλοιπα επιβατηγά πλοία, αν αυτά έχουν πάνω από 3 βασικές κατακόρυφες ζώνες.

Ο χρόνος αντίληψης A, λαμβάνεται ίσος με 10 min για σενάρια νύκτας και 5 min για σενάρια ημέρας. Ο χρόνος (E+L) υπολογίζεται ξεχωριστά με βάση:

- Τα αποτελέσματα δοκιμών στη θάλασσα (sea trials) σε παρόμοια πλοία και συστήματα
- Στοιχεία που δίνονται από τους κατασκευαστές των συστημάτων αυτών.

Στην περίπτωση που τα δεδομένα αυτά δεν είναι διαθέσιμα, ο χρόνος (E+L) μπορεί να ληφθεί ίσος με 30 min.

Οι βασικές υποθέσεις στις οποίες στηρίζεται η απλή μέθοδος είναι οι ακόλουθες:

- 1) Οι επιβάτες και το πλήρωμα θα εκκινήσουν την ίδια χρονική στιγμή και δεν θα εμποδίζουν ο ένας τον άλλο καθ'όλη τη διάρκεια της διαδικασίας διαφυγής.
- 2) Οι επιβάτες και το πλήρωμα θα διαφύγουν μέσω της κύριας οδού διαφυγής, όπως αυτή προδιαγράφεται στον κανονισμό II-2/13 της SOLAS.
- 3) Η ταχύτητα κίνησης εξαρτάται αποκλειστικά από την πυκνότητα των επιβατών στον χώρο, θεωρώντας ότι η ροή είναι προς την κατεύθυνση της κύριας οδού διαφυγής και δεν προσπερνά ο ένας τον άλλο.
- 4) Υπάρχει πλήρης διαθεσιμότητα των μέσων διαφυγής.
- 5) Τα άτομα κινούνται ανεμπόδιστα.
- 6) Οι επιπτώσεις στην ταχύτητα της διαφυγής λόγω της κίνησης του πλοίου, της ηλικίας και της κινητικής ικανότητας των επιβατών, της μη διαθεσιμότητας κάποιων διαδρόμων και της περιορισμένης ορατότητας λόγω του καπνού λαμβάνονται υπόψη υπό μορφή ενός διορθωτικού συντελεστή και ενός συντελεστή ασφαλείας. Ο συντελεστής ασφαλείας λαμβάνει την τιμή 1.25.

Σύμφωνα με τα παραπάνω η απλή μέθοδος χρησιμοποιεί μια μακροσκοπική προσέγγιση, όπου οι οδοί διαφυγής μοντελοποιούνται σαν ένα υδραυλικό σύστημα όπου οι διάδρομοι και οι σκάλες, οι πόρτες και οι κοινόχρηστοι χώροι παίζουν αντίστοιχα το ρόλο των αγωγών, των βαλβίδων και των δεξαμενών.

Τα σενάρια που θα πρέπει να εξεταστούν κατά την χρήση της μεθόδου, είναι τα ακόλουθα:

- *Case 1 (primary evacuation case, day)*: πρόκειται για το σενάριο ημέρας όπως αυτό ορίζεται στον κώδικα FSS.
- *Case 2 (primary evacuation case, night)*: πρόκειται αντίστοιχα για το σενάριο νύχτας του κώδικα FSS.
- *Case 3 (secondary evacuation case, day)*: εδώ εξετάζεται μόνο η κατακόρυφη ζώνη στην οποία είχαμε τους μεγαλύτερους χρόνους κίνησης κατά την ανάλυση του σεναρίου ημέρας και χρησιμοποιούνται τα ίδια δημογραφικά χαρακτηριστικά με αυτό.
- *Case 4 (secondary evacuation case, night)*: αντίστοιχα με το case 3 για σενάριο νύχτας.

Στα σενάρια 3 και 4 μπορούν να προστεθούν, κατά την κρίση του μελετητή, άλλα δυο εναλλακτικά σενάρια:

- *Alternative 1*: το κλιμακοστάσιο με την μεγαλύτερη χρήση κατά την εξέταση των δυο δευτερευόντων σεναρίων θεωρείται μη διαθέσιμο.
- *Alternative 2*: το 50% των ατόμων που βρίσκονταν σε κάποια από τις γειτνιάζουσες κατακόρυφες ζώνες αναγκάζεται να διέλθει μέσω της κύριας ζώνης που εξετάζεται στα σενάρια 3 και 4.

Στην ίδια παράγραφο τονίζεται επίσης ότι ο συνολικός αριθμός των επιβατών που λαμβάνει υπόψη ο μελετητής κατά την ανάλυση δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των επιβατών που έχει πιστοποιηθεί να μεταφέρει το πλοίο. Επίσης, δίνεται η ελευθερία στον μελετητή να «τρέξει» την ανάλυση και για όποια άλλα σενάρια κρίνει αυτός ότι πρέπει να εξεταστούν.

Αρχικά υπολογίζεται ο χρόνος κίνησης t_i για κάθε διαδρομή διαφυγής, ο οποίος εξαρτάται από την ταχύτητα των επιβατών και την μέγιστη επιτρεπόμενη ροή ατόμων επάνω στην συγκεκριμένη διαδρομή, η οποία με τη σειρά της υπολογίζεται με βάση το πλάτος σε κάθε σημείο της διαδρομής. Η σχέση της πυκνότητας επιβατών με την ταχύτητα και την μέγιστη ροή δίνεται μέσω πίνακα, στον οποίο δίνονται κάποιες τυπικές τιμές για σκάλες και διαδρόμους που έχουν ληφθεί από σχετική βιβλιογραφία για κτίρια (οι ενδιάμεσες τιμές λαμβάνονται μέσω γραμμικής παρεμβολής). Τελικώς, ο χρόνος T λαμβάνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$T = (\gamma + \delta)t_i$$

όπου:

t_i : ο μεγαλύτερος χρόνος από όλες τις διαδρομές διαφυγής

γ : διορθωτικός συντελεστής που λαμβάνεται ίσος με 2 για τα βασικά σενάρια (cases 1&2) και με 1.3 για τα δευτερεύοντα σενάρια (cases 3&4).

δ : διορθωτικός συντελεστής για την κίνηση αντίθετα στη ροπή (counterflow), ο οποίος ισούται με 0.3.

Όσον αφορά τον εντοπισμό των σημείων συμφόρησης, που αποτελεί τον δεύτερο σκοπό της ανάλυσης της διαδικασίας διαφυγής, αυτή εντοπίζεται με βάση δυο παράγοντες:

- 1) Την μέγιστη πυκνότητα επιβατών, με κρίσιμη τιμή 3.2 persons/m².
- 2) Την διαφορά εισερχόμενης και εξερχόμενης ροής στα σημεία αλλαγής (transition points) των διαδρομών διαφυγής, δηλαδή τις πόρτες και τις εισόδους και εξόδους κλιμακοστασίων: αν σε οποιοδήποτε transition point η εισερχόμενη ροή είναι μεγαλύτερη από την εξερχόμενη, θεωρείται ότι σχηματίζεται ουρά.

2.5.2 Σύνθετη μέθοδος

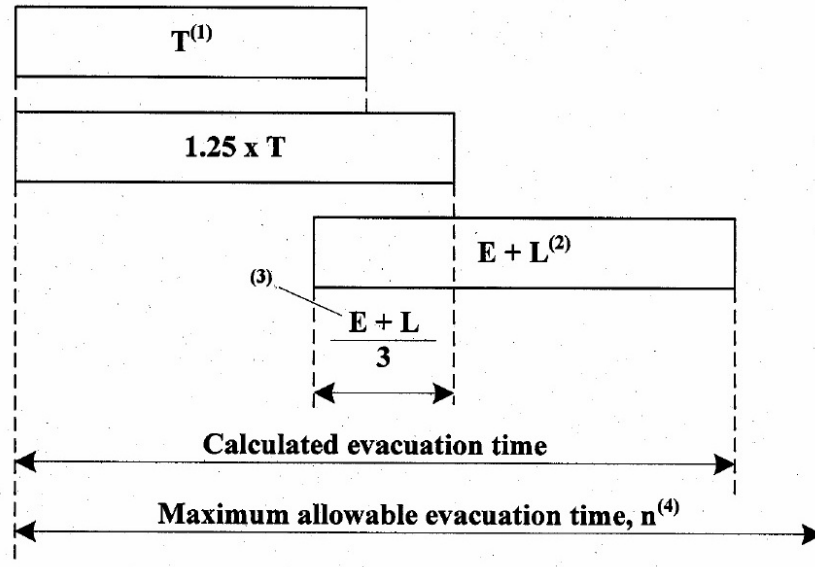
Η σύνθετη μέθοδος έχει τους ίδιους στόχους με την απλή μέθοδο, δηλαδή τον υπολογισμό του συνολικού χρόνου της διαδικασίας και τον εντοπισμό των σημείων ή των χώρων που δημιουργείται συμφόρηση, ουρές και συνεπακόλουθες καθυστερήσεις. Ωστόσο, διαφέρει σημαντικά από αυτήν λόγω του γεγονότος ότι χρησιμοποιεί *μικροσκοπική* (microscopic) προσέγγιση, δηλαδή τα άτομα έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά και αναπαριστώνται μεμονωμένα.

Οι βασικές υποθέσεις εφαρμογής της σύνθετης μεθόδου είναι οι ακόλουθες:

- 1) Οι επιβάτες και το πλήρωμα αναπαρίστανται ως μεμονωμένα άτομα με διακριτές ικανότητες και χρόνους αντίδρασης.
- 2) Οι επιβάτες και το πλήρωμα θα διαφύγουν μέσω των κύριων οδών διαφυγής, όπως αυτές προδιαγράφονται στον κανονισμό II-2/13 της SOLAS.
- 3) Ο συνολικός αριθμός των επιβατών και η κατανομή τους προσδιορίζεται με βάση το κεφάλαιο 13 του κώδικα FSS.
- 4) Υπάρχει πλήρης διαθεσιμότητα των μέσων διαφυγής, εκτός και αν ορίζεται διαφορετικά.
- 5) Το πλήρωμα θα βρίσκεται άμεσα στους χώρους ευθύνης του ώστε να βοηθήσει τους επιβάτες.
- 6) Οι επιβάτες θα ακολουθήσουν το σύστημα σήμανσης και τις οδηγίες του πληρώματος.
- 7) Ο καπνός, η θερμότητα και οι τοξικές εκλύσεις σε περίπτωση πυρκαγιάς θεωρείται πως δεν επηρεάζουν την συμπεριφορά του πληρώματος και των επιβατών.
- 8) Η ομαδική συμπεριφορά δεν λαμβάνεται υπόψη στην ανάλυση.
- 9) Η κίνηση και η κλίση του πλοίου δεν λαμβάνονται υπόψη.
- 10) Εισάγεται ένας συντελεστής ασφαλείας ίσος με 1.25 προκειμένου να αντιμετωπιστούν αφενός οι παραπάνω απλοποιήσεις, αφετέρου ο περιορισμένος αριθμός των υπό εξέταση σεναρίων (benchmark scenarios).

Όσον αφορά τον υπολογισμό του συνολικού χρόνου της διαδικασίας, υπολογίζεται εδώ από την ακόλουθη σχέση:

$$1.25T + 2/3(E + L) \leq n$$



- (1) calculated as in the appendix to the Interim Guidelines
- (2) maximum 30 min in compliance with SOLAS regulation III/21.1.4
- (3) overlap time = $1/3 (E+L)$
- (4) values of n (min) provided in paragraph 3.5.2

Εικόνα 2.5.2.1: κατάτμηση χρόνου ολοκλήρωσης διαδικασίας σύμφωνα με την σύνθετη μέθοδο της οδηγίας MSC.1/Circ.1238

Η κύρια διαφορά όσον αφορά τους χρόνους σε σχέση με την απλή μέθοδο είναι ότι ο χρόνος αντίδρασης (εδώ response time) περιέχεται στον χρόνο κίνησης T και μάλιστα λαμβάνεται από ειδικές στατιστικές κατανομές για ημέρα και νύκτα, οι οποίες έχουν προκύψει μετά από ασκήσεις ετοιμότητας σε επιβατηγά πλοία.

Όπως και στην απλή μέθοδο, το διάστημα (E+L) υπολογίζεται με βάση στατιστικά στοιχεία από παρόμοια πλοία και από δεδομένα που παρέχει ο κατασκευαστής των διάφορων συστημάτων. Εάν αυτά δεν είναι διαθέσιμα, ο χρόνος αυτός λαμβάνεται ίσος με 30 min. Το ίδιο ισχύει και για τον μέγιστο χρόνο, δηλαδή $n = 60$ min για πλοία ro-ro και όλα τα υπόλοιπα επιβατηγά με λιγότερες από τρεις κύριες κατακόρυφες ζώνες, και $n = 80$ min για όλα τα υπόλοιπα επιβατηγά πλοία με τρεις ή περισσότερες κύριες κατακόρυφες ζώνες.

Οι επιβάτες εδώ χωρίζονται σε 12 κατηγορίες:

- 1) με βάση το φύλο, σε άνδρες και γυναίκες
- 2) με βάση την ηλικία, σε κάτω των 30 ετών, μεταξύ 30 και 50 ετών, και άνω των 50 ετών
- 3) με βάση την σωματική ικανότητα σε πλήρως ικανούς, με κινητικά προβλήματα κατηγορίας 1 και κινητικά προβλήματα κατηγορίας 2

4) με βάση τον ρόλο τους σε επιβάτες και πλήρωμα

Η ανωτέρω κατηγοριοποίηση επηρεάζει τους χρόνους απόκρισης, τις ταχύτητες κίνησής τους και την διαδρομή τους στο χώρο. Πιο συγκεκριμένα, η ταχύτητα προκύπτει μέσω ομοιόμορφης κατανομής μεταξύ τιμών που λαμβάνονται από σχετικό πίνακα για κάθε κατηγορία επιβατών, ενώ όσον αφορά τον χρόνο απόκρισης και τη διαδρομή, το πλήρωμα εκκινεί τη στιγμή 0 και ακολουθεί προκαθορισμένες διαδρομές προς συγκεκριμένους χώρους ευθύνης.

Η κατανομή των επιβατών στον χώρο γίνεται και εδώ με βάση τα βασικά σενάρια του κώδικα FSS, ελαφρώς όμως τροποποιημένα. Τα σενάρια αυτά είναι τα ακόλουθα:

- Case 1 (βασικό σενάριο νύχτας)

Σύμφωνα με το σενάριο αυτό, τα 2/3 των μελών του πληρώματος βρίσκονται στις καμπίνες τους. Το υπόλοιπο 1/3 κατανέμεται ως εξής:

- 1) το 50% αυτών βρίσκονται την χρονική στιγμή 0 στους χώρους υπηρεσίας (service spaces) και συμπεριφέρονται ως επιβάτες.
- 2) το 25% βρίσκεται στους σταθμούς ανάγκης (emergency stations) και δεν λαμβάνεται υπόψη στην προσομοίωση.
- 3) το υπόλοιπο 25% βρίσκεται στους σταθμούς συγκέντρωσης και ακολούθως μεταβαίνει στην πιο απομακρυσμένη από τον σταθμό καμπίνα επιβατών, κινούμενο με κατεύθυνση αντίθετη από αυτή της ροής των επιβατών. Όταν προσεγγίσει την καμπίνα αυτή, σταματά να λαμβάνει μέρος στην προσομοίωση.

- Case 2 (βασικό σενάριο ημέρας)

Στο σενάριο αυτό, οι κοινόχρηστοι χώροι καταλαμβάνονται σε ποσοστό 75% της συνολικής χωρητικότητάς τους από επιβάτες. Όσον αφορά το πλήρωμα:

- 1) το 1/3 θα βρίσκονται στις καμπίνες και θα συμπεριφέρονται σαν επιβάτες, με χρόνους απόκρισης όμως και ταχύτητες κίνησης πληρώματος
- 2) το 1/3 θα βρίσκονται στους κοινόχρηστους χώρους και θα συμπεριφερθούν με παρόμοιο τρόπο
- 3) το υπόλοιπο 1/3 κατανέμεται και συμπεριφέρεται όπως στο Case 1.

- Cases 3 & 4 (δευτερεύοντα σενάρια νύχτας και ημέρας)

Πρόκειται για τα ίδια σενάρια, μαζί με τις παραλλαγές τους, όπως στην απλή μέθοδο.

Για τον υπολογισμό του χρόνου T ορίζεται ότι θα πρέπει να γίνουν τουλάχιστον 50 επαναλήψεις της προσομοίωσης για κάθε ένα από τα 4 σενάρια. Οι προσομοιώσεις αυτές θα πρέπει να αποτελούνται από τουλάχιστον 10 διαφορετικούς πληθυσμούς που έχουν δημιουργηθεί σύμφωνα με μια αρχική κατανομή που μας δίνει η Οδηγία. Αρχικά η προσομοίωση επαναλαμβάνεται 4 φορές με τον ίδιο πληθυσμό και αν τα αποτελέσματα είναι παραπλήσια, δύναται ο μελετητής να προχωρήσει σε 50 επαναλήψεις συνολικά και για τα τέσσερα σενάρια, με διαφορετικό όμως πληθυσμό κάθε φορά. Ο χρόνος κίνησης t_i για κάθε ένα από τα βασικά σενάρια θεωρείται αυτός που αντιστοιχεί στο 95% των μεγαλύτερων χρόνων που υπολογίστηκαν σε όλες τις προσομοιώσεις του συγκεκριμένου σεναρίου. Ακολούθως, συγκρίνονται οι τέσσερις χρόνοι t_i και ως χρόνος κίνησης T λαμβάνεται ο μεγαλύτερος εξ αυτών.

3. ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΙΑΦΥΓΗΣ

3.1 Ορισμός μοντέλων διαφυγής

Ένα μοντέλο εγκατάλειψης ορίζεται ως ένα σύστημα ή μια μεθοδολογία που προσομοιώνει και αξιολογεί την επίδραση των διαφόρων παραγόντων που υπεισέρχονται στην διαδικασία εγκατάλειψης ενός χώρου (Park, J.H. et al., 2011). Οι Gwynne και Galea έχουν χωρίσει ονομαστικά τους παράγοντες αυτούς σε τέσσερις κατηγορίες: διάταξη, περιβάλλον, διαδικασίες και συμπεριφορά.

- **Διάταξη του χώρου:** περιλαμβάνει την επίδραση της «γεωγραφίας» του υπό μελέτην χώρου (θέση και πλάτος εξόδων, συνδεόμενα διαμερίσματα, εμπόδια κλπ.) στην συμπεριφορά των ενοίκων ή επιβατών.
- **Διαδικασίες σχετικές με την εγκατάλειψη:** περιλαμβάνει την οικειότητα των ενοίκων με τον χώρο, την εκπαίδευση και τις διάφορες κινήσεις του προσωπικού ή πληρώματος και την γνώση των επιβατών ως προς την θέση των εξόδων.
- **Περιβάλλον εντός του χώρου:** περιλαμβάνει την επίδραση της θερμότητας, του καπνού και των τοξικών εκλύσεων στην ικανότητα των επιβατών να προσανατολιστούν στο χώρο και να λάβουν λογικές αποφάσεις.
- **Συμπεριφορά:** περιλαμβάνει την ταυτόχρονη επίδραση όλων των προηγούμενων παραγόντων, λαμβάνοντας υπόψη την συμπεριφορά των ατόμων ως ομάδα (π.χ. οικογένεια), την υιοθέτηση συγκεκριμένων ρόλων και καθηκόντων, την ατομική απόκριση σε κατάσταση ανάγκης, τις πιθανές ταχύτητες κίνησης και την ικανότητα των επιβατών και του πληρώματος να προβούν στις ενδεικνυόμενες πράξεις. (Gwynne & Galea, 1997)

3.2 Κατηγοριοποίηση μοντέλων διαφυγής κατά Gwynne et al.

Η κατηγοριοποίηση των μοντέλων διαφυγής γίνεται με βάση πέντε κριτήρια: την χρήση των μοντέλων, την αναπαράσταση του χώρου, την μοντελοποίηση της κίνησης των επιβατών, την κατανομή των διάφορων ιδιοτήτων των επιβατών και την μοντελοποίηση της συμπεριφοράς τους.

α) Χρήση των μοντέλων

Η χρήση των μοντέλων προσομοίωσης καθορίζει το είδος των εξαγόμενων δεδομένων της προσομοίωσης. Οι κατηγορίες με βάση αυτήν είναι τρεις:

- **Μοντέλα βελτιστοποίησης (optimization):** στα μοντέλα αυτά οι επιβάτες θεωρείται ότι εγκαταλείπουν τον χώρο με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη περιφερειακές δραστηριότητες ή δραστηριότητες που δεν έχουν σχέση με την διαδικασία εγκατάλειψης. Ως διαδρομές εγκατάλειψης χρησιμοποιούνται οι βέλτιστες δυνατές, και το ίδιο ισχύει για τις εξόδους και τα χαρακτηριστικά ροής των επιβατών. Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούνται συνήθως για περιπτώσεις με μεγάλο αριθμό επιβατών και τείνουν να προσδίδουν σε αυτούς παρόμοιες αντιδράσεις, αγνοώντας τις μεμονωμένες συμπεριφορές.
- **Μοντέλα προσομοίωσης (simulation):** σε αυτή την κατηγορία μοντέλων, τα διάφορα χαρακτηριστικά επιβατών και χώρου καθώς και οι παράγοντες που σχετίζονται με την διαδικασία εγκατάλειψης, μοντελοποιούνται όσο γίνεται πιο ρεαλιστικά. Ο σκοπός των μοντέλων είναι να εξαγουν ακριβή αποτελέσματα και να αποτυπώνουν επακριβώς τις διαδρομές που επιλέγονται και τις αποφάσεις των επιβατών κατά την εγκατάλειψη.
- **Μοντέλα για εκτίμηση ρίσκου (risk assessment):** το ενδιαφέρον εδώ εστιάζεται στην εκτίμηση των κινδύνων που σχετίζονται με την εγκατάλειψη ενός χώρου που οφείλεται σε φωτιά ή άλλα έκτακτα γεγονότα. Η προσομοίωση επαναλαμβάνεται αρκετές φορές, για διαφορετική διάταξη του χώρου και μέτρων αντιμετώπισης της πυρκαγιάς, έτσι ώστε να εξαχθούν στατιστικά σημαντικές αντιπροσωπευτικές κατανομές. (Gwynne, Galea, Owen, Lawrence, & Filippidis, 1999)

β) Αναπαράσταση χώρου

Ο τρόπος αναπαράστασης του χώρου είναι πολύ σημαντικός, καθώς ορίζει την μοντελοποίηση της κίνησης των επιβατών και σε μεγάλο βαθμό την πολυπλοκότητα και την ακρίβεια του μοντέλου. Οι κατηγορίες είναι τέσσερις:

- **Μοντέλα κυψελών (fine ή grid network models):** ο υπό μελέτη χώρος αναπαριστάται από μια σειρά «κυψελών». Το σχήμα και το μέγεθος των κυψελών αυτών αλλάζει από μοντέλο σε μοντέλο, στα περισσότερα όμως έχει συνήθως επιφάνεια ίση με αυτή που καταλαμβάνει ένα ανθρώπινο σώμα και σχήμα πολυγωνικό. Τα πλεονεκτήματα των μοντέλων αυτών είναι ότι δίνουν την δυνατότητα της επακριβούς αναπαράστασης του χώρου (συμπεριλαμβάνοντας τυχόν εμπόδια εντός αυτού) καθώς και τον εντοπισμό της θέσης του κάθε επιβάτη ανά πάσα στιγμή, καθώς αυτός κινείται από κυψέλη σε κυψέλη. Στα μειονεκτήματα περιλαμβάνονται η περιπλοκότητα (ένας μεγάλος χώρος αποτελούμενος από πολλά διαμερίσματα απαιτεί την δημιουργία εκατοντάδων έως χιλιάδων «κυψελών»), καθώς και η μεγάλη υπολογιστική ισχύ που χρειάζεται έτσι ώστε να τρέξει η προσομοίωση.
- **Μοντέλα αδρών δικτύων (coarse network models):** τα διάφορα διαμερίσματα του υπό μελέτη χώρου αναπαρίστανται ως κόμβοι που συνδέονται με ακμές, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η ακριβής γεωμετρία τους. Στα μοντέλα αυτής της κατηγορίας, οι επιβάτες κινούνται από τον ένα κόμβο στον άλλο (σε αντίθεση με την προηγούμενη κατηγορία, όπου κινούνταν από τη μια κυψέλη σε διπλανή της) και η θέση τους ανά πάσα στιγμή αναφέρεται σε πιο διαμέρισμα-κόμβο βρίσκονται. Τα μοντέλα αυτά είναι λιγότερο λεπτομερή από τα fine network, καθώς δεν μπορούν να αναπαραστήσουν επακριβώς τον χώρο, την κίνηση των επιβατών και την συμπεριφορά τους σε περίπτωση ουράς, αυτό ωστόσο τους προσδίδει ευκολία στη χρήση και μικρότερη απαίτηση σε υπολογιστική ισχύ.
- **Μοντέλα συνεχών δικτύων (continuous network models):** εδώ ο χώρος αναπαριστάται από ένα δισδιάστατο συνεχές επίπεδο, με τους επιβάτες να κινούνται από το ένα σημείο του επιπέδου στο άλλο με βάση διάφορους περιορισμούς όπως η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των επιβατών. Τα continuous network μοντέλα είναι καινούργια εξέλιξη στον τομέα της μοντελοποίησης εγκατάλειψης και για αυτό τον λόγο η χρήση τους είναι προς το παρόν αρκετά περιορισμένη.
- **Μεικτά ή υβριδικά μοντέλα (integrated network models):** τα μοντέλα αυτά συνδυάζουν fine network για τον χώρο στον οποίο εξελίσσεται η πυρκαγιά και coarse network για τους υπόλοιπους χώρους της κατασκευής. (Zhang X., Li X., Hadjisophocleous G., 2013) (Gwynne, Galea, Owen, Lawrence, & Filippidis, 1999)

γ) Κίνηση επιβατών

Εδώ οι κατηγορίες είναι τρεις:

- **Μικροσκοπικά μοντέλα (microscopic models):** στα μοντέλα αυτά ο κάθε επιβάτης αναπαρίσταται ξεχωριστά. Η βασική ιδέα είναι ότι εκκινεί από την αρχική του θέση και κινείται προς την έξοδο είτε βρίσκοντας μόνος του την ιδανική διαδρομή είτε υποβοηθούμενος (από τις φωτεινές ενδείξεις ή το πλήρωμα).
- **Μακροσκοπικά μοντέλα (macroscopic models):** οι επιβάτες εδώ αναπαρίστανται ως ομάδα που κινείται με παρόμοιο τρόπο στον χώρο. Τα μοντέλα αυτά έχουν αναπτυχθεί με βάση την αναλογία με την ροή υγρών σε δίκτυα. Είναι κατά βάση στατικά μοντέλα, με αποτέλεσμα να καθίστανται ανεπαρκή σε περιπτώσεις όπου οι διάφοροι παράγοντες (π.χ. ορατότητα) εξελίσσονται δυναμικά. Το πλεονέκτημά τους σε σχέση με τα μικροσκοπικά μοντέλα είναι η σαφώς μικρότερη απαίτηση σε υπολογιστική ισχύ.
- **Μεσοσκοπικά μοντέλα (mesoscopic models):** πρόκειται για συνδυασμό των δυο παραπάνω μοντέλων, δηλαδή ομαδοποίηση των επιβατών (π.χ. πλήρωμα-επιβάτες) και κίνησή τους στο χώρο μεμονωμένα αλλά με συγκεκριμένους κανόνες και περιορισμούς για την κάθε ομάδα. (De Silva, Pidd, & Eglesse, 1996) (Lee, Kim, Park, & Park, 2003)

δ) Περιγραφή πληθυσμού

Οι διάφορες ιδιότητες των επιβατών, όπως το φύλο ή η ηλικία, είναι πολύ σημαντικές στον καθορισμό της κίνησης και της συμπεριφοράς τους. Εδώ περιλαμβάνονται δυο κατηγορίες:

- **Μοντέλα μεμονωμένης προοπτικής (individual perspective models):** ο πληθυσμός των επιβατών περιγράφεται ως ένα σύνολο μεμονωμένων ατόμων με διαφορετικά χαρακτηριστικά, η συμπεριφορά των οποίων κατά την εγκατάλειψη καθορίζεται εν μέρει από αυτά. Αυτός ο τρόπος κατανομής δεν αποκλείει την συμπεριφορά των επιβατών ως ομάδα.
- **Μοντέλα γενικής προοπτικής (global perspective models):** εδώ οι επιβάτες περιγράφονται ως ένας ομοιογενής πληθυσμός με ίδια χαρακτηριστικά. Τα μοντέλα αυτά παρουσιάζουν τις λεπτομέρειες της εγκατάλειψης όχι με βάση το ποιος αλλά το πόσοι επιβάτες έχουν διαφύγει μια συγκεκριμένη στιγμή. Παρότι προσφέρουν απλότητα και μικρούς χρόνους τρεξίματος, μειονεκτούν στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων που εξάγουν. (Gwynne, Galea, Owen, Lawrence, & Filippidis, 1999)

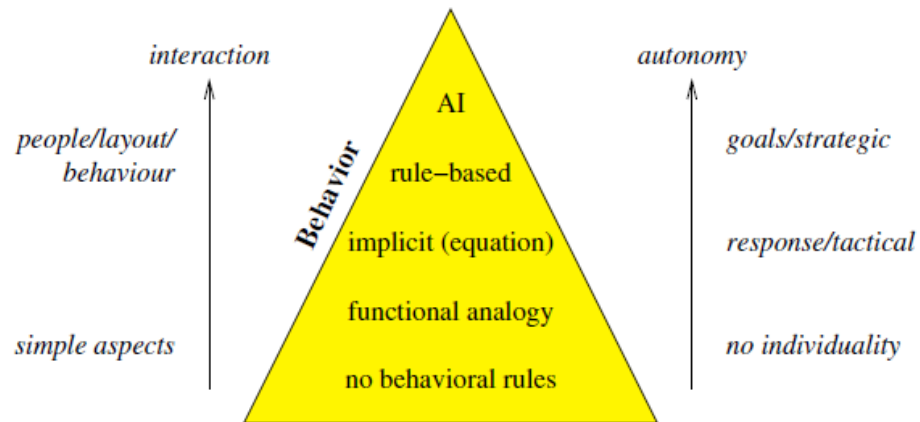
ε) Μοντελοποίηση συμπεριφοράς

Η συμπεριφορά των επιβατών είναι ίσως ο πιο σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την διαδικασία εγκατάλειψης ενός πλοίου και ταυτόχρονα ο πιο δύσκολος να μοντελοποιηθεί. Οι παράγοντες που την επηρεάζουν είναι είτε ψυχολογικοί (αντίδραση του ατόμου σε σχέση με τις πληροφορίες που έχει στη διάθεσή του), κοινωνιολογικοί (αντίδραση που οφείλεται στην επαφή του με άλλους επιβάτες) και φυσιολογικοί (αντίδραση που οφείλεται στις συνθήκες εντός του χώρου). Τα μοντέλα εδώ χωρίζονται σε πέντε κατηγορίες:

- **Συστήματα χωρίς κανόνες (no behavioral rules system):** τα μοντέλα αυτά δεν χρησιμοποιούν κάποιους συγκεκριμένους κανόνες ή πρότυπα συμπεριφοράς. Οι αποφάσεις των επιβατών, όσον αφορά την επιλογή διαδρομής και εξόδου, λαμβάνονται με βάση την γεωμετρία του χώρου και τις συνθήκες εντός αυτού.
- **Συστήματα συναρτησιακής αναλογίας (functional analogy behavioral rules system):** εδώ η συμπεριφορά των επιβατών καθορίζεται πλήρως από μια ή περισσότερες συναρτήσεις. Οι συναρτήσεις αυτές δεν προκύπτουν μόνο από την μελέτη εγκατάλειψης σε πραγματικές συνθήκες, αλλά και από έρευνες σε άλλους τομείς με τους οποίους υπάρχει φαινομενολογική αναλογία, όπως για παράδειγμα η ρευστομηχανική. Η ντετερμινιστική λογική αυτής της κατηγορίας μοντέλων (λόγω της καθολικής εφαρμογής των ίδιων σχέσεων σε όλους τους επιβάτες) τα καθιστά μάλλον προβληματικά σε μεθοδολογίες όπου το κάθε άτομο αναπαριστάται ξεχωριστά.
- **Έμμεσα συστήματα (implicit behavioral rules system):** η συμπεριφορά εδώ δεν καθορίζεται από κάποιους κανόνες ή συναρτήσεις, αλλά θεωρείται πως μπορεί να αναπαρασταθεί εμμέσως από σύνθετες φυσικές μεθόδους. Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούν κυρίως δεδομένα από πραγματικά περιστατικά, συμπεριλαμβανοντας στην μεθοδολογία ψυχολογικούς και κοινωνιολογικούς παράγοντες. Κύριο μειονέκτημά είναι ότι βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στην ακρίβεια αυτών των δεδομένων.
- **Συστήματα βασισμένα σε κανόνες (rule based behavioral system):** η συμπεριφορά των επιβατών μοντελοποιείται με βάση κανόνες προκαθορισμένους από τον χρήστη. Οι κανόνες αυτοί ενεργοποιούνται κατά περίπτωση (π.χ. το επίπεδο της ορατότητας, τον αριθμό των επιβατών σε έναν συγκεκριμένο χώρο κλπ.). Η συγκεκριμένη μεθοδολογία χρησιμοποιείται κατά κόρον από τα μικροσκοπικά μοντέλα. Μειονέκτημά τους είναι και εδώ η ντετερμινιστική φύση της μεθοδολογίας, καθώς επιβάτες που υπόκεινται στις ίδιες συνθήκες (και άρα στους ίδιους κανόνες συμπεριφοράς) λαμβάνουν τις ίδιες αποφάσεις.
- **Συστήματα τεχνητής νοημοσύνης (artificial intelligence based behavioral system):** για την αντιμετώπιση των προαναφερθέντων μειονεκτημάτων, έχουν αναπτυχθεί εσχάτως μεθοδολογίες που χρησιμοποιούν τεχνητή νοημοσύνη. Εδώ η συμπεριφορά των επιβατών μιμείται κατά το δυνατόν τη συμπεριφορά σε πραγματικές συνθήκες. Η λογική αυτή επιτρέπει μεν την ρεαλιστική μεμονωμένη αναπαράσταση των επιβατών, αφαιρεί ωστόσο

από τον χρήστη την δυνατότητα να καθορίσει ο ίδιος κατά περίπτωση την συμπεριφορά τους. (Gwynne, Galea, Owen, Lawrence, & Filippidis, 1999)

Στο παρακάτω σχήμα, οι Klüpfel, Schreckenberg και Meyer-König μας παρουσιάζουν τις δυνατότητες των παραπάνω κατηγοριών μοντέλων όσον αφορά την προσομοίωση της μεμονωμένης ανθρώπινης συμπεριφοράς (autonomy) και την αλληλεπίδραση μεταξύ των ατόμων.



Εικόνα 3.2.1: μοντελοποίηση συμπεριφοράς ανά τύπο μοντέλου (Klüpfel, Schreckenberg, & Meyer-König, Models for crowd movement and egress simulation, 2005)

3.3 Κατηγοριοποίηση μοντέλων διαφυγής κατά Xiaoping, Tingkuan & Mengting

Οι Z. Xiaoping, Z. Tingkuan και L. Mengting κατηγοριοποιούν τα μοντέλα με βάση ποια από μεθοδολογική προσέγγιση ακολουθούν. Οι πλέον χρησιμοποιούμενες προσεγγίσεις είναι:

- **Μοντέλα κυτταρικών αυτόματων (cellular automata models):** τα *κυτταρικά αυτόματα* επινοήθηκαν από τον μαθηματικό John Von Neumann την δεκαετία του 1940 και έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς για την μελέτη δυναμικών φαινομένων και ιδιαίτερα για την συμπεριφορά ζώντων οργανισμών. Αποτελούνται από ένα πλέγμα «κυττάρων» ή «κυψελών» οι οποίες περιλαμβάνουν κάποιες μεταβλητές με διακριτές τιμές (π.χ. κατειλημμένο ή όχι) που εξαρτώνται από τις τιμές των αντίστοιχων μεταβλητών στα διπλανά κύτταρα. Σε κάθε χρονικό βήμα οι τιμές των μεταβλητών αλλάζουν ταυτόχρονα σε όλα τα κύτταρα με βάση τις τιμές των διπλανών κυττάρων στο προηγούμενο χρονικό σημείο και ακολουθώντας ένα σύνολο καθολικών κανόνων. Τα κυτταρικά αυτόματα έχουν εφαρμοστεί ευρέως σε μοντέλα που μελετούν τόσο την αλληλεπίδραση ατόμου-περιβάλλοντος (π.χ. εμπόδια εντός του χώρου), όσο και ατόμου με άλλα άτομα που κινούνται στον ίδιο χώρο σε καταστάσεις κινδύνου και επείγουσας εγκατάλειψης μιας κατασκευής. Μια υποκατηγορία των κυτταρικών αυτόματων είναι τα *αυτόματα πλέγματος αερίου* (lattice gas models), στα οποία κάθε άτομο καταλαμβάνει ένα ολόκληρο κελί.
- **Μοντέλα κοινωνικών δυνάμεων (social force models):** τα μοντέλα αυτά βασίζονται στην θεωρία που έχουν αναπτύξει οι D. Helbing και P. Molnar, σύμφωνα με την οποία τα άτομα αναπαριστώνται ως σωματίδια που κινούνται ελεύθερα στον χώρο και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους περιγράφονται μέσω της νευτώνειας φυσικής. Οι γενικές αρχές που χρησιμοποιούν και οι οποίες αναπαριστώνται ως δυνάμεις που ασκούνται στο σωματίδιο-άτομο είναι: 1) το άτομο θέλει να προσεγγίσει ένα συγκεκριμένο σημείο στο χώρο, 2) προσπαθεί να διατηρήσει μια ελάχιστη απόσταση από τα άλλα άτομα, 3) προσπαθεί να διατηρήσει μια ελάχιστη απόσταση από εμπόδια, και 4) έλκεται από συγκεκριμένα άτομα (π.χ. μέλη της οικογένειάς του). Οι δυνάμεις αυτές συνθέτονται στη συνέχεια και η συνισταμένη που προκύπτει καθορίζει τόσο την κατεύθυνση όσο και την ταχύτητα του ατόμου. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια ραγδαία ανάπτυξη των μοντέλων αυτών για την μελέτη της διαφυγής από έναν χώρο.
- **Ρευστομηχανικά μοντέλα (fluid-dynamic models):** τα μοντέλα αυτά βασίζονται σε θεωρίες που διατυπώνουν πως οι κινήσεις ενός μεγάλου πλήθους ατόμων (μεγάλη τοπική πυκνότητα) που προσπαθεί να διαφύγει από έναν χώρο ή μια περιοχή παρουσιάζουν αναλογίες με την κίνηση ρευστών. Έτσι, χρησιμοποιώντας διαφορικές εξισώσεις από τον τομέα της ρευστομηχανικής και κυρίως τις εξισώσεις Navier-Stokes, έχουν καταφέρει να

περιγράψουν επιτυχώς φαινόμενα όπως τα bottlenecks, που παρατηρούνται σε σημεία όπου η διαδρομή διαφυγής στενεύει (π.χ. πόρτες ή στενούς διαδρόμους).

- **Μοντέλα αντιπροσώπων (agent-based models):** τα μοντέλα αυτά στηρίζονται στην ευρέως αποδεκτή θεωρία ότι η συμπεριφορά ενός πλήθους είναι αποτέλεσμα των επιμέρους συμπεριφορών και της αλληλεπίδρασης μεταξύ των μελών του. Εδώ, κάθε άτομο αναπαρίσταται ξεχωριστά από ένα αντίστοιχο ψηφιακό (agent) και οι διάφορες συμπεριφορές αλλά και αποφάσεις σχετικά με την διαφυγή καθορίζονται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κάθε ατόμου, καθώς και από ένα σετ κανόνων που διέπουν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ατόμων. Τα μοντέλα αυτής της κατηγορίας απαιτούν μεγάλη υπολογιστική ισχύ συγκριτικά με τα προαναφερθέντα μοντέλα, μειονέκτημα ωστόσο που υπερκεράζεται από την ρεαλιστικότητα των μοντέλων αυτών στην περιγραφή των σύνθετων φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά την διαφυγή ενός μεγάλου αριθμού ατόμων. Το γεγονός αυτό, καθώς και η δυνατότητα να συνδυαστούν με στοιχεία από cellular automata και social force μοντέλα, έχει καταστήσει τα agent-based μοντέλα τα πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενα.
- **Μοντέλα που χρησιμοποιούν την θεωρία παιγνίων (game theoretic models):** τα μοντέλα αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούν την θεωρία παιγνίων προκειμένου να μοντελοποιήσουν την συμπεριφορά του πλήθους. Εδώ, το μοντέλο αναγνωρίζει όλες τις διαθέσιμες επιλογές για όλα τα άτομα του πλήθους και τα «κέρδη» που έχουν από την κάθε μια. Ακολούθως, η επιλογή που θα κάνει κάθε άτομο είναι αυτή που θα του εξασφαλίσει το μέγιστο κέρδος (εν προκειμένω την ταχύτερη και πιο ασφαλή διαφυγή από τον κίνδυνο), το οποίο όμως θα εξαρτηθεί από τις αποφάσεις και των υπόλοιπων ατόμων. Εδώ υπάρχουν δυο υποκατηγορίες: τα *συνεργατικά* (cooperative) μοντέλα, όπου τα άτομα θεωρείται πως συνεργάζονται προκειμένου να μεγιστοποιήσουν το «κέρδος» τους, και τα *μη-συνεργατικά* (non-cooperative) μοντέλα, όπου τα άτομα ανταγωνίζονται μεταξύ τους. (Xiaoping, Tingkuan, & Mengting, 2009)

3.4 Υπάρχοντα μοντέλα

Τα τελευταία χρόνια έχει υπάρξει μεγάλο ενδιαφέρον για μοντέλα προσομοίωσης της διαδικασίας εγκατάλειψης πλοίου. Αρκετά ερευνητικά κέντρα αλλά και οι μεγάλοι νηογνώμονες, όπως ο Germanischer Lloyd και ο Det Norske Veritas, έχουν παρουσιάσει διάφορα εξειδικευμένα προγράμματα τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως από μελετητές, σχεδιαστές και ναυπηγεία. Τα πιο διαδεδομένα από αυτά είναι:

- το μοντέλο *Eni* των πανεπιστημίων Strathclyde και Γλασκώβης
- η οικογένεια μοντέλων Exodus του πανεπιστημίου Greenwich, μέλος της οποίας είναι το εξειδικευμένο maritimeExodus
- το μοντέλο AENEAS του Γερμανικού Νηογνώμονα
- το μοντέλο *BYPASS*, του γερμανικού πανεπιστημίου Gerhard-Mercator
- το μοντέλο *IMAX*

Ιδιαίτερη μνεία πρέπει να γίνει και για δυο μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί στην σχολή Ναυπηγών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου:

- το μοντέλο *EVDEMON*, των Α. Παπανικολάου και Ε. Μπουλουγούρη
- το μοντέλο *VELOS*, των Α. Γκίνη, Κ. Κώστα, Γ. Πολίτη και Π. Κακλή

3.4.1 Μοντέλο EVI

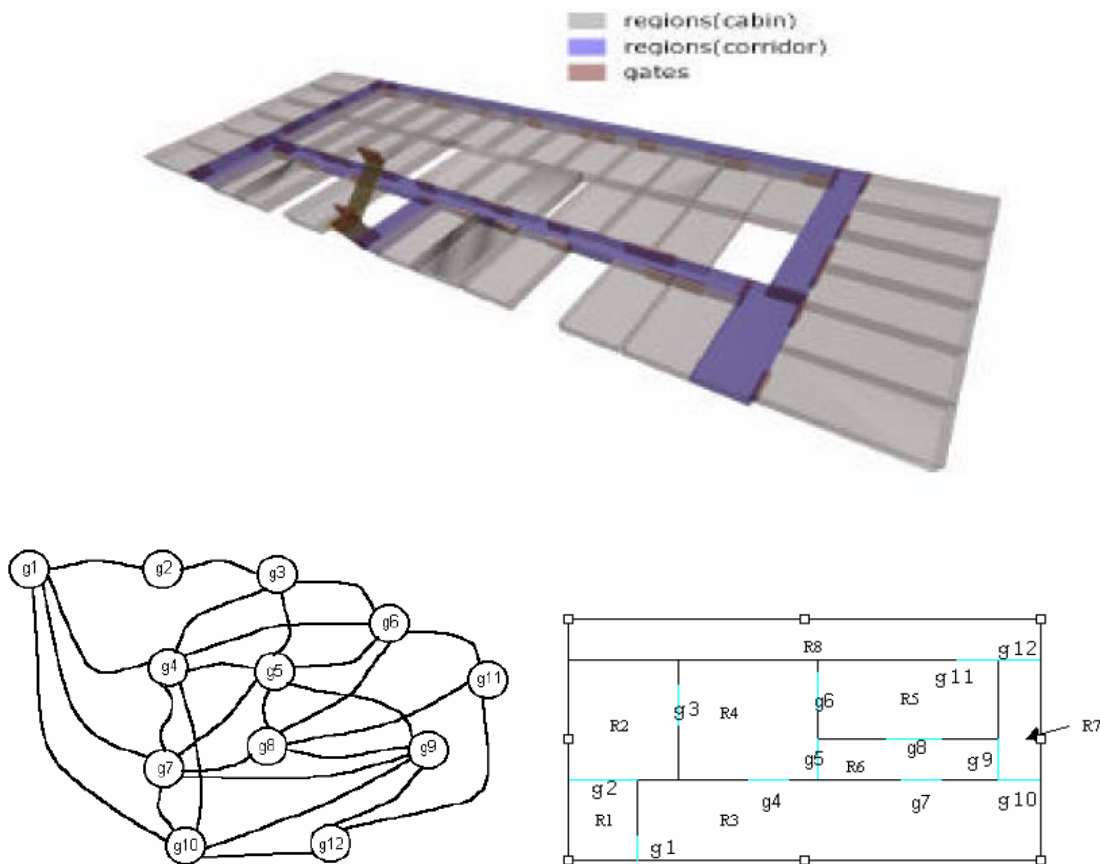
Το πρόγραμμα *EVI* (Evacuability Index) είναι ένα μοντέλο προσομοίωσης της διαδικασίας εγκατάλειψης επιβατηγών πλοίων που έχει αναπτυχθεί στο κοινό τμήμα Ναυπηγικής των Πανεπιστημίων του Strathclyde και της Γλασκώβης, στις αρχές της δεκαετίας του 2000. Πρόκειται για ένα μεσοσκοπικό μοντέλο, στο οποίο οι επιβάτες αναπαριστώνται μεμονωμένα (multi-agent), ωστόσο συμπεριφέρονται ως ομάδα με βάση συγκεκριμένους κανόνες. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται έχει αρκετές ομοιότητες αλλά και διαφορές με την προτεινόμενη από τον IMO, που περιγράψαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Οι κύριες διαφορές είναι οι εξής:

- Η χρονική στιγμή κατά την οποία οι επιβάτες και το πλήρωμα θα ξεκινήσουν την εκκένωση είναι διαφορετική για το κάθε άτομο, και προκύπτει ως τυχαία μεταβλητή από μια κατανομή που έχει ορίσει ο χρήστης.
- Η ταχύτητα κίνησης του κάθε ατόμου εξαρτάται από μια τοπική πυκνότητα, και όχι από την συνολική πυκνότητα του χώρου.
- Οι επιβάτες, υπό συγκεκριμένες συνθήκες, προσπερνούν ο ένας τον άλλο.

- Η αντίθετη ροή προσομοιώνεται επακριβώς, ενώ στην μεθοδολογία του IMO υπεισέρχεται ως συντελεστής με τιμή 0,3.
- Δεν λαμβάνονται υπόψη οι κινήσεις του πλοίου και η τυχόν ύπαρξη καπνού (στην μεθοδολογία του IMO υπεισέρχονται ως συντελεστής ασφαλείας με τιμή 2).

Μοντελοποίηση χώρου

Στο συγκεκριμένο μοντέλο τα διάφορα τμήματα στο εσωτερικό του πλοίου, όπως καμπίνες, δημόσιοι χώροι και διάδρομοι, αναπαρίστανται ως ξεχωριστά συνεχή επίπεδα, με δικό τους σύστημα αξόνων, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με πύλες (gates). Τα διαμερίσματα αυτά δημιουργούνται αυτόματα από το πρόγραμμα, αφού ο χρήστης εισάγει σε αυτό τον χώρο υπό μορφή αρχείου CAD. Ακολούθως, το πρόγραμμα δημιουργεί έναν γράφο καθώς και μια ψηφιακή τρισδιάστατη αναπαράσταση του χώρου.

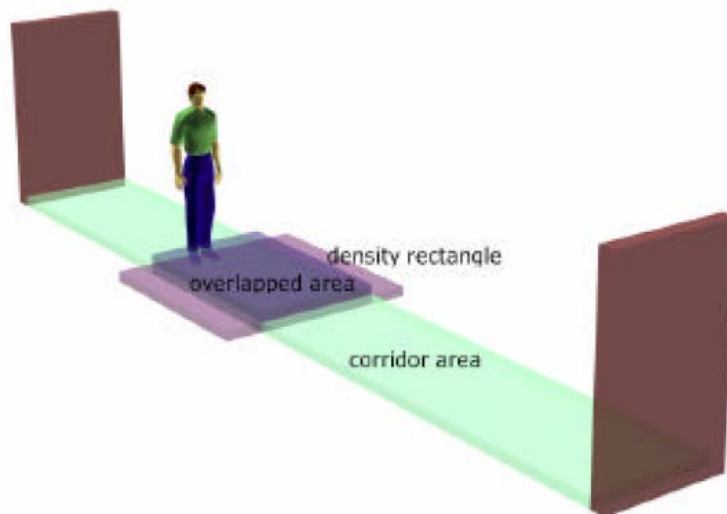


Εικόνα 3.4.1.1: αναπαράσταση χώρου στο μοντέλο EVI

Συμπεριφορά επιβατών

Όπως είπαμε και προηγουμένως, το *EVI* είναι ένα μεσοσκοπικό μοντέλο. Αυτό σημαίνει ότι, ενώ οι επιβάτες αναπαρίστανται ως μεμονωμένα άτομα (multi-agents), δύνανται να υιοθετήσουν, με βάση συγκεκριμένους κανόνες, ομαδικές συμπεριφορές. Κινούνται δηλαδή στον χώρο ως ομάδες ακολουθώντας όμως κάποιον επικεφαλής (π.χ. μια οικογένεια τον πατέρα, μια ομάδα επιβατών ένα μέλος του πληρώματος κλπ.). Αν για κάποιο λόγο υπάρξει απώλεια του επικεφαλής της ομάδας, αυτή ορίζει κάποιον άλλο και τον ακολουθεί. Η δημιουργία της ομάδας και η επιλογή του επικεφαλής της εξαρτάται από τα μεμονωμένα χαρακτηριστικά του κάθε ατόμου (ηλικία, φύλο, ικανότητα, σχέση με άλλους επιβάτες, ρόλος), τα οποία και δημιουργούνται από το πρόγραμμα με βάση συγκεκριμένες κατανομές.

Όσον αφορά την ταχύτητα των επιβατών, αυτή εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν παραπάνω, μια τοπική πυκνότητα (local density) και από την κλίση του πλοίου. Σε αντίθεση με την οδηγία του IMO, η οποία χρησιμοποιεί ως βάση υπολογισμού της ταχύτητας την συνολική πυκνότητα του κάθε χώρου, το *EVI* υπολογίζει την πυκνότητα σε μια τετράγωνη επιφάνεια με διαστάσεις 2,14x2,14 m η οποία βρίσκεται εμπρός από τον επιβάτη στην κατεύθυνση της κίνησής του. Οι τιμές που χρησιμοποιούνται για την ταχύτητα είναι οι ίδιες με την οδηγία του IMO. Η κλίση του πλοίου υπεισέρχεται στον υπολογισμό ως μια γραμμική μείωση της ταχύτητας με μέγιστη τιμή τις 20 μοίρες (οπότε και θεωρείται ότι η κίνηση γίνεται αδύνατη και επομένως η ταχύτητα λαμβάνει τιμή 0).



Εικόνα 3.4.1.2: προσδιορισμός πυκνότητας επιβατών στο μοντέλο *EVI*

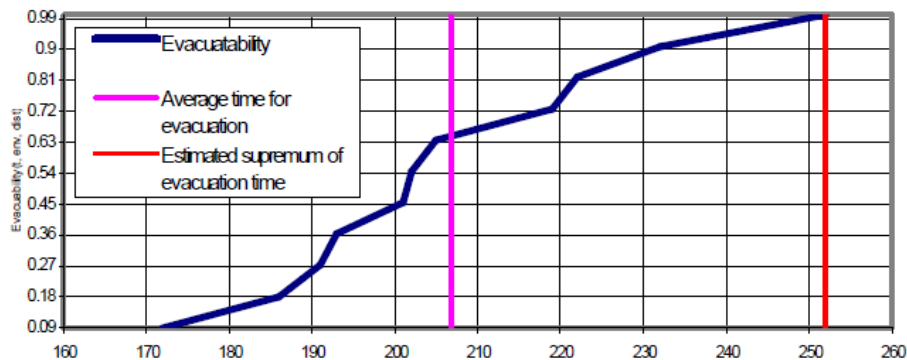
Για την επιλογή της διαδρομής και την συνολική απόσταση, η μεθοδολογία θεωρεί ότι ο κάθε επιβάτης θα ακολουθήσει την πιο σύντομη διαδρομή προς τον σταθμό συγκέντρωσης στον οποίο ανήκει με βάση την αρχική του θέση. Επίσης, στο εσωτερικό του κάθε μεμονωμένου

χώρου θα κινηθεί πάνω στην βέλτιστη από πλευράς απόστασης διαδρομή ανάμεσα στην πόρτα εισόδου και την πόρτα εξόδου (για παράδειγμα, σε έναν χώρο χωρίς εμπόδια θα ακολουθήσει την ευθεία που συνδέει τις δυο πόρτες).

Μορφή αποτελεσμάτων και κριτήρια ανάλυσης

Όπως προαναφέραμε, τα διάφορα χαρακτηριστικά των επιβατών αντιμετωπίζονται ως τυχαίες μεταβλητές που λαμβάνουν τιμές με βάση κατανομές ορισμένες από τον χρήστη. Οι συνδυασμοί των μεταβλητών αυτών είναι αυτοί που ορίζουν την συμπεριφορά τους και τις αποφάσεις τους κατά την διάρκεια της διαδικασίας εγκατάλειψης του πλοίου. Το μοντέλο Ενί «τρέχει» την προσομοίωση αρκετές φορές έτσι ώστε, με χρήση μεθόδων Monte Carlo, να προκύψει μια χαρακτηριστική κατανομή για τον χρόνο που απαιτείται ώστε όλοι οι επιβάτες να έχουν συγκεντρωθεί στους χώρους όπου βρίσκονται οι σωσίβιες λέμβοι και τα άλλα μέσα εγκατάλειψης.

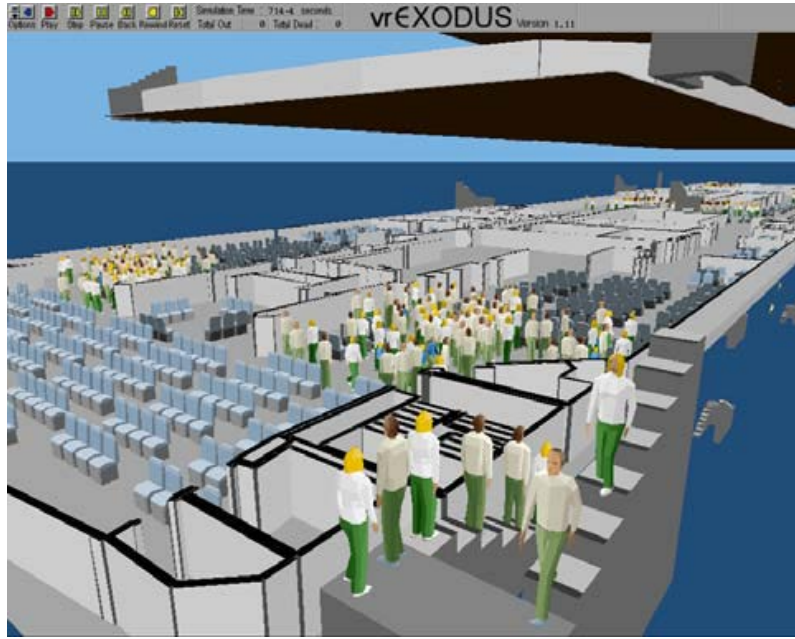
Σύμφωνα με την συγκεκριμένη μεθοδολογία, η εγκατάλειψη του πλοίου θα πρέπει να έχει ολοκληρωθεί σε 60 min στο 99% των προσομοιώσεων του μοντέλου.



Εικόνα 3.4.1.3: μορφή εξαγωγικών αποτελεσμάτων μοντέλου EVI

(Vassalos, Christiansen, Kim, Bole, & Majumder, 2002)_(Vassalos, Kim, Christiansen, & Majumder, 2002)

3.4.2 Μοντέλο Maritime Exodus

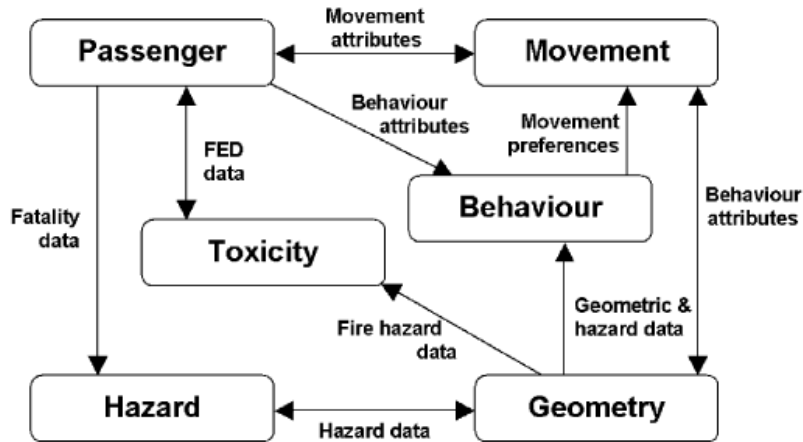


Εικόνα 3.4.2.1: 3-D αναπαράσταση επιβατών στο μοντέλο Maritime Exodus

Το μοντέλο *maritimeExodus* έχει αναπτυχθεί από το Fire Safety Engineering Group του Πανεπιστημίου του Greenwich και είναι μέρος μιας οικογένειας μοντέλων η οποία περιλαμβάνει το *buildingExodus* για κτίρια και το *airExodus* για αεροσκάφη. Όπως και στο μοντέλο EVI που περιγράψαμε παραπάνω, ο κάθε επιβάτης αναπαριστάται ξεχωριστά, με την συμπεριφορά του να καθορίζεται από παράγοντες όπως η ηλικία και το φύλο. Η κίνησή του προς τον χώρο συγκέντρωσης και εγκατάλειψης καταγράφεται και δύναται να αναπαρασταθεί σε τρισδιάστατο βίντεο μετά το πέρας της ανάλυσης. (Andrews, Casarosa, Pawling, Galea, Deere, & Lawrence, 2008)

Το μοντέλο *maritimeExodus* λαμβάνει υπόψη τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ ατόμων, ατόμων-πυρκαγιάς και ατόμων-κατασκευής. Προκειμένου να το επιτύχει, χρησιμοποιεί τέσσερα διαφορετικά rule-based υπομοντέλα, οι κανόνες των οποίων είναι σε μεγάλο βαθμό πιθανοθεωρητικής φύσης. Τα υπομοντέλα αυτά είναι:

- *Passenger* submodel
- *Geometry* submodel
- *Behavior* submodel
- *Toxicity* submodel
- Hazard submodel



Εικόνα 3.4.2.2: τα υπο-μοντέλα του maritimeExodus

Το υπομοντέλο *Passenger* περιγράφει τον επιβάτη, δίνοντάς του τιμές για τα διάφορα χαρακτηριστικά του όπως ID, ηλικία, φύλο, ικανότητα κίνησης και ρόλο. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι που καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την κίνηση και τις αποφάσεις του κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εγκατάλειψης του πλοίου.

Το υπομοντέλο *Geometry* περιγράφει τους χώρους του πλοίου. Χρησιμοποιεί ένα fine network σύστημα, στο οποίο ο χώρος χωρίζεται σε μικρότερες κυψέλες (grids) με επιφάνεια ίση με αυτή που καλύπτει ένα μέσο ανθρώπινο σώμα. Οι διάφορες κυψέλες ενώνονται μεταξύ τους με ακμές (arcs) οι οποίες έχουν μήκος 0,5 m. Έτσι, οι επιβάτες κινούνται από μια κυψέλη στην διπλανή της μέσω της συνδετικής ακμής. Χρησιμοποιώντας fine network, το μοντέλο έχει την δυνατότητα της ακριβούς αναπαράστασης του χώρου, περιλαμβάνοντας εμπόδια που τυχόν βρίσκονται εντός αυτού. Ο χώρος εισάγεται σε αυτό μέσω αρχείου .DXF το οποίο μπορεί να εξαχθεί από όλες σχεδόν τις εφαρμογές CAD που κυκλοφορούν στο εμπόριο.

Το υπομοντέλο *Hazard* ελέγχει το ατμοσφαιρικό και το φυσικό περιβάλλον κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εγκατάλειψης. Αρχικά, λαμβάνει στοιχεία για την θερμότητα, τις συγκεντρώσεις καπνού, διοξειδίου του άνθρακα και λοιπών τοξικών εκλύσεων, τα οποία είτε έχουν εισαχθεί από τον χρήστη είτε έχουν προκύψει από άλλα εξειδικευμένα λογισμικά, όπως το CFAST και το SMARTFIRE. Στη συνέχεια τα κατανέμει στον χώρο και στον χρόνο.

Το υπομοντέλο *Toxicity* περιγράφει την επίδραση των στοιχείων που έχουν κατανεμηθεί από το Hazard submodel στην συμπεριφορά και τις αποφάσεις των επιβατών. Χρησιμοποιεί ένα μοντέλο κλασματικής δραστικής δόσης (fractional effective dose - FED) και με βάση τις συγκεντρώσεις των ανωτέρω στοιχείων υπολογίζει τον χρόνο που απαιτείται ώστε ο επιβάτης

να ακινητοποιηθεί. Ακολούθως, ο χρόνος αυτός εισάγεται στο Behaviour submodel, το οποίο και μεταβάλλει την συμπεριφορά του επιβάτη αναλόγως.

Το υπομοντέλο *Behaviour* καθορίζει την απόκριση του επιβάτη καθ'όλη την διαδικασία και περιλαμβάνει την γνώση του χώρου, την ανταπόκριση στην επικοινωνία, την ομαδική συμπεριφορά, τα κίνητρά του, την αντίληψη όσον αφορά τις εντολές του πληρώματος και το σύστημα σήμανσης καθώς και τις αντιδράσεις του σε σχέση με τους υπάρχοντες κινδύνους. Είναι το πιο σύνθετο από τα υπομοντέλα του προγράμματος και ταυτόχρονα το πιο σημαντικό. Ανάμεσα στις λειτουργίες του περιλαμβάνεται ο καθορισμός της ταχύτητας του επιβάτη με βάση την πυκνότητα του καπνού, την πυκνότητα επιβατών στον χώρο στον οποίο βρίσκεται τη συγκεκριμένη στιγμή καθώς και την κλίση του πλοίου. Επίσης κατανέμει το πλήρωμα σε ομάδες με συγκεκριμένα καθήκοντα (functional groups).

Το υπομοντέλο *Movement* λαμβάνει τις αντιδράσεις του επιβάτη σε κάθε timestep από το υπομοντέλο *Behavior*, και ακολούθως μοντελοποιεί και καταγράφει την κίνησή του στο χώρο.

Κριτήρια απόδοσης και μορφή αποτελεσμάτων

Το πρόγραμμα *maritimeExodus* περιλαμβάνει διάφορα σετ κριτηρίων, τα οποία έχουν προκύψει από αντίστοιχους κανονισμούς του IMO όσον αφορά την εγκατάλειψη ενός επιβατηγού πλοίου. Τα σετ κριτηρίων ομαδοποιούνται ως εξής: κριτήρια συμφόρησης, γενικά κριτήρια, διαδικαστικά κριτήρια, πληθυσμιακά κριτήρια και γεωμετρικά κριτήρια.

A) Κριτήρια συμφόρησης (congestion criteria)

C1: Ο αριθμός των χώρων στους οποίους η πυκνότητα ξεπέρασε την κρίσιμη τιμή 4 persons/m² για χρόνο μεγαλύτερο από το 10% του συνολικού χρόνου της προσομοίωσης. Σημειώνεται ότι σύμφωνα με τον κανονισμό IMO Circ. 1033, αν ξεπεραστεί η συγκεκριμένη τιμή σε οποιαδήποτε στιγμή της προσομοίωσης ενός σεναρίου εγκατάλειψης, τότε το πλοίο αποτυγχάνει στην ανάλυση.

C2: Ο μέγιστος χρόνος κατά τον οποίο ξεπεράστηκε η ανωτέρω κρίσιμη τιμή. Με αυτό το κριτήριο εντοπίζεται ουσιαστικά ο χώρος στον οποίο παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη συμφόρηση.

B) Γενικά κριτήρια

G1: ο μέσος χρόνος που απαιτήθηκε ώστε το κάθε άτομο να ολοκληρώσει τα καθήκοντα που του έχουν ανατεθεί (αφορά τα μέλη του πληρώματος)

G2: ο μέσος χρόνος που απαιτήθηκε ώστε ο επιβάτης να φθάσει στον χώρο συγκέντρωσης και εγκατάλειψης.

G3: ο μέσος χρόνος αναμονής σε ουρά ή συμφόρηση.

G4: η μέση απόσταση που διανύθηκε.

Γ) Διαδικαστικά κριτήρια (αφορούν τα μέλη του πληρώματος)

P1: ο αριθμός των ατόμων που εκτέλεσαν επιτυχώς τα καθήκοντά τους

P2: ο μέσος αριθμός καθηκόντων που εκτελέστηκαν

P3: ο μέσος χρόνος ολοκλήρωσης των καθηκόντων

Δ) Πληθυσμιακά κριτήρια (population criteria)

U1: αριθμός των ατόμων που ανήκουν σε ομάδες με συγκεκριμένα καθήκοντα.

U2: ποσοστό επί τις εκατό των ανενεργών μελών του πληρώματος σε σχέση με τον συνολικό αριθμό αυτού.

Ε) Γεωμετρικά κριτήρια (geometric criteria)

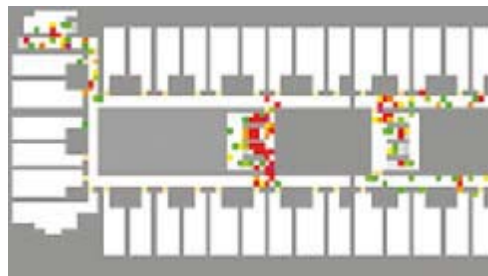
M1: ο αριθμός των υδατοστεγών θυρών που χρησιμοποιήθηκαν στο σενάριο εγκατάλειψης,

M2: οι φορές που κάποιο μέλος του πληρώματος κινήθηκε από ένα κατάστρωμα σε άλλο.

(Vanem & Skjong, 2006) (Deree, Galea, & Lawrence, 2009)

3.4.3 Μοντέλο AENEAS

Το πρόγραμμα *AENEAS* έχει αναπτυχθεί και διακινείται εμπορικά από τον Γερμανικό Νηογνώμονα (Germanischer Lloyd, GL), σε συνεργασία με την εταιρία TraffGo. Πρόκειται για ένα μικροσκοπικό μοντέλο κυψελών (fine network model), το οποίο έχει την δυνατότητα να προσομοιώνει την συμπεριφορά των επιβατών και του πληρώματος λαμβάνοντας υπόψη διάφορους κινδύνους, συμπεριλαμβάνοντας την πυρκαγιά και την κλίση του πλοίου. (Klöpffel & Povel, Simulating ship evacuation, 2008)



Εικόνα 3.4.3.1: 2-D αναπαράσταση επιβατών στο μοντέλο AENEAS

Περιγραφή χώρου

Ο χώρος περιγράφεται από μια σειρά κυψελών με μέγεθος 1.2x1.2 m οι οποίες είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους με ακμές. Το κάθε άτομο κινείται από μια κυψέλη στη διπλανή της. Οι έξοδοι του κάθε χώρου αναπαρίστανται και αυτές ως κυψέλες με συγκεκριμένα όμως χαρακτηριστικά.

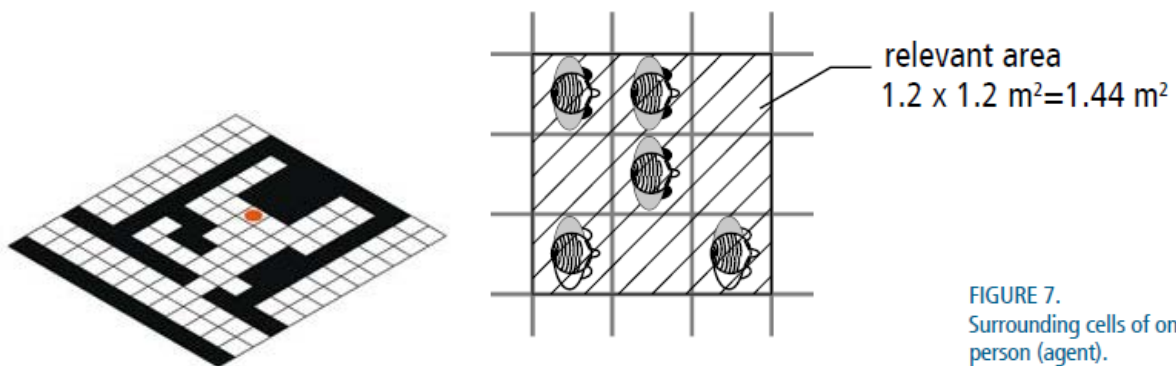
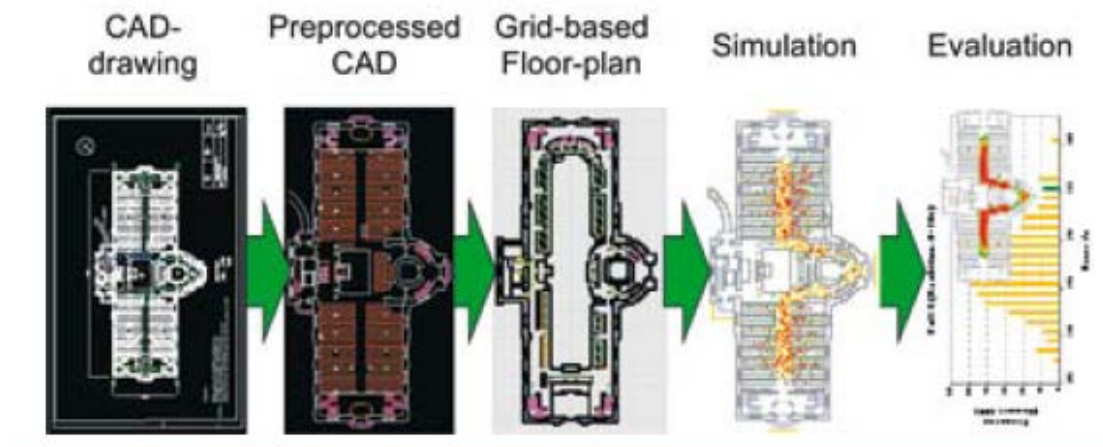


FIGURE 7.
Surrounding cells of one person (agent).

Εικόνα 3.4.3.2: grid mapping στο μοντέλο AENEAS

Ο χώρος εισάγεται στο πρόγραμμα ως αρχείο .DXF και στη συνέχεια αναλύεται και αναπαρίσταται με βάση το παραπάνω σύστημα.

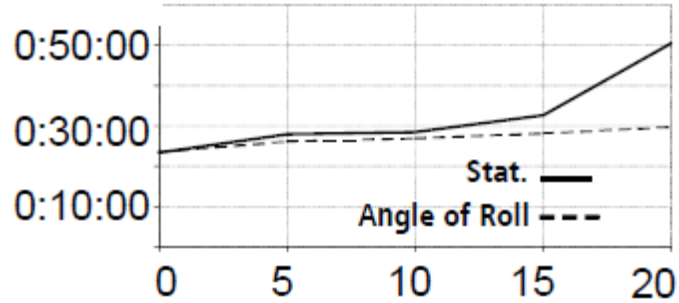


Εικόνα 3.4.3.3: Διαδικασία εισαγωγής υπο μελέτη χώρου στο μοντέλο AENEAS

Περιβαλλοντικοί παράγοντες και κίνδυνοι

Το μοντέλο έχει τη δυνατότητα να αναγνωρίζει τυχόν κινδύνους και σε συνδυασμό με τους περιβαλλοντικούς παράγοντες (κίνηση και κλίση του πλοίου), να τους λαμβάνει υπόψη στον προσδιορισμό των αποφάσεων, της ταχύτητας και γενικώς της συμπεριφοράς του κάθε ατόμου.

Οι παράγοντες αυτοί υπεισέρχονται στο μοντέλο με δύο τρόπους. Πρώτον, ως παράγοντες που ελαττώνουν (και σε μεγάλες τιμές μηδενίζουν) την ταχύτητα κίνησης του ατόμου και δεύτερον ως παράγοντες επιλογής της διαδρομής που θα ακολουθήσει. Οι κυριότεροι από αυτούς τους παράγοντες είναι, όπως είπαμε, η κίνηση (rolling) και η κλίση του πλοίου. Όσον αφορά την κλίση του πλοίου, στο μοντέλο θεωρείται ότι η ταχύτητα μειώνεται γραμμικά έως τις 35 μοίρες. Μεταξύ 35 και 45 μοιρών η ταχύτητα λαμβάνεται ως το 5% σε σχέση με την ταχύτητα άνευ κλίσης, ενώ από τις 45 μοίρες και πάνω αυτή μηδενίζεται και τα εναπομείναντα στο πλοίο άτομα θεωρούνται casualties. Το rolling υπεισέρχεται στον υπολογισμό ως προσαύξηση του συνολικού χρόνου εγκατάλειψης του πλοίου, με μέγιστη τιμή τα 50 min για rolling 20 μοιρών με περίοδο $T=12,5$ s.



Stat. Heeling respectively max. Angle of Roll

Εικόνα 3.4.3.4: Τυπικές καμπύλες διαμήκους και εγκάρσιας κλίσης

Κριτήρια ανάλυσης

Το βασικό κριτήριο ανάλυσης που χρησιμοποιείται είναι το:

$$RSET < ASET$$

Ο χρόνος *RSET* (required safe egress time) προκύπτει από την προσομοίωση και είναι ουσιαστικά ο συνολικός χρόνος που απαιτείται ώστε το πλοίο να εγκαταλειφθεί. Ο χρόνος *ASET* (available safe egress time) προκύπτει από διάφορους παράγοντες όπως η θερμοκρασία, το επίπεδο του καπνού και των λοιπών τοξικών εκλύσεων, η κλίση του πλοίου κλπ. Πρόκειται για τον μέγιστο χρόνο κατά τον οποίο μπορεί να ολοκληρωθεί η εγκατάλειψη του πλοίου χωρίς casualties.

Πέρα από το ανωτέρω κριτήριο, το πρόγραμμα δύναται να αξιολογήσει την προσομοιωμένη διαδικασία εγκατάλειψης με βάση τους διάφορους κανονισμούς του IMO, όπως η Σύμβαση SOLAS, ο κώδικας FSS, ο κώδικας HSC 2000 και η οδηγία MSC.1/Circ. 1238 που αναλύουμε σε άλλο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας.

3.4.4 Μοντέλο BYPASS

Το μοντέλο *BYPASS* έχει αναπτυχθεί στο πανεπιστήμιο Gerhard-Mercator του Duisburg στις αρχές της δεκαετίας του 2000. Το *BYPASS* χρησιμοποιεί την θεωρία των *κυτταρικών αυτόματων* (cellular automata) προκειμένου να προσομοιώσει την κίνηση των επιβατών στο χώρο (Klüpfel, Meyer-König, & Wahle, 2001). Το μοντέλο αυτό βασίζεται στις ακόλουθες αρχές:

- 1) Ο χώρος καταμετρείται σε τετράγωνα κύτταρα με μήκος πλευράς 0.4 m
- 2) Το κάθε κύτταρο μπορεί να καταληφθεί μόνο από ένα άτομο.
- 3) Κάθε άτομο έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά ή ικανότητες
- 4) Η κίνηση του κάθε ατόμου περιγράφεται από την ταχύτητα και την κατεύθυνση, οι οποίες καθορίζονται με βάση κανόνες κοινούς για όλα τα άτομα.
- 5) Η ταχύτητα και η κατεύθυνση μπορούν ανά πάσα στιγμή να αλλάξουν με βάση συγκεκριμένες πιθανότητες. Η λειτουργία αυτή εισάγεται στο μοντέλο προκειμένου να ληφθούν υπόψη διάφοροι ψυχολογικοί και κοινωνικοί παράγοντες οι οποίοι δεν μοντελοποιούνται αναλυτικά.

Επιλογή ταχύτητας και διαδρομής

Ως μέγιστη ταχύτητα κίνησης ενός ατόμου λαμβάνεται η τιμή 5 cells/s, η οποία αντιστοιχεί σε 2 m/s. Έτσι, ο γενικός κανόνας είναι $v_i \leq v_{i,max}$, με την ταχύτητα v_i να εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του κάθε ατόμου καθώς και τις συνθήκες εντός του χώρου στον οποίο κινείται. Το κάθε άτομο έχει μια συγκεκριμένη τιμή για την ορατότητα $d_{i,sight}$ στην κατεύθυνση της κίνησής του, η οποία και μεγιστοποιείται στην τιμή $d_{i,max} = 100$ cells. Η ορατότητα αυτή μπορεί να περιοριστεί από άτομα που καταλαμβάνουν κύτταρα καθώς και από εμπόδια, όπως τοίχοι και διαχωριστικά. Όταν ένα άτομο καλείται να εγκαταλείψει έναν χώρο, υπολογίζονται οι ευθείες αποστάσεις μεταξύ του κύτταρου στο οποίο βρίσκεται εκείνη την στιγμή το άτομο και των διαφόρων εξόδων, αν αυτές βρίσκονται στο οπτικό του πεδίο. Η έξοδος την οποία επιλέγει να χρησιμοποιήσει είναι αυτή που βρίσκεται πιο κοντά. Το άτομο ξεκινά να κινείται από κύτταρο σε κύτταρο, στην ευθεία προς την έξοδο που έχει επιλέξει. Όταν το κύτταρο προς το οποίο κινείται είναι κατειλημμένο, το άτομο σταματά και ελέγχει αν κάποιο από τα κύτταρα τα οποία βρίσκονται σε γωνία 45 μοιρών από τη θέση του είναι κενά, οπότε μετακινείται προς αυτά και η πορεία του επαναυπολογίζεται. Αν παρέλθει ένα εύλογο χρονικό διάστημα και τα κύτταρα αυτά παραμένουν κατειλημμένα, το συγκεκριμένο άτομο ξεκινά να κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση. Τέλος, όπως αναφέραμε και στις γενικές αρχές, το άτομο δύναται οποιαδήποτε στιγμή να αλλάξει κατεύθυνση, ταχύτητα κίνησης ή ακόμα και να σταματήσει με βάση μια πιθανότητα p_i η οποία λαμβάνεται από μια ομοιόμορφη κατανομή.

Χρόνοι διαδικασίας

Με βάση την παραπάνω διαδικασία υπολογίζεται ο χρόνος t_{move} που απαιτείται ώστε το άτομο να φθάσει από το σημείο εκκίνησής του στον χώρο συγκέντρωσης. Ο συνολικός χρόνος της διαδικασίας εγκατάλειψης για το κάθε άτομο υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$T^i = [\max(t_{deploy}, t_{move}^i + t_{react}^i) + t_{embark}^i]$$

όπου:

t_{react} : ο χρόνος που απαιτείται ώστε το άτομο να ξεκινήσει να κινείται προς τον χώρο συγκέντρωσης

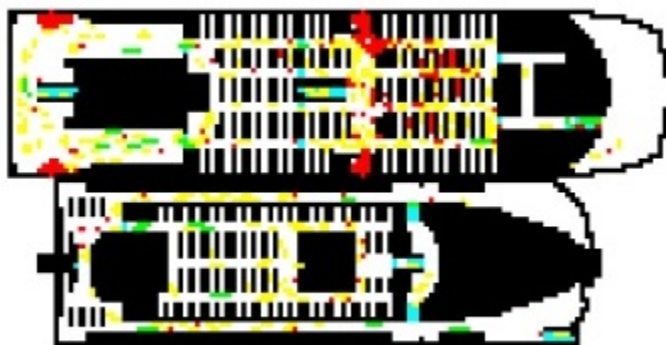
t_{deploy} : ο χρόνος που απαιτείται ώστε να ετοιμαστεί το σύστημα διαφυγής που θα χρησιμοποιήσει

t_{embark} : ο χρόνος που απαιτείται ώστε το άτομο να επιβιβαστεί στο ανωτέρω μέσο και να απομακρυνθεί από το πλοίο.

Ο χρόνος αντίδρασης t_{react} εξαρτάται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κάθε ατόμου. Το μοντέλο δίνει την ευχέρεια στον σχεδιαστή να ορίσει τον χρόνο αυτό υπο μορφή είτε μιας συγκεκριμένης τιμής που ισχύει καθολικά για όλους τους επιβάτες, είτε υπό μορφή μιας κατανομής σύμφωνα με την οποία δίδεται μια ξεχωριστή τιμή για κάθε άτομο. Οι χρόνοι προετοιμασίας του συστήματος t_{deploy} και επιβίβασης σε αυτό t_{embark} εξαρτώνται αποκλειστικά από το σύστημα και δίνονται συνήθως από τον κατασκευαστή του.

Ο συνολικός χρόνος για την ολοκλήρωση της διαδικασίας είναι ο μέγιστος για όλα τα άτομα:

$$T = \max T^i$$



Εικόνα 3.4.4.1: Απεικόνιση του χώρου και των ατόμων στο μοντέλο BYPASS

3.4.5 Μοντέλο IMEX

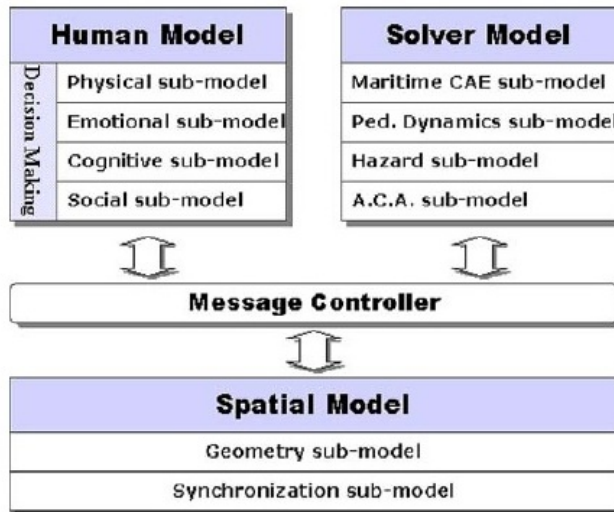
Το *IMEX* (Intelligent Model for Extrication Simulation) είναι ένα μοντέλο εγκατάλειψης για επιβατηγά πλοία που έχει αναπτυχθεί με την συνεργασία διάφορων ερευνητικών ιδρυμάτων της Νότιας Κορέας. Αφορμή για την ανάπτυξή του ήταν, σύμφωνα με τους δημιουργούς του, η ανεπάρκεια που φαίνεται να έχουν τα υπάρχοντα μοντέλα όσον αφορά την επακριβή προσομοίωση της ανθρώπινης συμπεριφοράς. Πρόκειται για ένα μικροσκοπικό μοντέλο όπου τα άτομα αναπαριστώνται μεμονωμένα (Park, Lee, Kim, & Yang, 2004). Οι βασικές του αρχές είναι οι ακόλουθες:

- 1) περιλαμβάνει στοιχεία από υπάρχοντα μοντέλα
- 2) προσομοιώνει τις σωματικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ατόμων χρησιμοποιώντας ένα δυναμικό μοντέλο που ονομάζεται *rynamics*.
- 3) προσφέρει ένα εξελιγμένο τρόπο αξιολόγησης των προβλεπόμενων διαδικασιών διαφυγής και εγκατάλειψης χρησιμοποιώντας ένα λεπτομερές μοντέλο για την ανθρώπινη συμπεριφορά.

Το *IMEX* αποτελείται από τρία διαφορετικά μοντέλα τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους κατά την διάρκεια της διαδικασίας. Τα μοντέλα αυτά είναι:

- Το *Human Model*, το οποίο και περιλαμβάνει τα ακόλουθα υπομοντέλα: *physical*, *emotional*, *cognitive* και *social*.
- Το *Solver Model*, που περιλαμβάνει τα *maritime CAE*, *PED dynamics*, *hazard* και *A.C.A.* υπομοντέλα
- Το *Spatial Model*, που περιλαμβάνει τα *geometry* και *synchronization* υπομοντέλα.

IMEX
(Intelligent Model for Extrication Simulation)



Εικόνα 3.4.4.2: Διάγραμμα λειτουργίας του μοντέλου IMEX

Το Spatial model χρησιμοποιείται για να αναπαραστήσει τον χώρο και τον χρόνο, το Human model τα χαρακτηριστικά και την συμπεριφορά των ατόμων και το Solver model τους δυναμικούς παράγοντες που υπεισέρχονται στην διαδικασία, όπως τις κινήσεις του πλοίου (Maritime CAE), τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ατόμων (Ped. Dynamics) και τους κινδύνους (Hazard). Το Human και το Solver αποτελούν τον πυρήνα του IMEX.

Δυναμικό μοντέλο κίνησης (pedestrian dynamics model)

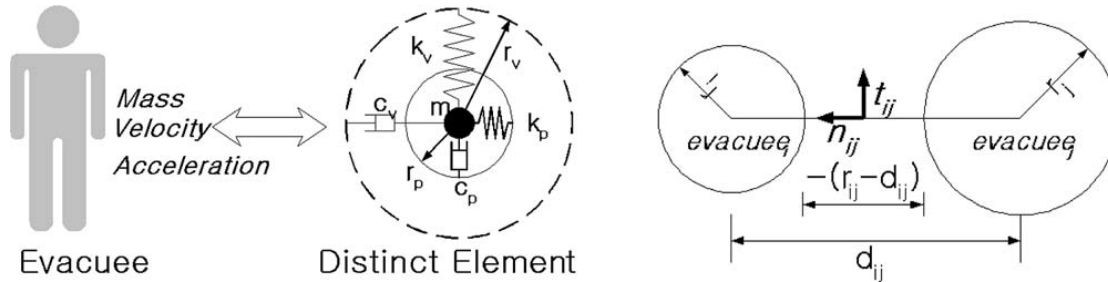
Όπως είπαμε και προηγουμένως, το IMEX χρησιμοποιεί ένα δυναμικό μοντέλο για την κίνηση του ατόμου και τις διάφορες αλληλεπιδράσεις του με το περιβάλλον, το οποίο οι δημιουργοί του έχουν ονομάσει Dynamics. Το μοντέλο αυτό βασίζεται στους νόμους της νευτώνειας μηχανικής. Η μέγιστη ταχύτητα του κάθε ατόμου καθορίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$v_{max} = \frac{f_{sp}}{C}$$

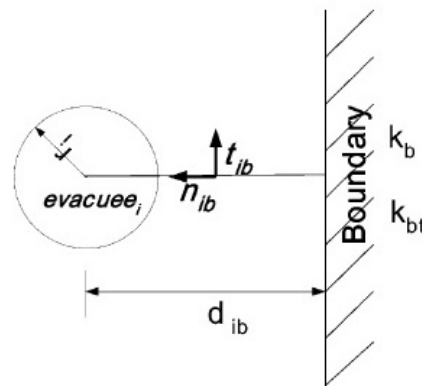
Ο παράγοντας f_{sp} είναι η δύναμη που απαιτείται ώστε το άτομο να κινηθεί και λαμβάνει τιμές από 30.3 έως 66.6 N. Ο παράγοντας C είναι η αντίσταση στην κίνηση.

Όσον αφορά τις αλληλεπιδράσεις με άλλα άτομα, καθώς και με τα όρια ή τα εμπόδια που βρίσκονται στον χώρο, το μοντέλο χρησιμοποιεί ένα σύνολο εξισώσεων που περιλαμβάνουν

τις δυνάμεις που ασκούνται στο άτομο από την επαφή του με αυτά, καθώς και τις αποσβέσεις των δυνάμεων αυτών.



Εικόνα 3.4.4.3: Αλληλεπίδραση του ατόμου με άλλα άτομα

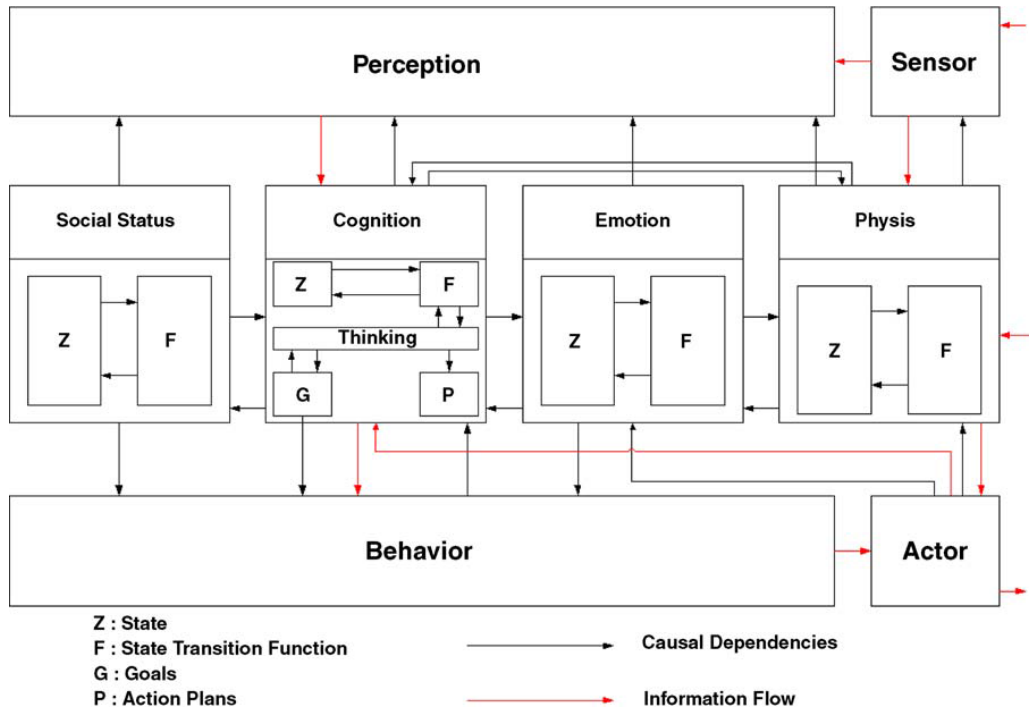


Εικόνα 3.4.4.4: Αλληλεπίδραση του ατόμου με διαχωριστικά και εμπόδια

Μοντέλο ανθρώπινης συμπεριφοράς (intelligent human behavior model)

Οι δημιουργοί του μοντέλου χωρίζουν την ανθρώπινη συμπεριφορά σε δυο βασικές κατηγορίες: την *αντιδραστική συμπεριφορά* (reactive behavior) και την *προμελετημένη* (deliberative) *συμπεριφορά*. Η αντιδραστική συμπεριφορά είναι ουσιαστικά η συμπεριφορά εκείνη όπου το άτομο αντιδρά ενστικτωδώς (χωρίς να υπεισέρχεται δηλαδή η σκέψη) σε ερεθίσματα που λαμβάνει από το περιβάλλον στο οποίο κινείται. Η προμελετημένη συμπεριφορά είναι ακριβώς αντίστροφη, απαιτεί δηλαδή από το άτομο να σκεφτεί ώστε να δώσει λύση σε ένα πρόβλημα που εμφανίζεται. Το IMEX δεν λαμβάνει υπόψη την πρώτη κατηγορία, καθώς αυτή είναι ιδιαίτερα απρόβλεπτη και δεν υπάρχει προς το παρόν η απαραίτητη βιβλιογραφία ώστε να επιτευχθεί μια αποδεκτή μοντελοποίηση της. Στην

προμελετημένη ωστόσο συμπεριφορά βασίζεται η εύρεση διαδρομής και η κίνηση του αναπαριστώμενου ατόμου. Το διάγραμμα λειτουργίας του μοντέλου ανθρώπινης συμπεριφοράς είναι το παρακάτω:



Εικόνα 3.4.4.5: Διάγραμμα μοντέλου ανθρώπινης συμπεριφοράς

3.4.6 Μοντέλο EVDEMON

Το μοντέλο *EVDEMON* (Evacuation Demonstration & Modeling) έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Μελέτης Πλοίου της Σχολής Ναυπηγών Μηχ/γων Μηχ/κών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (SDL-NTUA) από τους Ε. Μπουλουγούρη και Α. Παπανικολάου. Πρόκειται για ένα μικροσκοπικό μοντέλο το οποίο, όπως και το *BYPASS* που προαναφέραμε, χρησιμοποιεί τα κυτταρικά αυτόματα προκειμένου να προσομοιώσει την κίνηση των ατόμων στο χώρο (Boulougouris & Papanikolaou, 2002). Οι βασικές αρχές του μοντέλου είναι οι ακόλουθες:

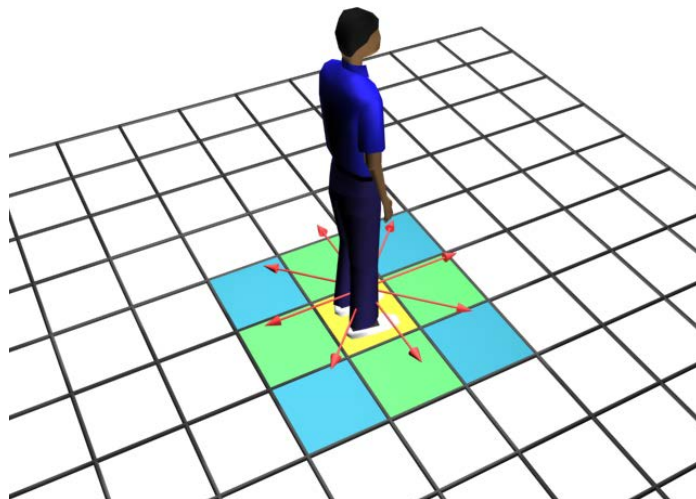
- 1) Οι επιβάτες προσομοιώνονται ως αυτόνομες οντότητες στις οποίες παρέχονται οι λιγότερες δυνατές πληροφορίες, προκειμένου το μοντέλο να είναι απλό.

2) Οι επιβάτες κρατούν ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ τους. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση κυττάρων, τα οποία καταλαμβάνονται μόνο από έναν επιβάτη.

3) Οι επιβάτες κινούνται σε κάθε χρονικό βήμα. Το μοντέλο χρησιμοποιεί μια διαδικασία η οποία ονομάζεται *parallel update*. Σύμφωνα με αυτή, σε κάθε χρονικό βήμα οι επιβάτες μετακινούνται εικονικά στο κύτταρο οποίο έχουν επιλέξει, άσχετα αν αυτό καταλαμβάνεται ή έχει επιλεγεί από κάποιον άλλο επιβάτη. Αν αυτό συμβαίνει τότε γίνεται «κλήρωση» μεταξύ των διεκδικητών και ο «νικητής» καταλαμβάνει το κύτταρο, ενώ οι «ηττημένοι» επιστρέφουν στο κύτταρο στο οποίο βρίσκονταν αρχικά.

Επιλογή διαδρομής

Για την επιλογή διαδρομής, το *EVDEMON* βασίζεται σε έναν αλγόριθμο που χρησιμοποιείται ευρέως στα ηλεκτρονικά παιχνίδια και ο οποίος ονομάζεται *A* algorithm*. Σύμφωνα με αυτόν, ο επιβάτης επιλέγει την πιο σύντομη διαδρομή προς τον στόχο του (την έξοδο από τον χώρο) με βάση τις διαθέσιμες κατευθύνσεις σε κάθε χρονικό βήμα. Εδώ παρατηρείται μια σημαντική διαφοροποίηση σε σχέση με τα μοντέλα που χρησιμοποιούν τα *cellular automata*, καθώς στα περισσότερα από αυτά υπολογίζονται όλες οι πιθανές διαδρομές προς τον στόχο σε κάθε χρονικό βήμα. Η επιλογή της εξόδου γίνεται την στιγμή που θα εισέλθει ο επιβάτης στον χώρο και αλλάζει στην περίπτωση που ο επιβάτης μείνει στάσιμος σε ένα κύτταρο για ένα εύλογο χρονικό διάστημα. Το διάστημα αυτό εξαρτάται από τα μεμονωμένα χαρακτηριστικά του κάθε επιβάτη. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, κάθε επιβάτης έχει την δυνατότητα να κινηθεί σε 8 διαφορετικές κατευθύνσεις (εκτός φυσικά αν κάποιο από τα 8 γειτνιάζοντα κύτταρα είναι κατειλημμένο).



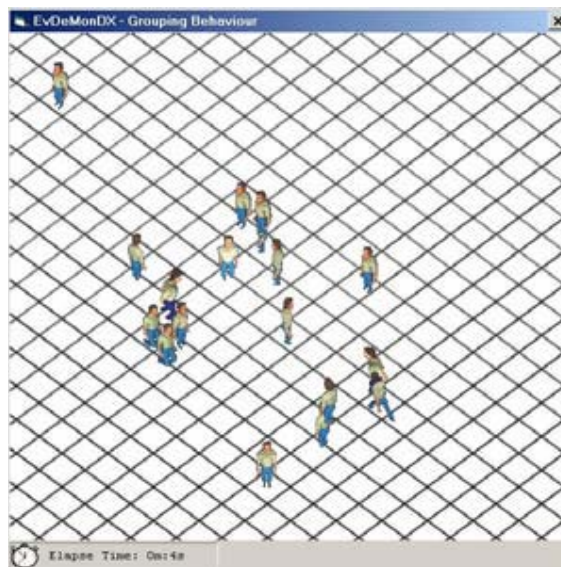
Εικόνα 3.4.6.1: Πιθανές κατευθύνσεις του επιβάτη

Δημογραφικά χαρακτηριστικά

Τα άτομα χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες: τους επιβάτες και το πλήρωμα. Οι επιβάτες κατηγοριοποιούνται περαιτέρω με βάση την ηλικία σε παιδιά, ενήλικες και ηλικιωμένους. Η κατηγοριοποίηση αυτή καθορίζει κάποια μεμονωμένα χαρακτηριστικά των επιβατών και κυρίως τον χρόνο απόκρισης στο σήμα κινδύνου καθώς και την μέγιστη ταχύτητα κίνησης. Το πλήρωμα δεν χωρίζεται ηλικιακά καθώς θεωρείται ότι κινείται με συγκεκριμένη ταχύτητα και με κατεύθυνση προς τους χώρους ευθύνης του. Η μέγιστη ταχύτητα που με την οποία μπορεί να κινηθεί ένας επιβάτης είναι 1.2 m/sec ή 3 cells/sec, σε πλήρη συμφωνία με τις μέγιστες τιμές που ορίζει η οδηγία MSC Circ. 909, καθώς και οι επικαιροποιημένες 1011 και 1238. Το χρονικό βήμα του μοντέλου είναι 1 sec και ο κάθε επιβάτης μπορεί να επιταχύνει στην μέγιστη ταχύτητά του και αντίστροφα μέσα σε διάστημα 2 χρονικά βήματα ή 2 sec. Η μέγιστη ταχύτητα του κάθε μεμονωμένου επιβάτη λαμβάνεται ως τυχαίος αριθμός από μια αντιπροσωπευτική κατανομή, καθορίζεται στην αρχή της προσομοίωσης και δεν αλλάζει κατά την διάρκειά της.

Γραφική αναπαράσταση

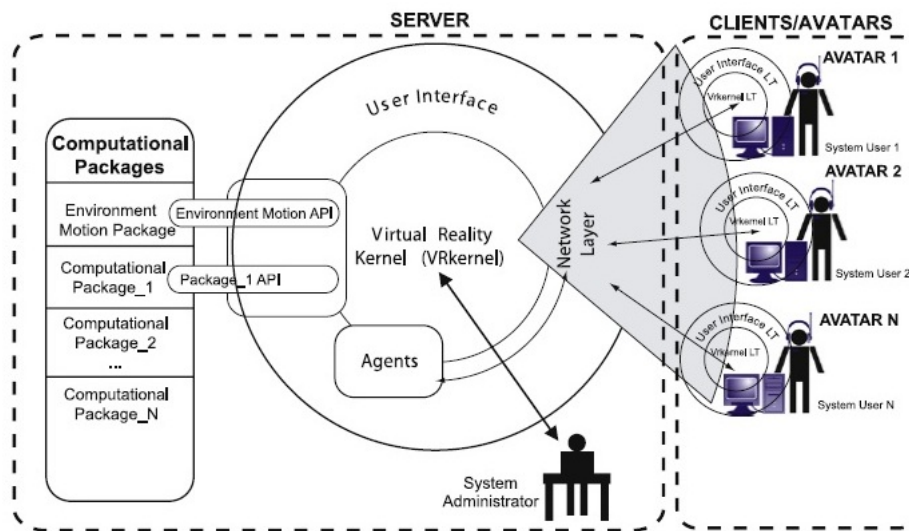
Το μοντέλο περιλαμβάνει ένα γραφικό περιβάλλον, στο οποίο αναπαριστάται σε ένα 2 ½ D περιβάλλον, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Το γραφικό περιβάλλον αυτό δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να ελέγξει την ορθότητα της αναπαράστασης του χώρου πριν την εκκίνηση της προσομοίωσης, καθώς και τα αποτελέσματα αυτής σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 3.4.6.2: Γραφική αναπαράσταση στο μοντέλο EVDEMON

3.4.7 Μοντέλο VELOS

Το μοντέλο *VELOS* έχει απαπτυχθεί από τους Α. Γκίνη, Κ. Κώστα, Γ. Πολίτη και Π. Κακλή και έπειτα από συνεργασία του Εργαστηρίου Μελέτης Πλοίου του ΕΜΠ με το τμήμα Ναυπηγικής του ΤΕΙ Αθήνας. Πρόκειται για ένα μικροσκοπικό μοντέλο που βασίζεται στις δυο προτεινόμενες μεθοδολογίες του ΙΜΟ που είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, και το οποίο δίνει την δυνατότητα στους χρήστες να εισέλθουν στην διαδικασία της προσομοίωσης και να ελέγξουν άτομα (*avatars*) σε πραγματικό χρόνο (Ginnis, Kostas, Politis, & Kaklis, 2010).



Εικόνα 3.4.7.1: Η αρχιτεκτονική του συστήματος του VELOS

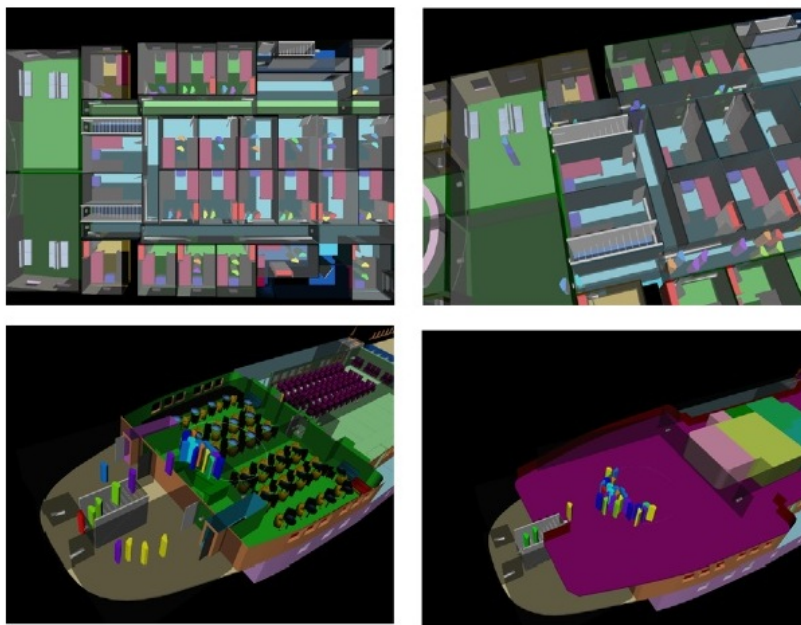
Μοντελοποίηση ανθρώπινης συμπεριφοράς

Τα διάφορα άτομα που συμμετέχουν στην προσομοίωση χωρίζονται σε δυο κατηγορίες: τους *agents*, η συμπεριφορά των οποίων καθορίζεται από το μοντέλο με βάση κάποιους κανόνες και τους *avatars*, που ελέγχονται από τους χρήστες. Όσον αφορά τους *agents*, η γενική συμπεριφορά τους προκύπτει από ένα σετ συμπεριφορών (Seek, Flee, Pursuit, Evade, Arrive, Leader Follow, Separation, Obstacle Avoidance & Containment, Inclination, Wander, Path-following, Cohesion & Alignment). Οι συμπεριφορές αυτές πυροδοτούνται από ερεθίσματα που λαμβάνει το κάθε άτομο από το περιβάλλον του, και τα οποία ονομάζονται *triggers*. Τα ερεθίσματα αυτά μπορεί να οφείλονται στο περιβάλλον (θερμοκρασία, καπνός, κλίση και κίνηση του πλοίου), στον χώρο (εμπόδια, κλειστές πόρτες, σήμανση) ή σε άλλα άτομα (συμφόρηση, ουρές στις πόρτες ή τις σκάλες, παρουσία μελών του πληρώματος ή της οικογένειας του ατόμου στον χώρο στον οποίο κινείται κλπ.). Το μοντέλο δίνει την δυνατότητα στο κάθε άτομο να συμπεριφέρεται διαφορετικά, έστω και αν υπόκειται στα ίδια ερεθίσματα,

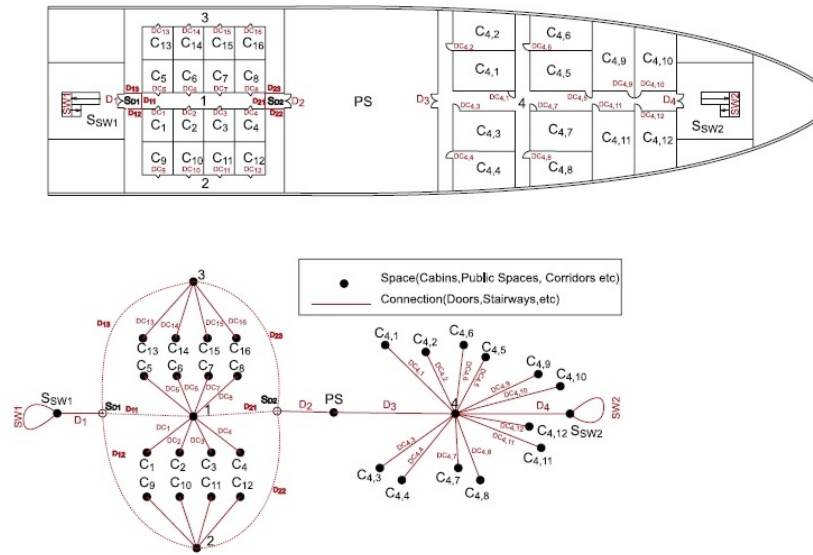
καθώς και να έχει διαφορετικές προτεραιότητες (π.χ. να επιλέξει την πιο σύντομη διαδρομή προς τον στόχο του ή να ακολουθήσει ένα μέλος του πληρώματος). Όσον αφορά την επιλογή της διαδρομής, το κάθε άτομο ακολουθεί την σήμανση ή τις υποδείξεις του πληρώματος. Αν αυτές δεν είναι διαθέσιμες, επιλέγει την διαδρομή με βάση τα ερεθίσματα που δέχεται.

Αναπαράσταση του χώρου

Η αναπαράσταση του χώρου στο μοντέλο VELOS γίνεται σε δυο επίπεδα. Στο πρώτο επίπεδο, το εσωτερικό του κάθε χώρου αναπαριστάται με συνεχές τρισδιάστατο σύστημα. Στο δεύτερο επίπεδο, χρησιμοποιείται γράφος ώστε να αναπαραστήσει τις συνδέσεις μεταξύ των χώρων. Στον γράφο αυτό, οι *κόμβοι* (nodes) είναι οι διάφοροι χώροι του πλοίου (καμπίνες, διάδρομοι, κοινόχρηστοι χώροι), ενώ οι *ακμές* (edges) είναι οι συνδέσεις μεταξύ αυτών (πόρτες, κλιμακοστάσια). Με αυτόν τον τρόπο γίνεται δυνατή η αναπαράσταση του χώρου ως ένα υδραυλικό σύστημα, όπως δηλαδή ορίζουν και οι δυο προτεινόμενες μέθοδοι του IMO.



Εικόνα 3.4.7.2: Εικόνα Αναπαράσταση στο τρισδιάστατο σύστημα



Εικόνα 3.4.7.3: Γράφος χώρου στο μοντέλο VELOS

Όσον αφορά τις συνθήκες εντός αυτού, το *VELOS* δεν έχει την δυνατότητα να μοντελοποιεί επικίνδυνες συνθήκες όπως πυρκαγιά ή κλίση λόγω εισροής υδάτων. Ωστόσο, ο χρήστης δύναται να εισάγει τα δεδομένα αυτά στο πρόγραμμα ώστε να ληφθούν υπόψη κατά την προσομοίωση.

Δημογραφικά χαρακτηριστικά

Τα δημογραφικά χαρακτηριστικά των ατόμων προκύπτουν με βάση την κατηγοριοποίηση (φύλο, ηλικία) και τις τιμές για την μέγιστη και την ελάχιστη ταχύτητα που δίνονται στις προτεινόμενες μεθοδολογίες του IMO. Η αρχική κατανομή των επιβατών στους χώρους μπορεί να γίνει είτε αυτόματα, με βάση τα σενάρια που χρησιμοποιούν οι προτεινόμενες μεθοδολογίες του IMO, είτε απευθείας από τον χρήστη.

Ανάλυση και παρουσίαση αποτελεσμάτων

Μετά το πέρας της προσομοίωσης, το μοντέλο αναλύει και εξάγει τα αποτελέσματα για τα ακόλουθα:

- Τον χρόνο κίνησης (travel time) των επιβατών, δηλαδή τον συνολικό χρόνο που χρειάστηκε ώστε όλοι οι επιβάτες να μεταβούν στο σταθμό συγκέντρωσης.
- Το αριθμό των επιβατών που φθάνουν στον χώρο συγκέντρωσης σε σχέση με τον χρόνο.
- Την πυκνότητα επιβατών στους χώρους, καθώς και την ροή στις συνδέσεις μεταξύ αυτών.

4. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΕ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΙΝΔΥΝΟΥ

4.1 Γενική θεώρηση

Η συμπεριφορά ενός ατόμου σε καταστάσεις κινδύνου είναι ένα αντικείμενο που έχει μελετηθεί εκτενώς από διάφορους επιστημονικούς τομείς, όπως η ψυχολογία, η κοινωνιολογία και η ανθρωπολογία, ήδη από το 1950. Η ανάπτυξη στα μέσα της δεκαετίας του 1980 των πρώτων μοντέλων διαφυγής από κτίρια και η επακόλουθη διάδοσή τους και σε άλλους τομείς, όπως τα αεροσκάφη, τα τρένα και τα πλοία έδωσε μια νέα ώθηση στην σχετική έρευνα.

Οι Gwynne et al. θεωρούν ότι η συμπεριφορά σε καταστάσεις κινδύνου καθορίζεται από τις αλληλεπιδράσεις του ατόμου με το περιβάλλον του. Οι επιδράσεις αυτές είναι τριών ειδών:

- μεταξύ **ατόμων**
- μεταξύ **ατόμου** και **κατασκευής**
- μεταξύ **ατόμου** και **περιβάλλοντος**

Σύμφωνα με τους ίδιους συγγραφείς, η διαδικασία λήψης αποφάσεων που προκαλείται από τις παραπάνω επιδράσεις γίνεται πιο περίπλοκη λόγω της αλληλεπίδρασης του ατόμου με τον χώρο. Η αλληλεπίδραση αυτή γίνεται σε τρία επίπεδα:

- το **ψυχολογικό (psychological) επίπεδο**, δηλαδή την αντίδραση του ατόμου με βάση τις πληροφορίες που διαθέτει και τον χαρακτήρα ή την εμπειρία του.
- το **κοινωνιολογικό (sociological) επίπεδο**, δηλαδή την αντίδραση με βάση την αλληλεπίδραση και επικοινωνία του με τους υπόλοιπους επιβάτες.
- το **φυσιολογικό (physiological) επίπεδο**, δηλαδή την αλληλεπίδραση του ατόμου με το περιβάλλον, η οποία επηρεάζει την δυνατότητα του ατόμου να κινηθεί αποτελεσματικά στο χώρο. (Gwynne, Galea, Owen, Lawrence, & Filippidis, 1999)

Οι H. Muir et al, σε έρευνά τους σχετικά με την συμπεριφορά επιβατών αεροσκαφών, μας δίνουν πέντε τυπικές συμπεριφορές που παρατηρούνται, όχι μόνο σε αεροσκάφη, αλλά και σε άλλες κατασκευές (συμπεριλαμβανομένων και των πλοίων). Οι συμπεριφορές αυτές είναι: ο **φόβος-φγη** (fear-flight), ο **πανικός** (panic), η **αδράνεια** (behavioral inaction), η **σύνδεση** (affiliation) και ο **αλτρουισμός** (altruism).

- Ο φόβος-φυγή είναι η συμπεριφορά εκείνη όπου το άτομο έχει ως αποκλειστικό στόχο να απομακρυνθεί από την επικίνδυνη περιοχή και είναι η πιο συχνά παρατηρούμενη σε

σχετικές έρευνες. Σύμφωνα με τους ίδιους συγγραφείς, το κατά πόσον η συμπεριφορά αυτή είναι ελεγχόμενη ή πιο επείγουσα, εξαρτάται από το επίπεδο άγχους που αισθάνεται το άτομο.

- Ο πανικός, όπως θα δούμε εκτενέστερα και παρακάτω, είναι ένας όρος που έχει λάβει διάφορους ορισμούς όσον αφορά την συμπεριφορά. Οι περισσότεροι ορισμοί όμως συμφωνούν ότι το άτομο που βρίσκεται σε πανικό εμφανίζει επιθετική, εγωιστική και ως ένα βαθμό «αλλοπρόσαλλη» συμπεριφορά, που δεν περιορίζεται από τους κοινωνικούς κανόνες.
- Η αδράνεια, που παρατηρείται αρκετά συχνότερα από τον πανικό, είναι η συμπεριφορά εκείνη κατά την οποία το άτομο δεν αντιδρά στα διάφορα ερεθίσματα και δεν κάνει καμία προσπάθεια να διαφύγει τον κίνδυνο. Ο Lazarus έχει παρατηρήσει ότι η συμπεριφορά αυτή παρουσιάζεται στις εξής περιπτώσεις: α) όταν το άτομο θεωρήσει ότι δεν υπάρχει δυνατότητα διαφυγής, β) όταν, αντιδρώντας αμυντικά, επαναξιολογήσει την κατάσταση και καταλήξει στο συμπέρασμα ότι ο κίνδυνος δεν είναι υπαρκτός και γ) όταν το άτομο δεν έχει την γνώση ή την ικανότητα ώστε να λάβει λογικές αποφάσεις. Η τελευταία περίπτωση συνδέεται άμεσα με το επίπεδο άγχους. Η αδράνεια αποτελεί μια ιδιαίτερα επικίνδυνη συμπεριφορά, ειδικά σε περιπτώσεις όπου ο διαθέσιμος χρόνος διαφυγής είναι ελάχιστος.
- Η σύνδεση είναι η οικειότητα του ατόμου με τον χώρο από τον οποίο προσπαθεί να διαφύγει. Σύμφωνα με τον Sime, ένα άτομο θα απομακρυνθεί από τον κίνδυνο, χρησιμοποιώντας όμως την πιο οικεία σε αυτόν διαδρομή. Η τελευταία αυτή παράμετρος συνδέεται, όπως θα δούμε και παρακάτω, με την διαχείριση από το άτομο των πληροφοριών που διαθέτει.
- Ο αλτρουισμός είναι η συμπεριφορά εκείνη όπου το άτομο έχει ως πρώτο στόχο να βοηθήσει άλλους να διαφύγουν τον κίνδυνο. Η αλτρουιστική συμπεριφορά όμως κατευθύνεται συνήθως προς άλλα άτομα με τα οποία το συνδέουν οικογενειακοί ή κοινωνικοί δεσμοί. (Muir, Bottobley, & Marrison, 1996)

4.2 Λήψη αποφάσεων σε καταστάσεις κινδύνου

Η G. Proulx, εκφράζει την άποψη η συμπεριφορά ενός ατόμου που προσπαθεί να διαφύγει από έναν χώρο σε περίπτωση πυρκαγιάς, μπορεί να απλοποιηθεί σε μια **διαδικασία επίλυσης ενός προβλήματος** (problem-solving) και **λήψης αποφάσεων** (decision-making).

Η διαδικασία επίλυσης ενός προβλήματος χωρίζεται σε τέσσερα βασικά στάδια: α) την αναγνώριση του προβλήματος, β) τον καταρτισμό ενός σχεδίου επίλυσης, γ) την εκτέλεση του σχεδίου και δ) την αξιολόγηση εάν το σχέδιο αυτό ήταν αποτελεσματικό. Σε περιπτώσεις πυρκαγιάς, η αναγνώριση του προβλήματος σημαίνει ότι το άτομο αρχικά να συγκεντρώσει όσες περισσότερες πληροφορίες μπορεί για την κατάσταση. Οι πηγές πληροφόρησης μπορεί να είναι σήματα κινδύνου, άλλα άτομα, η παρουσία καπνού κλπ. (Proulx, 1993) Σύμφωνα με τους Sime και Kimura, το στάδιο αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς μπορεί να προκαλέσει σημαντική και συχνά μοιραία καθυστέρηση στην προσπάθεια του ατόμου να διαφύγει. (Sime & Kimura, 1988) Η επάρκεια και η αξιοπιστία των πληροφοριών που θα συγκεντρώσει, θα αποτυπωθεί στη συνέχεια στο σχέδιο που θα καταρτίσει. Μετά την συγκέντρωση των πληροφοριών, ακολουθεί η εκτέλεση του σχεδίου. Κατά την διάρκειά της όμως, καθώς οι συνθήκες μεταβάλλονται και το άτομο συγκεντρώνει περισσότερες πληροφορίες, καλείται να αξιολογήσει τις προηγούμενες αποφάσεις του σχετικά με την διαφυγή. (Lazarus & Folkman, 1984)

Όσον αφορά τη λήψη των αποφάσεων σε κατάσταση κινδύνου, οι Janis και Mann αναγνωρίζουν δυο βασικές διαφορές σε σχέση με την λήψη αποφάσεων σε φυσιολογικές συνθήκες: α) αυτά που έχει να χάσει το άτομο σε περίπτωση λανθασμένων επιλογών είναι πολύ πιο σημαντικά, καθώς περιλαμβάνουν την επιβίωσή του καθώς και την επιβίωση άλλων ατόμων με τα οποία το συνδέουν ισχυροί δεσμοί και β) ο διαθέσιμος χρόνος για να λάβει μια απόφαση είναι περιορισμένος. (Janis & Mann, 1977) Η G. Proulx προσθέτει και μια τρίτη παράμετρο: τις συνήθως συγκεχυμένες και ανεπαρκείς πληροφορίες που διαθέτει το άτομο καθώς και την αδυναμία του να τις διασταυρώσει λόγω έλλειψης χρόνου και μέσων. (Proulx, 1993) Οι Kahneman και Tversky θεωρούν ότι λόγω της αβεβαιότητας, τα άτομα τείνουν να επικεντρώνουν την προσοχή τους σε συγκεκριμένες πληροφορίες που θεωρούν πιο χρήσιμες και να αγνοούν τις υπόλοιπες. (Kahneman & Tversky, 1982) Οι Groner et al. υποστηρίζουν ότι αυτό συμβαίνει διότι το άτομο σε καταστάσεις κινδύνου έχει την ανάγκη να μειώσει το μέγεθος του προβλήματος (δηλαδή την διαφυγή του) σε ένα ψυχολογικά διαχειρίσιμο επίπεδο. (Groner, Groner, & Bischof, 1983) Σε αυτή τη λογική, ο Passini έχει εκφράσει την άποψη ότι το άτομο χρησιμοποιεί γνωστές διαδρομές διαφυγής διότι οι πληροφορίες που χρειάζεται να επεξεργαστεί είναι σαφώς λιγότερες, κάνοντας την διαδικασία λιγότερο απαιτητική. (Passini, 1984) Οι Benzur και Breznitz τονίζουν ότι οι αποφάσεις του ατόμου σε περιπτώσεις όπου υπάρχει πίεση χρόνου τείνουν να είναι λιγότερο παράτολμες. (Benzur &

Breznitz, 1981) Μεταφράζοντας το εύρημα αυτό στο πρόβλημα της διαφυγής, καταλήγουμε στο ότι τα άτομα θα δώσουν προτεραιότητα σε οικείες επιλογές (π.χ. η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη έξοδος από το συγκεκριμένο άτομο) και θα αγνοήσουν τις υπόλοιπες, θεωρώντας αυτές πιο επικίνδυνες.

4.3 Κατηγορίες συμπεριφοράς και παράγοντες επιλογής

Οι X. Pan et al έχουν αναγνωρίσει τρεις κατηγορίες συμπεριφοράς: την ατομική συμπεριφορά, την κοινωνική συμπεριφορά και την συμπεριφορά του πλήθους. Η ατομική συμπεριφορά ακολουθεί τρεις βασικές συμβάσεις:

- το **ένστικτο**, μια έμφυτη δηλαδή αντίδραση του ατόμου η οποία επαναλαμβάνεται όταν το άτομο υπόκειται σε συγκεκριμένα ερεθίσματα. Σε περιπτώσεις κινδύνου, όπου το άτομο καλείται να λάβει άμεσα αποφάσεις υπό το καθεστώς υψηλού στρες, το να ακολουθήσει το ένστικτό του είναι η πιο απλή επιλογή. Ωστόσο, ενστικτώδεις συμπεριφορές όπως ο φόβος, μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα κατά τη διαφυγή (σπρωξίματα, βίαιες συμπεριφορές).
- η **εμπειρία**. Ο άνθρωπος βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην προηγούμενη εμπειρία του ώστε να λάβει αποφάσεις. Επειδή οι διάφορες καταστάσεις είναι συνήθως επαναλαμβανόμενες, το άτομο τείνει να φτιάχνει συγκεκριμένες ρουτίνες με βάση την προηγούμενη εμπειρία του και τις οποίες εφαρμόζει όποτε βρεθεί σε παρόμοιες καταστάσεις στο μέλλον. Έτσι, σε περιπτώσεις κινδύνου, οπότε και θα κληθεί να λάβει αποφάσεις ζωτικής σημασίας, ακολουθεί μια τυπική συμπεριφορά η οποία έχει τρία στάδια: 1) την αναγνώριση ότι η κατάσταση στην οποία βρίσκεται είναι ίδια ή παραπλήσια με μια ανάλογη εμπειρία του στο παρελθόν, 2) την ανάσυρση από την μνήμη του της ρουτίνας που ακολούθησε σε εκείνη την περίπτωση, και 3) την εκτέλεση αυτής της ρουτίνας.
- η **περιορισμένη λογική** (bounded rationality). Η βασική ιδέα είναι ότι το άτομο αναλύει τις διαθέσιμες επιλογές και αποφασίζει με το κατά πόσον οι συνέπειές τους είναι κοντά στους στόχους που έχει θέσει. Εδώ χρησιμοποιείται ο όρος «περιορισμένη», διότι αφενός είναι δύσκολο για το άτομο να γνωρίζει όλες τις εναλλακτικές και τις συνέπειές τους, αφετέρου πολύ συχνά οι στόχοι δεν είναι ξεκάθαροι την στιγμή που καλείται να λάβει την απόφαση. Τα βήματα για την λήψη της απόφασης, με βάση την περιορισμένη λογική, είναι τέσσερα: 1) αναζήτηση όλων των διαθέσιμων επιλογών, 2) αναγνώριση των συνεπειών κάθε επιλογής, 3) σύγκριση των συνεπειών με τους στόχους που έχει θέσει το άτομο, και 4) την εκτέλεση της καλύτερης επιλογής. Όπως είναι προφανές

όμως, η λήψη αποφάσεων με βάση την περιορισμένη λογική, είναι μια σαφώς πιο χρονοβόρα διαδικασία απ'ότι η χρήση του ενστίκτου ή της εμπειρίας. Έτσι, σε καταστάσεις κινδύνου, όπως μια πυρκαγιά, το άτομο αυθόρμητα χρησιμοποιεί περισσότερο το ένστικτο και την εμπειρία του.

Όσον αφορά την κοινωνική συμπεριφορά του ατόμου, οι συγγραφείς αναγνωρίζουν τέσσερις σημαντικούς παράγοντες:

- τον **κοινωνικό ρόλο** (social identity). Η κάθε κοινωνία αποτελείται από κοινωνικές δομές (social structures, π.χ. μια οικογένεια). Η κοινωνική δομή αποτελείται από άτομα με διαφορετικούς ρόλους (identities/roles). Ο ρόλος καθορίζεται από διάφορα χαρακτηριστικά του ατόμου, όπως το φύλο, η ηλικία, οι ικανότητες, η εμπειρία κλπ. και περιλαμβάνει ένα σύνολο κανόνων οι οποίοι καθορίζουν το πώς το άτομο αλληλεπιδρά με τα υπόλοιπα μέλη της δομής στην οποία ανήκει. Η λήψη των αποφάσεων με βάση τον κοινωνικό ρόλο ακολουθεί τέσσερα βήματα: 1) ανάλυση της κατάστασης στην οποία βρίσκεται το άτομο, 2) εντοπισμός του ατόμου/ρόλου που θα λάβει τις αποφάσεις για όλη την δομή/ομάδα, 3) επιλογή των κανόνων συμπεριφοράς που περιλαμβάνονται στον ρόλο αυτό, και 4) εφαρμογή των κανόνων αυτών. Ωστόσο, όπως αναφέρουν οι συγγραφείς, το αν το άτομο ακολουθήσει τους κανόνες που επιτάσσει ο κοινωνικός του ρόλος εξαρτάται κυρίως από τον χαρακτήρα τους και τα επίπεδα του στρες την δεδομένη στιγμή. Γι'αυτό, σε αναλύσεις που έχουν γίνει, φαίνεται ότι συμπεριφορά με βάση τον ρόλο εμφανίζουν άτομα εκπαιδευμένα για αυτό το σκοπό, όπως τα πληρώματα των πλοίων.
- τον **προσωπικό χώρο** (personal space): Σύμφωνα με παλαιότερες έρευνες (Ashcraft & Schefflen, 1976), ο άνθρωπος έχει έντονη την αίσθηση του προσωπικού χώρου, τον οποίο περικλείει με ορατά και αόρατα όρια και τα οποία απαιτεί από τους άλλους να σεβαστούν. Έτσι, κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες, θα προσπαθήσει να προστατεύσει τον χώρο αυτό από το να παραβιαστεί από άλλα άτομα. Αναφέρεται μάλιστα ότι πρόκειται για αμυντική λειτουργία, ώστε να διατηρηθούν ασφαλείς αποστάσεις και να αποφευχθεί η σωματική επαφή μεταξύ των ατόμων που κινούνται στον ίδιο χώρο. Το μέγεθος του προσωπικού χώρου διαφέρει ανάλογα με το φύλο, την κοινωνική δομή και την κουλτούρα του ατόμου, ωστόσο είναι ένας παράγοντας που έχει παρατηρηθεί σε όλες τις μελέτες για την κίνηση ενός ατόμου σε έναν χώρο όπου βρίσκονται και άλλα άτομα. Υπό φυσιολογικές συνθήκες, το άτομο θα κινηθεί με αυτή την αρχή, σε περιπτώσεις κινδύνου ωστόσο, όπου τα επίπεδα στρες είναι αυξημένα και στον χώρο βρίσκεται μεγάλο πλήθος (overcrowding), το άτομο τείνει να γίνει επιθετικό (π.χ. σπρωξίματα) προκειμένου να προστατεύσει τον «δικό» του χώρο.
- την **κοινωνική απόδειξη** (social proof): Η κοινωνική απόδειξη είναι η τάση του ατόμου να ακολουθεί ή να αντιγράφει τις αποφάσεις άλλων ατόμων που βρίσκονται στον ίδιο

χώρο, όταν οι πληροφορίες που διαθέτει είναι ανεπαρκείς. Δυο χαρακτηριστικοί τύποι συμπεριφορών σχετικών με την κοινωνική απόδειξη, είναι η μιμητική συμπεριφορά (herding behaviour) και η κοινωνική αναστολή (social inhibition). Η κοινωνική αναστολή είναι η συμπεριφορά εκείνη κατά την οποία τα μέλη μιας ομάδας αρνούνται, λόγω ανασφάλειας ή ανεπάρκειας πληροφοριών, να λάβουν μια απόφαση και αφήνουν την ευθύνη αυτή σε άλλο μέλος. Και οι δυο προαναφερόμενες συμπεριφορές είναι ιδιαίτερα επικίνδυνες κατά την διαδικασία διαφυγής, καθώς μπορούν να οδηγήσουν είτε σε αδράνεια, είτε σε τραυματισμούς ή ακόμα και θανάτους λόγω των λανθασμένων αποφάσεων του ατόμου που ακολουθούν όλοι οι υπόλοιποι.

Τέλος, όσον αφορά την συμπεριφορά του πλήθους, τέσσερις είναι οι καθοριστικοί παράγοντες:

- η **πυκνότητα** (crowd density): όσο αυξάνεται ο αριθμός ατόμων που βρίσκονται σε ένα χώρο, τόσο δυσκολεύει η κίνηση και αυξάνεται ο κίνδυνος. Έχει μάλιστα παρατηρηθεί ότι από ένα σημείο και μετά, είναι αδύνατο για το άτομο να κινηθεί προς την κατεύθυνση που έχει επιλέξει και παρασύρεται στην κατεύθυνση της ροής του πλήθους. Ωστόσο, όπως είπαμε και προηγουμένως σχετικά με τον κοινωνικό ρόλο, τα μέλη μιας ομάδας ή μιας κοινωνικής δομής προσπαθούν να παραμείνουν μαζί ακόμα και σε τέτοιες συνθήκες.
- η **διαρρύθμιση του χώρου** (environmental constraint): Η σωστή διαρρύθμιση του χώρου είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας στην συμπεριφορά ενός πλήθους που προσπαθεί να διαφύγει. Δεδομένων των αυξημένων επιπέδων στρες που παρατηρούνται σε περιπτώσεις κινδύνου και ειδικά πυρκαγιάς, η παρουσία επαρκών εξόδων, σωστού φωτισμού και σήμανσης καθώς και ο σχεδιασμός των οδών διαφυγής με επαρκείς διαστάσεις και χωρίς πολλές αλλαγές κατεύθυνσης είναι επιβεβλημένος προκειμένου να αποφύγουμε και φαινόμενα συμφόρησης αλλά και προβληματικές (non adaptive) συμπεριφορές που οδηγούν σε τραυματισμούς.
- η **αντίληψη αισθημάτων και έντασης** (perceived emotion and tension): Σε ένα επικίνδυνο συμβάν, λόγω της πίεσης του χρόνου και των ανεπαρκών πληροφοριών, δημιουργείται στο άτομο η αίσθηση ότι η κατάσταση είναι περισσότερο κρίσιμη απ'ότι στην πραγματικότητα. Επίσης, όταν ο άνθρωπος βρίσκεται σε μια αβέβαιη κατάσταση, υπολογίζει την κρισιμότητα αυτής με βάση τις αντιδράσεις και τα συναισθήματα των ατόμων με τα οποία έρχεται σε επαφή. Όταν λοιπόν κάποια άτομα μέσα στο διαφυγόν πλήθος αποκτήσουν αισθήματα φόβου ή γίνουν επιθετικά (π.χ. λόγω μπλοκαρίσματος εξόδων ή αύξησης επιπέδων καπνού), η συμπεριφορά αυτή εξαπλώνεται και στα υπόλοιπα άτομα μέσω της παραπάνω διαδικασίας.

Έχει παρατηρηθεί ότι ακόμα και σε φυσιολογικές συνθήκες (χωρίς δηλαδή την παρουσία κάποιου κινδύνου), μπορούν να εξαπλωθούν προβληματικές και επιθετικές συμπεριφορές.

Ωστόσο, όπως επισημαίνουν οι συγγραφείς, η σχετική έρευνα έχει δείξει ότι προκειμένου να συμβεί αυτό θα πρέπει ισχύουν και οι τρεις παράγοντες που προαναφέραμε, δηλαδή υψηλή πυκνότητα ατόμων στο χώρο, προβληματική διαρρύθμιση και ανεπαρκείς οδοί διαφυγής και συμβάντα όπως μπλοκαρίσματα, τραυματισμοί ή ανυπόστατες φήμες που αυξάνουν τα επίπεδα στρες και προκαλούν ακραία συναισθήματα. (Pan, Han, Dauber, & Law, 2006)

4.4 Τυπικές συμπεριφορές κατά την διαδικασία της διαφυγής από έναν χώρο

Οι Helbing και al. έχουν συγκεντρώσει μια σειρά από τυπικές συμπεριφορές που παρατηρούνται σε περιπτώσεις διαφυγής ενός πλήθους από κλειστούς χώρους:

1) οι επιβάτες συνήθως αποφεύγουν να κινηθούν με κατεύθυνση αντίθετη από αυτή της κύριας ροής, ακόμα και υπάρχει συνωστισμός προς την κατεύθυνση αυτή. Επίσης, έχει παρατηρηθεί ότι οι επιβάτες λαμβάνουν υπόψη παράγοντες όπως η ευχέρεια στην κίνηση ή οι υψομετρικές διαφορές, με αποτέλεσμα να επιλέγουν συνήθως την πιο γρήγορη και εύκολη διαδρομή έναντι αυτής με την μικρότερη απόσταση.

2) Οι επιβάτες προτιμούν να κινούνται με την πιο βολική για αυτούς ταχύτητα (ή αλλιώς, την λιγότερο ενεργοβόρα) εκτός και αν απαιτείται μεγαλύτερη ταχύτητα λόγω μειωμένου διαθέσιμου χρόνου. Η ταχύτητα αυτή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, με πιο σημαντικούς την ηλικία, το φύλο, την ώρα της ημέρας, τον περιβάλλοντα χώρο και τις συνθήκες εντός αυτού. Για κτίρια έχει υπολογιστεί ότι η ταχύτητα ακολουθεί κατανομή Gauss με μέση τιμή 1.34 m/s και τυπική απόκλιση 0.26 m/s.

3) Οι επιβάτες κρατούν αποστάσεις ο ένας από τον άλλο καθώς και από τα όρια του χώρου στον οποίο κινούνται (τοίχοι, έξοδοι, εμπόδια). Η απόσταση αυτή είναι μικρότερη όταν ο επιβάτης κινείται βιαστικά και ελαττώνεται όσο αυξάνεται η πυκνότητα επιβατών στο χώρο. (Helbing, Farkas, Molnar, & Vicsek, 2002)

Όσον αφορά τα πλοία, οι αναφορές στη βιβλιογραφία είναι ελάχιστες, και για αυτό τα διάφορα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί χρησιμοποιούν είτε τα συμπεράσματα σχετικών ερευνών σε κτίρια και άλλα μέσα μεταφοράς, είτε απλοποιήσεις όπως την ομαλή κίνηση όλων των επιβατών κατά μήκος των κύριων οδών διαφυγής και μόνο. Ωστόσο οι Pineiro et al., μετά από ανάλυση εκθέσεων σχετικά με ατυχήματα σε επιβατηγά πλοία, μας δίνουν μια κάπως διαφορετική εικόνα η οποία συνοψίζεται στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Οι περισσότεροι άνθρωποι δεν ξεκινούν να κινούνται προς τους χώρους συγκέντρωσης αμέσως με το που ακουστεί το σήμα από το σύστημα ειδοποίησης του πλοίου. Μεσολαβεί συνήθως ένα σημαντικό χρονικό διάστημα (awareness time), κατά το οποίο τα άτομα προσπαθούν να συλλέξουν πληροφορίες για την κατάσταση και να βρουν ή ειδοποιήσουν τους οικείους τους.
- Οι άνθρωποι ακολουθούν συνήθως την πιο γνωστή σε αυτούς διαδρομή και όχι τα σήματα που είναι τοποθετημένα στους χώρους του πλοίου.
- Σε γενικές γραμμές, οι άνθρωποι επηρεάζονται σημαντικά από τα άτομα του περιβάλλοντός τους που βρίσκονται μαζί τους.
- Τα σήματα που δίνουν οδηγίες ή κατευθύνσεις για την διαφυγή σπανίως ακολουθούνται, ειδικά αν είναι υπό μορφή κειμένου.
- Οι περιβαλλοντικοί και ψυχολογικοί περιορισμοί είναι ιδιαίτερα σημαντικοί και μάλιστα εμφανίζουν μεγάλες διαφοροποιήσεις όσον αφορά την επίπτωσή τους ανάμεσα στις διάφορες κατηγορίες ατόμων.
- Τα άτομα δεν διστάζουν να εισέλθουν σε περιοχές όπου η ορατότητα είναι περιορισμένη όταν γνωρίζουν καλά τον χώρο ή αν υπάρχει κάποιο άλλο άτομο που έχει αναλάβει τον ρόλο του επικεφαλής (π.χ. μέλος του πληρώματος) και τους κατευθύνει.
- Σε περιπτώσεις όπου υπάρχει συγκέντρωση μεγάλου πλήθους, και σε αντίθεση με την κοινή πεποίθηση, τα φαινόμενα πανικού είναι σπάνια. (Lopez Piñeiro, Pérez Arribas, Donoso, & Torres, 2005)

4.5 Πανικός

Ο πανικός είναι μια από τις πλέον προβεβλημένες συμπεριφορές σε περιπτώσεις ατυχημάτων ή φυσικών καταστροφών. Στις διάφορες αναφορές, κυρίως των μέσων μαζικής ενημέρωσης, ως πανικός περιγράφεται μια μαζική συμπεριφορά κατά την οποία τα εμπλεκόμενα άτομα λειτουργούν βίαια και παράλογα. Ωστόσο, όπως θα δούμε και παρακάτω, η συμπεριφορά του ατόμου υπό καθεστώς πανικού είναι αρκετά πιο σύνθετη.

Στην βιβλιογραφία έχουν διατυπωθεί διάφοροι ορισμοί σχετικά με τον πανικό. Η γενική άποψη είναι ο πανικός είναι ένας ξαφνικός φόβος, ο οποίος είναι τόσο ισχυρός ώστε να επιβληθεί στο άτομο και να εμποδίσει την ορθή κρίση και την λογική σκέψη, αντικαθιστώντας τα με ένα ακατανίκητο συναίσθημα άγχους και μανιώδη αναστάτωση, που μπορεί να παρομοιαστεί με συμπεριφορά ενός επιθετικού ζώου. (Davidson, Blankstein, Flett, & Neale, 2014)

Οι Rogsch et al. θεωρούν ότι επιβάλλεται, αντικαθιστά την λογική σκέψη και δύναται να επηρεάσει ταυτόχρονα ολόκληρες ομάδες ανθρώπων ή ζώων. Εμφανίζεται συνήθως σε περιπτώσεις καταστροφών, ατυχημάτων ή βίαιων περιστατικών, κατά τα οποία απειλείται η ζωή του ατόμου ή της ομάδας στην οποία ανήκει και χαρακτηρίζεται από εγωιστική, απροσάρμοστη αντίδραση και μη ελεγχόμενη φυγή, ακινησία ή αποδιοργάνωση που προκαλείται από έντονο φόβο. Η συμπεριφορά αυτή περιορίζεται συνήθως στο ίδιο το άτομο και δεν επηρεάζει άλλα άτομα που βρίσκονται στον ίδιο χώρο. Οι ίδιοι συγγραφείς τονίζουν ότι ο πανικός συνδέεται άμεσα με τις πληροφορίες που είναι διαθέσιμες στο άτομο, το οποίο βρίσκεται σε μια επικίνδυνη κατάσταση. Γι' αυτό το λόγο, εμφανίζεται συνήθως στα πρώτα λεπτά του συμβάντος και διαρκεί για όσο διάστημα οι πληροφορίες που λαμβάνει το άτομο είναι συγκεχυμένες (συνήθως για μερικά λεπτά). Επίσης αναφέρει ότι ο πανικός έχει «τοπικό» χαρακτήρα, εμφανίζεται δηλαδή σε άτομα τα οποία βρίσκονται πλησίον της εστίας κινδύνου. (Rogsch, Schreckenber, Tribble, Klingsch, & Kretz, 2010)

Οι X. Pan et al. διατυπώνουν την άποψη ότι όταν οι άνθρωποι αντιληφθούν κίνδυνο στο άμεσο περιβάλλον τους, η *συνειδητή* (conscious) *προσωπικότητα* αντικαθίσταται από *μη συνειδητή* (unconscious) *προσωπικότητα*. Η αλλαγή αυτή οδηγεί σε παράλογες συμπεριφορές, εκτός αν υπάρχει πλησίον αυτών μια ισχυρή (αρχηγική) προσωπικότητα, την οποία μπορούν να ακολουθήσουν. (Pan, Han, Dauber, & Law, 2006) Η συμπεριφορά αυτή παρομοιάζεται στην διεθνή βιβλιογραφία με αυτή ενός κοπαδιού ζώων (herding) και τονίζεται ότι μπορεί να αποβεί καταστροφική για τα μέλη της ομάδας που έχει αυθόρμητα δημιουργηθεί. (Saloma & Perez, 2007) Ωστόσο, άλλες πηγές αναφέρουν ότι η συμπεριφορά του ανθρώπου όταν βρίσκεται σε πανικό δεν είναι παράλογη, αλλά απόλυτα λογική με βάση τις πληροφορίες που είναι διαθέσιμες την συγκεκριμένη στιγμή. (Muir, Bottobley, & Marrison, 1996) (Henein & White, 2010)

Οι Illera et al. συνδέουν τον πανικό με τα επίπεδα στρες του ατόμου. Όσο αυξάνονται τα επίπεδα πανικού, το άτομο χάνει σταδιακά τις τέσσερις από τις πέντε αισθήσεις, γεγονός που οδηγεί σε μια κατάσταση η οποία ονομάζεται «σωληνοειδής» όραση και η οποία χαρακτηρίζεται από μειωμένη παρατηρητικότητα και περιορισμένο οπτικό πεδίο. Η κατάσταση αυτή κάνει τα άτομα να μην προσέχουν ή ακόμα και να αγνοούν τα διάφορα σήματα και ταμπέλες που τα κατευθύνουν σε μια έξοδο ή έναν χώρο συγκέντρωσης. Οι ίδιοι συγγραφείς τονίζουν ότι ο πανικός είναι ανεξάρτητος της ηλικίας του ατόμου και κατά συνέπεια, μπορεί να εμφανιστεί ακόμα και σε υγιή νεαρά άτομα, εάν αυτά είναι υπό το καθεστώς έντονου στρες. (Illera, et al., 2010)

Σύμφωνα με τους Helbing και Johansson, ο πανικός είναι η κατάρρευση της ομαλής, συνεργάσιμης συμπεριφοράς του ατόμου, που οφείλεται σε αγχώδεις αντιδράσεις σε ένα ένα

κρίσιμο συμβάν. Κατά τους συγγραφείς, ο πανικός χαρακτηρίζεται από την ταυτόχρονη προσπάθεια διαφυγής ενός μεγάλου αριθμού ατόμων από έναν πραγματικό ή φανταστικό κίνδυνο, η οποία μετατρέπεται σε μια πάλη για επιβίωση που μπορεί να οδηγήσει στο ποδοπάτημα (trampling) και την σύνθλιψη (crushing) κάποιων εξ αυτών. Τέλος, με βάση την διαθέσιμη βιβλιογραφία, εντοπίζουν τις ακόλουθες δέκα τυπικές συμπεριφορές που περιγράφουν τις αντιδράσεις ενός πλήθους ατόμων που προσπαθεί να διαφύγει υπό το καθεστώς πανικού:

- 1) Τα άτομα, λόγω του υπερβολικού άγχους, γίνονται νευρικά και επιθετικά.
- 2) Προσπαθούν να κινηθούν ταχύτερα από το κανονικό (γενικώς, σε καταστάσεις διαφυγής έχει παρατηρηθεί ότι τα άτομα κινούνται με την λιγότερο ενεργοβόρα και κατ'επέκταση βολική σε αυτούς ταχύτητα).
- 3) Το άτομο σπρώχνει όποιον θεωρήσει ότι εμποδίζει την κίνησή του, με αποτέλεσμα να προκαλεί γενικευμένες βίαιες συμπεριφορές.
- 4) Το πέρασμα από ένα στενό σημείο της διαδρομής (bottleneck) γίνεται ανοργάνωτο.
- 5) Στις εξόδους του χώρου όπου δημιουργούνται ουρές, προκαλούνται πολύ συχνά φρακαρίσματα λόγω της επιθετικής συμπεριφοράς των ατόμων.
- 6) Η επιθετική αυτή συμπεριφορά μπορεί να προκαλέσει τεράστιες δυνάμεις (έχουν υπολογιστεί μεγέθη έως και 4500 newton μεταξύ των ατόμων του πλήθους).
- 7) Το μέγεθος και η κατεύθυνση των δυνάμεων αυτών μπορεί να αλλάξει ξαφνικά, με αποτέλεσμα πολλά άτομα να πέφτουν στο έδαφος και να ποδοπατούνται από το διαφυγόν πλήθος.
- 8) Η διαδικασία της διαφυγής επιβραδύνεται, λόγω πεσμένων και τραυματισμένων ατόμων που μετατρέπονται σε «εμπόδια».
- 9) Τα άτομα υπό πανικό εμφανίζουν την λεγόμενη συμπεριφορά «κοπαδιού» (herding), εναπόκεινται δηλαδή σε άλλα άτομα, που είναι πιο ψύχραιμα, για την επιλογή της διαδρομής που θα ακολουθήσουν.
- 10) Οι εναλλακτικές έξοδοι και διαδρομές παραβλέπονται, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μεγαλύτερη συμφόρηση στις κύριες διαδρομές διαφυγής. (Helbing & Johansson, Pedestrian, crowd and evacuation dynamics, 2014)

4.6 Ταχύτητες κίνησης κατά τη διαφυγή

Στις προηγούμενες σελίδες είδαμε τους παράγοντες που καθορίζουν τις αποφάσεις των ατόμων που καλούνται να διαφύγουν από έναν κλειστό χώρο σε περίπτωση κινδύνου καθώς και κάποιες τυπικές συμπεριφορές που παρατηρούνται σε αυτές τις καταστάσεις. Σε αντίθεση με την συμπεριφορά, όπου τα στοιχεία που διαθέτουμε είναι κατά κύριο λόγο από άλλους τομείς (επίγειες κατασκευές, αεροπλάνα κλπ.), στο θέμα των ταχυτήτων κίνησης υπάρχουν αρκετές έρευνες που έχουν διεξαχθεί σε πλοία.

Με μια γρήγορη ματιά στη σχετική βιβλιογραφία, εντοπίζουμε τρεις παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα κίνησης ενός ατόμου στο εσωτερικό του πλοίου:

- 1) Την πυκνότητα επιβατών στους χώρους στους οποίους κινείται το άτομο.
- 2) Την κίνηση και την κλίση του πλοίου.
- 3) Την παρουσία καπνού, που περιορίζει την ορατότητα του ατόμου.

Στις επόμενες σελίδες θα δούμε αναλυτικά τις μελέτες και τα στοιχεία που έχουν προκύψει από αυτές.

4.6.1 Κλίση και κίνηση του πλοίου

Οι Katuhara et. al. περιγράφουν ένα πείραμα του Εθνικού Ινστιτούτου Θαλασσίων Ερευνών της Ιαπωνίας (NMRI), το οποίο ξεκίνησε το 1994 και διήρκεσε 3 χρόνια. Σε ένα πλοίο που ήταν αγκυροβολημένο σε λιμάνι, 70-120 φοιτητές ηλικίας 20 ετών καλούνταν κάθε φορά να διασχίσουν μια προκαθορισμένη διαδρομή εντός του πλοίου και ο χρόνος ολοκλήρωσης της διαδικασίας καταγράφονταν. Τα αποτελέσματα του πειράματος αυτού έδειξαν ότι η μέση ταχύτητα κίνησης σε ιδανικές συνθήκες (μηδενική κλίση και ακινησία του πλοίου) ήταν 1.7 m/s σε διαδρόμους και 0.7 m/s σε σκάλες. Η μέγιστη τιμή για την πυκνότητα επιβατών που καταγράφηκε σε οποιοδήποτε σημείο της διαδρομής ήταν 3 persons/m². (Katuhara et al., 1997) (Katuhara et al., 1998)

Σε άλλο πείραμα, πάλι του NMRI, 20 ενήλικες άνδρες και γυναίκες κινούνται στο εσωτερικό ενός πλοίου το οποίο βρίσκεται αγκυροβολημένο σε λιμάνι. Οι παράγοντες του πειράματος ήταν: α) σταθερή εγκάρσια κλίση μεταξύ 20 και -20 μοιρών, β) διατοιχισμός μεταξύ 20 και -20 μοιρών, με συχνότητα 5 και 10 δευτερολέπτων γ) διαγωγή 10 μοιρών με συχνότητα 5 και 10 δευτερολέπτων, και δ) πλάτος διαδρόμων που κινούνταν οι επιβάτες 1.2, 0.9 και 0.6 μέτρων. Οι ταχύτητες που μετρήθηκαν σε στατικές συνθήκες ήταν μεταξύ 1.23 και 1.25 m/s για μηδενική κλίση, ενώ με θετικές διαμήκεις κλίσεις μεταξύ 0.82 και 1.38 m/s με την ταχύτητα να

μειώνεται αναλογικά με την αύξηση της κλίσης. Αντίθετα, σε συνθήκες στατικής εγκάρσιας κλίσης δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές αλλαγές στις ταχύτητες. Τέλος, σε συνθήκες δυναμικών κλίσεων, οι ταχύτητες που παρατηρήθηκαν ήταν μεταξύ 0.71 και 0.90 m/s, σημαντικά μικρότερες από τις αντίστοιχες για στατικές κλίσεις. (Murayama, Itagaki, & Yoshida, 2000)

Οι Koss et al. μας δίνουν τα αποτελέσματα πειραμάτων που διενήργησε το αυστραλιανό ερευνητικό κέντρο Australian Maritime Engineering-Cooperative Research Center (AME CRC) σχετικά με το πώς επηρεάζει η κλίση του πλοίου την κίνηση σε διαδρόμους και σκάλες. Στα πειράματα αυτά συμμετείχαν 67 ενήλικες άνδρες και γυναίκες μεταξύ 18 και 25 ετών. Όσον αφορά τους διαδρόμους, η μέση ταχύτητα με μηδενική κλίση ήταν 1.65 m/s. Σε συνθήκες διαμήκους κλίσης και προς την κατηφορική κατεύθυνση η ταχύτητα μειωνόταν ανάλογα με την αύξηση της κλίσης, ενώ στην ανηφορική κατεύθυνση δεν παρατηρήθηκε αξιόλογη μεταβολή. Σε εγκάρσια κλίση, η ταχύτητες που παρατηρήθηκαν ήταν αισθητά μικρότερες από αυτές για μηδενική κλίση, ειδικά στην περίπτωση όπου δυο άτομα διέσχιζαν ταυτόχρονα τον διάδρομο. Όσον αφορά τις σκάλες, η μέση ταχύτητα χωρίς κλίση ήταν 1.50 m/s, για διαμήκεις θετικές κλίσεις δεν παρατηρήθηκαν διαφορές, για αρνητικές διαμήκεις κλίσεις οι ταχύτητες μειωνόταν δραστικά με την αύξηση της κλίσης, ενώ για τις εγκάρσιες κλίσεις η ταχύτητα μειωνόταν γραμμικά όσο αυξανόταν η κλίση. (Koss, Moore, & Porteous, 1997)

Οι ίδιοι επιστήμονες σε μεταγενέστερο χρόνο επανέλαβαν το πείραμά τους, αυτή τη φορά όμως το δείγμα περιελάμβανε 985 ανθρώπους διαφόρων ηλικιών και σωματικών ικανοτήτων. Σημαντικές διαφορές παρατηρήθηκαν όσον αφορά το φύλο στην κατηγορία των ατόμων άνω των 65 ετών καθώς οι άνδρες ήταν ταχύτεροι κατά 18% απ'ότι οι γυναίκες. Τα αποτελέσματα όσον αφορά τα άτομα με κινητικά προβλήματα ήταν τα αναμενόμενα, καθώς αυτά κινούνταν με αρκετά χαμηλότερη ταχύτητα. (Brumpley & Koss, 2000)

Στα πλαίσια του προγράμματος MEPdesign, το ερευνητικό ινστιτούτο TNO Human Factors διεξήγαγε ένα σχετικό με τα προηγούμενα πείραμα. Η πειραματική εγκατάσταση αποτελούνταν από μια καμπίνα με διαστάσεις 4x2.4x2.3 m, έναν διάδρομο και μια σκάλα, τα οποία ήταν τοποθετημένα σε ένα υδραυλικό σύστημα που προσομοίωνε τις κλίσεις και τις κινήσεις ενός πλοίου. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, 150 άτομα ηλικίας από 18 έως 83 ετών κλήθηκαν να διασχίσουν την καμπίνα, τον διάδρομο και την σκάλα. Σε στατικές συνθήκες και απουσία κλίσης, η μέση ταχύτητα στον διάδρομο μετρήθηκε σε 1.32 m/s. Η ταχύτητα αυτή μειωνόταν έως και 35% όταν η κλίση του διαδρόμου ήταν κατηφορική (θετική διαμήκης κλίση), ενώ όταν ήταν ανηφορική (αρνητική κλίση), καθώς και σε εγκάρσιες κλίσεις, η διαφορά ήταν αμελητέα. Στην σκάλα, η ταχύτητα σε μηδενική κλίση ήταν 0.48 m/s, έως και 40% μικρότερη σε θετικές διαμήκεις κλίσεις και 30% μικρότερη σε αρνητικές διαμήκεις κλίσεις. Σε εγκάρσιες κλίσεις, η διαφορά στην ταχύτητα ήταν αμελητέα. Στην περίπτωση της κίνησης του πλοίου, παρατηρήθηκε μείωση στην ταχύτητα που έφτασε έως και το 15% όσο αυξάνονταν οι

κλίσεις και οι συχνότητες της κίνησης. Τέλος, όσον αφορά την ηλικία τα άτομα άνω των 60 ετών ήταν περίπου 10-15% πιο αργά σε οποιεσδήποτε συνθήκες. (Bles, Nooy, & Boer, 2001)

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι παράγοντες απομείωσης των ταχυτήτων που εξήχθησαν από τα πειράματα του TNO Human Factors, για τις τρεις ηλικιακές κατηγορίες της οδηγίας MSC.1/Circ.1238.

Table 4:
Speed variation factors

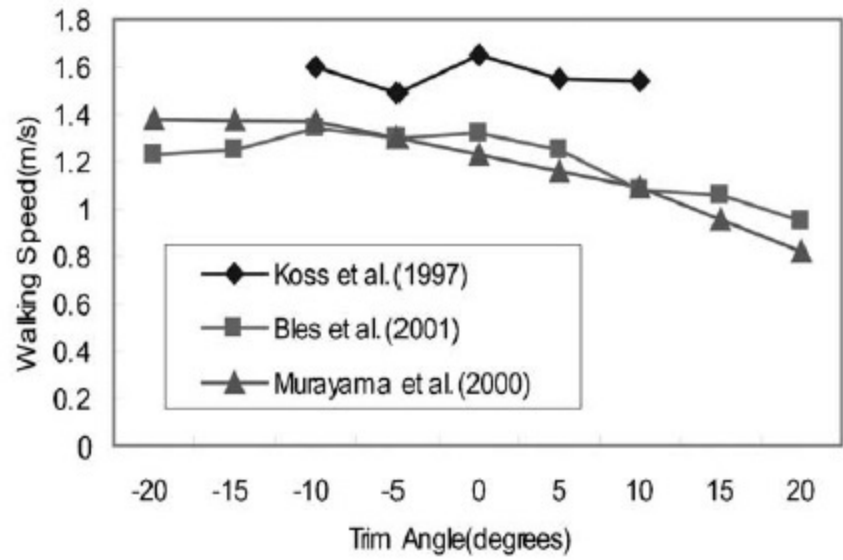
Speed variation factors for heeled surface			
Age Range	10° heel		20° heel
Young	0.94		0.88
Middle-aged	0.92		0.84
Senior	0.90		0.80

Speed variation factors for flat terrain subjected to trim				
Age Range	-20°	-10°	10°	20°
Young	0.94	0.99	0.88	0.73
Middle aged	0.94	0.99	0.86	0.67
Senior	0.88	0.97	0.86	0.67

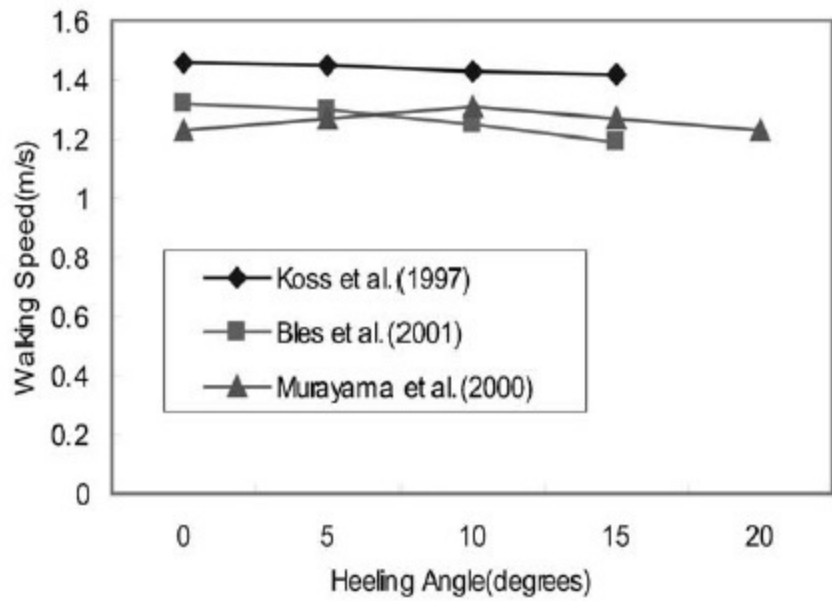
Speed variation factors for persons ascending/descending stairs subjected to lateral tilt				
Age Range	Ascending		Descending	
	10°	20°	10°	20°
Young	0.94	0.88	0.95	0.90
Middle-aged	0.98	0.95	0.96	0.93
Senior	0.95	0.90	0.92	0.85

Speed variation factors for persons ascending or descending stairs subjected to trim				
	Ascending			
	-20°	-10°	10°	20°
All age groups	1.02	1.03	0.84	0.68
	Descending			
	-20°	-10°	10°	20°
All age groups	0.77	0.84	1.00	0.80

Εικόνα 4.6.1.1: αποτελέσματα έρευνας ισοτιπούτου TNO Human Factors (Nicholls, et al., 2012)



(a) Comdor-Trim



(b) Comdor-Heeling

Εικόνα 4.6.1.2: αποτελέσματα ερευνών για την κίνηση υπό στατική κλίση

Όσον αφορά την επίδραση των δυναμικών κλίσεων, οι K. Yoshida, M. Murayama και T. Itakaki χρησιμοποίησαν μια πειραματική τράπεζα, η οποία και υπόκειται σε δυναμική εγκάρσια (rolling) και διαμήκη (pitching) κλίση, με περίοδο 5 και 10 sec. Σε κάθε εκτέλεση του πειράματος, ένα άτομο καλούνταν να διασχίσει την τράπεζα. Οι μέσες ταχύτητες διαμορφώθηκαν ως εξής:

Condition	Cycle	Walking speed (m/s)
Even level (no roll or pitch)	-----	0.90
Pitching in 10 degrees	10 seconds	0.73
	5 seconds	0.71
Rolling in 10 degrees	10 seconds	0.77
	5 seconds	0.72

Εικόνα 4.6.1.3: αποτελέσματα ερευνών του NMRI για την κίνηση υπο δυναμική κλίση

Σημειώνεται ότι, όπως και στα προηγούμενα πειράματα των ίδιων συγγραφέων, στα οποία αναφερθήκαμε παραπάνω, τα άτομα που συμμετείχαν ήταν άνδρες και γυναίκες διαφόρων ηλικιών.

4.6.2 Πυκνότητα επιβατών

Σύμφωνα με τους K. Ando et al., ένα άτομο καταλαμβάνει υπό φυσιολογικές συνθήκες χώρο 0.135 m^2 . Σε ακραίες συνθήκες η πυκνότητα επιβατών μπορεί να φθάσει σε τιμές έως και 15 p/m^2 , για πυκνότητες από 2 p/m^2 αρχίζει να παρατηρείται δυσκολία στην κίνηση των επιβατών, ενώ για τιμές πυκνότητας μεγαλύτερες από 4 p/m^2 αρχίζει να δημιουργείται έντονη συμφόρηση, η κίνηση ωστόσο είναι ακόμα δυνατή υπό προϋποθέσεις. (Ando K. et al., 1988)

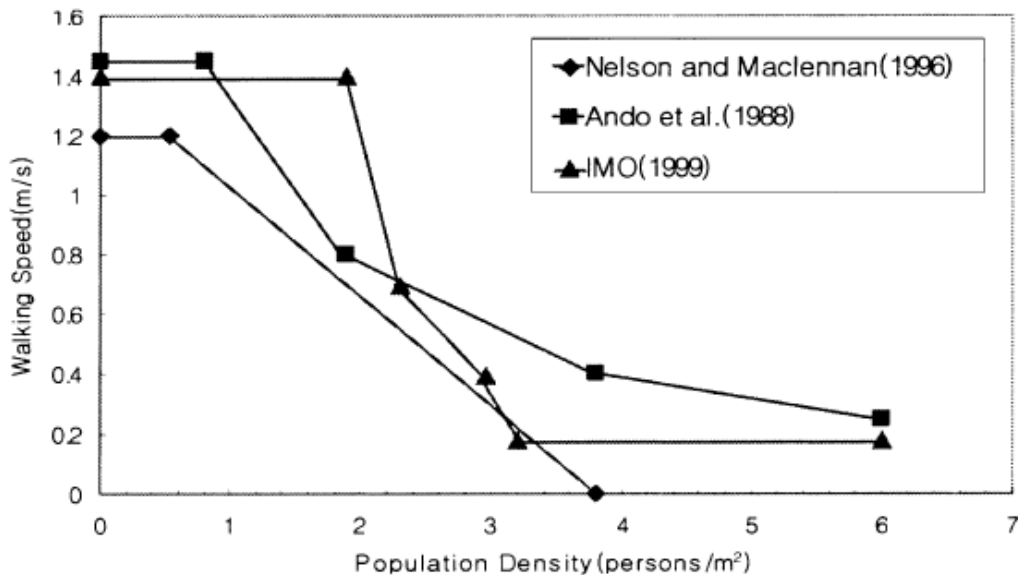
Οι Nelson και MacLennan εντόπισαν δυο κρίσιμες τιμές για την πυκνότητα επιβατών. Η κατώτερη τιμή 0.54 p/m^2 είναι το όριο πάνω από το οποίο η κίνηση αρχίζει να δυσχεραίνεται, ενώ η ανώτερη τιμή 3.54 p/m^2 είναι το όριο πάνω από το οποίο η κίνηση είναι αδύνατη. Επίσης, οι συγγραφείς θεωρούν ότι η ταχύτητα μειώνεται γραμμικά μεταξύ των δυο αυτών τιμών. (Nelson & MacLennan, 1996)

Ο R.A. Smith, κάνοντας μια βιβλιογραφική έρευνα σε σχετικές μελέτες, μας δίνει κάποιες τυπικές ταχύτητες: 1.3 m/s για πυκνότητα 0.1 p/m^2 , 0.7 m/s για πυκνότητα 2.2 p/m^2 και 0.3 m/s για πυκνότητα 4 p/m^2 . (Smith, 1995)

Οι Koss et al, στην έρευνα του AME CRC που είδαμε και προηγουμένως, εντοπίζουν το φαινόμενο όπου η κεφαλή, το μέσον και το τέλος του πλήθους κινούνται με διαφορετικές ταχύτητες, γεγονός που οδηγεί στον διαχωρισμό του. Οι ταχύτητες που υπολογίζουν στο

σχετικό πείραμα είναι: 1.32 m/s για την κεφαλή, 1.10 m/s για το μέσον και 0.80 m/s για το τέλος τους πλήθους. Επίσης, παρατήρησαν ότι όταν δυο ομάδες που κινούνται σε αντίθετη κατεύθυνση συναντηθούν, υπάρχει 50% μείωση στην ταχύτητα κίνησης και όταν οι δυο αυτές ομάδες κινούνται παράλληλα υπάρχει 20% μείωση της ταχύτητας. (Koss, Moore, & Porteous, 1997)

Τέλος, οι Murayama et al., σημειώνουν ότι η ταχύτητα του πλήθους μειωνόταν όσο μειωνόταν και το πλάτος του διαδρόμου στον οποίο κινούνταν. Οι σχετικές ταχύτητες ήταν: 0.60 m/s για 0.60 m πλάτος, 0.78 m/s για 0.90 m πλάτος και 0.93 m/s για 1.20 m πλάτος. (Murayama, Itagaki, & Yoshida, 2000)

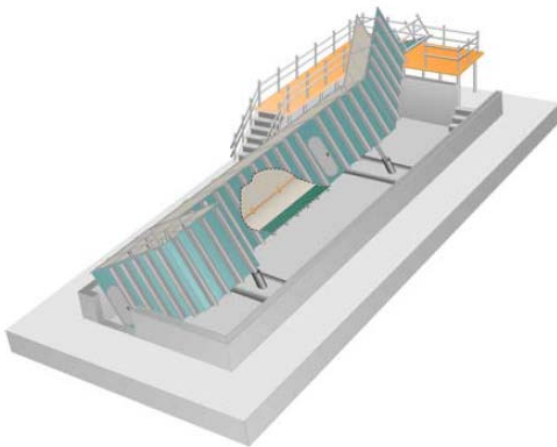


Διάγραμμα 4.6.2.1: αποτελέσματα ερευνών για την κίνηση σε χώρους με μεγάλη πυκνότητα επιβατών

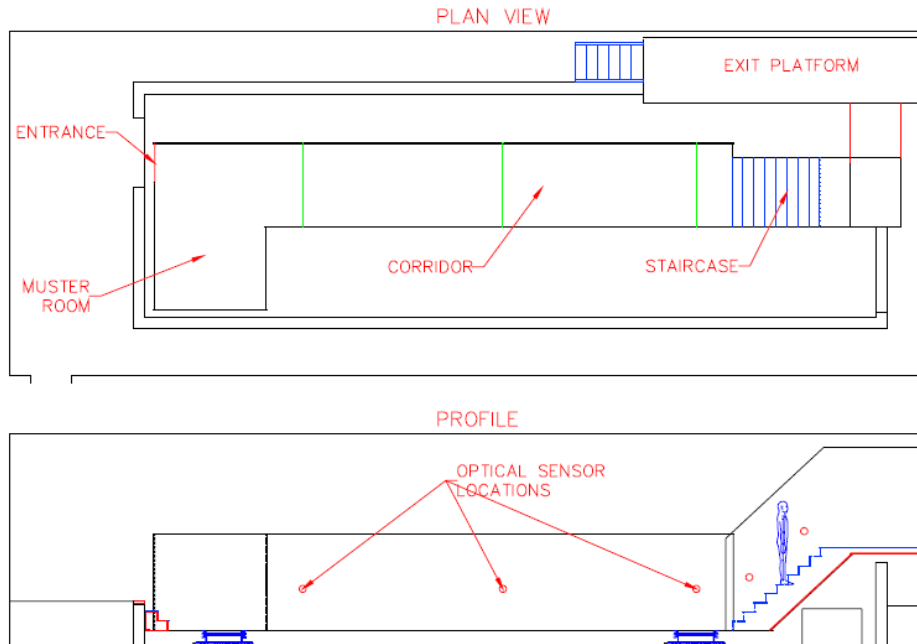
4.6.3 Ορατότητα

Κατά την περίοδο μεταξύ Μαΐου και Ιουλίου του 2003, η εταιρία BMT Fleet Technology σε συνεργασία με το υπουργείο μεταφορών του Καναδά (Transport Canada) και το πανεπιστήμιο του Greenwich, διενήργησε πειράματα σχετικά με τις ταχύτητες κίνησης υπό συνθήκες περιορισμένης ορατότητας. Τα πειράματα διενεργήθηκαν στην πειραματική διάταξη SHEBA (Ship Evacuation Behaviour Assessment, <http://www.rina.org.uk/sheba-facility.html>) που κατασκευάστηκε από την ίδια εταιρία με την χρηματοδότηση της καναδικής κυβέρνησης.

Η διάταξη SHEBA αποτελείται από έναν χώρο συγκέντρωσης (muster room) διαστάσεων 3.65 m x 2.4 m, μια σκάλα πλάτους 1.53 m (1.30 m καθαρό πλάτος μεταξύ των πλευρικών κιγκλιδωμάτων) αποτελούμενη από 9 σκαλιά ύψους 200 mm και έναν διάδρομο μήκους 11 m και πλάτους 1.89 m (1.63 m μεταξύ πλευρικών κιγκλιδωμάτων). Η διάταξη εδράζεται σε ειδικό υδραυλικό σύστημα που επιτρέπει την προσομοίωση κλίσεων έως γωνίας 22 μοιρών. Εντός του χώρου υπάρχουν τοποθετημένες όλες οι σημάνσεις και οι φωτισμοί που προβλέπονται από την σύμβαση SOLAS για τους χώρους ενός πλοίου.



Εικόνα 4.6.3.1: Η πειραματική διάταξη SHEBA (Glenn, Igloliorte, Galea, & Gautier, 2003)



Εικόνα 4.6.3.2: Πρόσοψη και κάτοψη της πειραματικής διάταξης SHEBA (Glenn, Igloliorte, Galea, & Gautier, 2003)

Κατά τη διάρκεια του πειράματος, γκρουπ από 15 έως 20 ατόμων έπρεπε να διασχίσουν την διάταξη είτε προς την ίδια κατεύθυνση, είτε προς αντίθετες κατευθύνσεις. Τα πειράματα έγιναν για μηδενικές κλίσεις και επίπεδα καπνού που αντιστοιχούσαν σε ορατότητες 0.1, 0.5 και 1.0 OD/meter. Το πείραμα επαναλαμβανόταν τέσσερις φορές για τον κάθε συνδυασμό συνθηκών. Τα γκρουπ αποτελούνταν από άνδρες και γυναίκες, χωρισμένους σε δυο ηλικιακές κατηγορίες: άνω και κάτω των 50 ετών. Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν και στοιχεία από αντίστοιχα πειράματα που έγιναν το 2001 στην ίδια εγκατάσταση και από τα οποία προέκυψαν οι ταχύτητες κίνησης που εφαρμόζονται στο μοντέλο maritimeEXODUS.

Η δημογραφική κατανομή των ατόμων σε σχέση με την ορατότητα του κάθε πειράματος ήταν η ακόλουθη:

2003 Trials	Optical Density (OD/m)		
	0.1	0.5	1
Male < 50	45	53	21
Male 50+	25	18	22
Female < 50	39	35	27
Female 50+	24	22	21

Εικόνα 4.6.3.3: δημογραφική κατανομή ατόμων στην έρευνα της BMT Fleet Technology

Ταχύτητες σε διάδρομο

Για τις ταχύτητες σε διάδρομο, διακρίνονται δυο περιπτώσεις: στην πρώτη περίπτωση το άτομο εκκινεί από τον χώρο συγκέντρωσης και κατευθύνεται προς την σκάλα, ενώ στην δεύτερη περίπτωση εκκινεί από τη σκάλα και κατευθύνεται προς τον χώρο συγκέντρωσης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στους επόμενους πίνακες:

	Optical Density (OD/m)			
	0	0.1	0.5	1
Male < 50	2.32	2.65	1.79	1.42
Male >= 50	1.86	2.03	1.39	1.11
Female < 50	2.06	2.27	1.58	1.24
Female >= 50	1.58	1.55	0.91	0.95

Εικόνα 4.6.3.4: μέγιστες ταχύτητες προς την κατεύθυνση της σκάλας

	Optical Density (OD/m)			
	0	0.1	0.5	1
Male < 50	2.42	2.68	1.85	1.58
Male >= 50	1.87	1.93	1.45	1.10
Female < 50	2.17	2.26	1.60	1.40
Female >= 50	1.61	1.49	0.95	0.99

Πίνακας 4.6.3.5: μέγιστες ταχύτητες προς την κατεύθυνση του χώρου συγκέντρωσης

Από τα παραπάνω αποτελέσματα εξάγονται δυο χρήσιμες παρατηρήσεις: πρώτον, τα χαμηλά επίπεδα καπνού (0.1 OD/m) δείχνουν να αυξάνουν ελαφρώς την ταχύτητα κατά μήκος του διαδρόμου και δεύτερον, οι ταχύτητες προς την κατεύθυνση της σκάλας είναι χαμηλότερες για όλα τα επίπεδα καπνού σε σχέση με την κίνηση προς την αντίθετη κατεύθυνση, και αυτό γιατί τα άτομα κινούνταν πιο προσεκτικά όταν πλησίαζαν τη σκάλα.

Ταχύτητες σε σκάλα

Όπως και στην περίπτωση του διαδρόμου, έτσι κι εδώ διακρίνονται δυο περιπτώσεις: το άτομο ανεβαίνει ή κατεβαίνει τη σκάλα. Τα αποτελέσματα ήταν τα ακόλουθα:

	Optical Density (OD/m)			
	0	0.1	0.5	1
Male < 50	1.37	1.53	1.22	1.00
Male >= 50	0.91	0.96	0.97	0.64
Female < 50	1.05	1.23	0.97	0.92
Female >= 50	0.72	0.71	0.59	0.62

Πίνακας 4.6.3.6: μέγιστες ταχύτητες ανόδου της σκάλας

	Optical Density (OD/m)			
	0	0.1	0.5	1
Male < 50	1.24	1.32	1.12	1.00
Male >= 50	0.92	0.92	0.82	0.62
Female < 50	1.07	1.09	0.92	0.82
Female >= 50	0.71	0.61	0.52	0.53

Πίνακας 4.6.3.7: μέγιστες ταχύτητες καθόδου της σκάλας

Στα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρούμε ότι οι ταχύτητες καθόδου της σκάλας είναι σταθερά μικρότερες από τις ταχύτητες ανόδου σε όλες τις καταστάσεις ορατότητας. Η παρατήρηση αυτή είναι λογική, με την έννοια ότι όταν το άτομο κατεβαίνει μια σκάλα είναι πιο προσεκτικό, με αποτέλεσμα η ταχύτητά του να είναι μικρότερη. (Gruchy, 2004)

5. ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΑΦΥΓΗΣ ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

5.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Όπως είπαμε και στην εισαγωγή της παρούσας εργασίας, στόχος μας ήταν να παρουσιάσουμε ένα μοντέλο το οποίο θα βοηθά τον μελετητή ναυπηγό να ελέγξει αν οι χώροι ενδιαίτησης που σχεδιάζει είναι επαρκείς όσον αφορά την έγκαιρη διαφυγή των επιβατών σε περίπτωση πυρκαγιάς. Μελετώντας τη σχετική βιβλιογραφία που παραθέσαμε στα προηγούμενα κεφάλαια, διαπιστώσαμε ότι οι προτεινόμενες μεθοδολογίες του IMO καθώς και τα περισσότερα από τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί:

- δεν λαμβάνουν υπόψη τους περιβαλλοντικούς παράγοντες, οι οποίοι εμποδίζουν την κίνηση των επιβατών και θέτουν σε κίνδυνο την ζωή τους (όπως είναι ο καπνός και οι τοξικές εκλύσεις στην περίπτωση της πυρκαγιάς)
- προχωρούν σε απλουστεύσεις όσον αφορά τις επιλογές και την συμπεριφορά των επιβατών, οι οποίες έρχονται σε αντίθεση με τις καταγεγραμμένες συμπεριφορές και μειώνουν την ρεαλιστικότητα της προσομοίωσης.

Λόγω του γεγονότος ότι η ανάπτυξη ενός μοντέλου διαφυγής εκ του μηδενός ξεπερνά κατά πολύ τα πλαίσια μιας διπλωματικής εργασίας, αποφασίσαμε να βασιστούμε σε κάποιο ήδη υπάρχον μοντέλο και να το προσαρμόσουμε ώστε να είναι κατάλληλο για την μελέτη ενός επιβατηγού πλοίου.

Το μοντέλο στο οποίο βασιστήκαμε παρουσιάστηκε το 2013 από το πανεπιστήμιο Carleton του Καναδά και αφορά την διαφυγή από κτίρια στα οποία έχει ξεσπάσει πυρκαγιά. Το μοντέλο αυτό έχει αναπτυχθεί ώστε να χρησιμοποιηθεί σε ένα υπολογιστικό πακέτο ανάλυσης ρίσκου πυρκαγιάς με την ονομασία CURisk. (Zhang X., Li X., Hadjisophocleous G., 2013) Οι λόγοι για τους οποίους επιλέξαμε το συγκεκριμένο μοντέλο είναι οι ακόλουθοι:

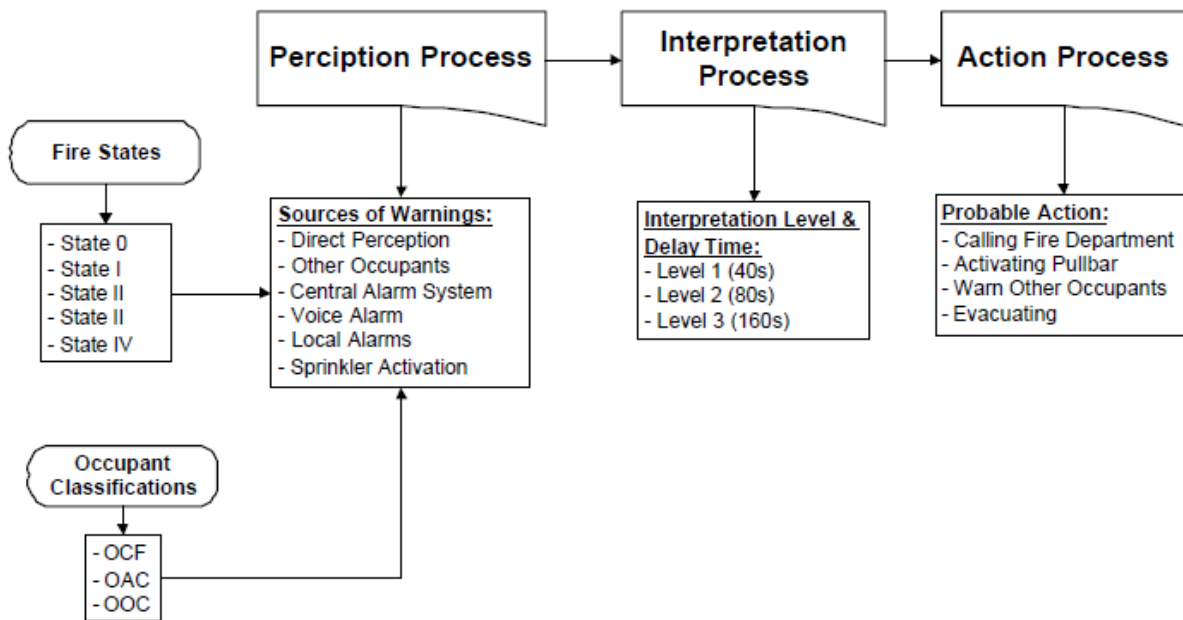
- 1) Περιλαμβάνει μια μέθοδο επιλογής της διαδρομής του κάθε επιβάτη με βάση την συνηθισμένη διαδρομή που ακολουθεί εντός του χώρου και τις συνθήκες που επικρατούν (πυκνότητα επιβατών, ορατότητα, θερμοκρασία) όταν κληθεί να επιλέξει μεταξύ διαφόρων εναλλακτικών διαδρομών. Η μέθοδος αυτή συνάδει με τα συμπεράσματα της βιβλιογραφίας
- 2) Χρησιμοποιεί coarse network για την μοντελοποίηση του χώρου, γεγονός που κάνει πιο εύκολη την εισαγωγή δεδομένων από τα διαθέσιμα προγράμματα μοντελοποίησης πυρκαγιάς. Επίσης, τα μοντέλα έχουν μικρότερη πολυπλοκότητα επομένως είναι απλούστερα στην ανάπτυξη και απαιτούν σαφώς μικρότερη υπολογιστική ισχύ.

Με βάση λοιπόν την κατηγοριοποίηση των μοντέλων διαφυγής που είδαμε στο κεφάλαιο 3, το μοντέλο του Carleton ανήκει στις ακόλουθες κατηγορίες:

- 1) Από την άποψη της αναπαράστασης του χώρου, είναι **αδρό δίκτυο** (coarse network) μοντέλο, δηλαδή οι διάφοροι χώροι αναπαριστώνται ως κόμβοι ενός γράφου και οι πόρτες ως ακμές που τους συνδέουν.
- 2) Από την άποψη της μοντελοποίησης της κίνησης των ατόμων, είναι **μικροσκοπικό** (microscopic) μοντέλο καθώς το κάθε άτομο αναπαριστάται ξεχωριστά, ως ένας ψηφιακός agent.
- 3) Από την άποψη της περιγραφής του πληθυσμού, είναι **μεμονωμένης προοπτικής** (individual perspective) καθώς το κάθε άτομο έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά (π.χ. ηλικία, ταχύτητα κίνησης κλπ.)
- 4) Από την άποψη της μοντελοποίησης συμπεριφοράς, βασίζεται σε **καθολικούς κανόνες** (rule based) καθώς χρησιμοποιεί κανόνες κοινούς για όλα τα άτομα.

Το μοντέλο του Carleton, εκτός από το μοντέλο διαφυγής, περιλαμβάνει και άλλα δυο υπομοντέλα (sub-models): ένα μοντέλο προσομοίωσης πυρκαγιάς και εξάπλωσης του καπνού (fire growth and smoke movement model) και ένα μοντέλο απόκρισης ατόμων (occupant response model). Το μοντέλο προσομοίωσης πυρκαγιάς είναι ένα διζωνικό μοντέλο που έχουν αναπτύξει οι ίδιοι συγγραφείς, για το οποίο όμως δεν μας δίνουν ιδιαίτερες πληροφορίες.

Το μοντέλο απόκρισης των ατόμων (OCRM) έχει αναπτυχθεί από το Εθνικό Συμβούλιο Έρευνας του Καναδά (NRC-CNRC) και χρησιμοποιείται για να εκτιμήσει, συναρτήσει του χρόνου, τις πιθανότητες ώστε τα άτομα που βρίσκονται εντός του κτιρίου να προβούν σε διάφορες πράξεις όπως να καλέσουν την πυροσβεστική, να ειδοποιήσουν άλλους ενοίκους σχετικά με τον κίνδυνο ή να εκκινήσουν την διαφυγή τους από αυτό. (Raboud, Benichou, Kashef, Proulx, & Hadjisorphocleous, 2002) Η γενική δομή του μοντέλου απόκρισης φαίνεται στην επόμενη εικόνα.



5.1.1: δομή υπο-μοντέλου απόκρισης του μοντέλου του Carleton

Από τη στιγμή που δεν μας δίνονταν πληροφορίες σχετικά με το μοντέλο πυρκαγιάς, αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο CFAST του ερευνητικού ιδρύματος NIST. Πρόκειται για ένα διζωνικό μοντέλο που χρησιμοποιείται ευρέως στον τομέα της κατασκευής κτιρίων, αλλά σύμφωνα με τη βιβλιογραφία μπορεί να εφαρμοστεί με καλά αποτελέσματα και στην περίπτωση του πλοίου.

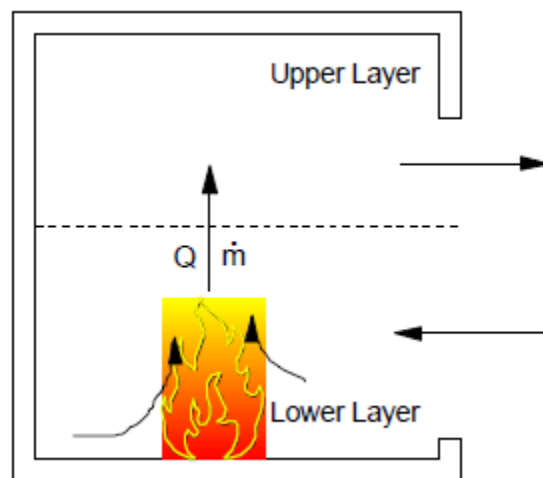
Εκτός από τις αλλαγές που έχουμε κάνει στο μοντέλο του Carleton, έχουμε προσθέσει σε αυτό και ένα μοντέλο τοξικότητας (toxicity model) το οποίο βασίζεται στην θεωρία του D.A. Purser για τις τοξικές εκλύσεις της πυρκαγιάς και την επίδρασή τους στους επιβάτες.

Στις επόμενες σελίδες θα δούμε αναλυτικά το μοντέλο πυρκαγιάς CFAST και το μοντέλο κινδύνου του Purser. Ακολούθως θα περιγράψουμε το μοντέλο του Carleton και τις αλλαγές και προσθήκες που έχουμε κάνει σε αυτό. Επίσης, στο τέλος του κεφαλαίου αυτού παρατίθενται αναλυτικά οι δοκιμές που προτείνει ο IMO για την επαλήθευση των μοντέλων διαφυγής, καθώς και τα αποτελέσματα αυτών στο μοντέλο που παρουσιάζουμε. Επίσης, έχουμε κατασκευάσει ένα σετ σεναρίων προκειμένου να επιδείξουμε και να συζητήσουμε τις δυνατότητες του μοντέλου.

5.2 Μοντέλο πυρκαγιάς CFAST

Το μοντέλο CFAST (Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport) δημιουργήθηκε από το κρατικό ερευνητικό ινστιτούτο NIST (National Institute of Standards and Technology) την Ηνωμένων Πολιτειών, με την πρώτη του έκδοση να κυκλοφορεί τον Ιούνιο του 1990. Βασίζεται στο παλαιότερο μοντέλο CCFM του ίδιου ινστιτούτου και συνεχίζει να εξελίσσεται, με την τρέχουσα να είναι η 6^η του έκδοση. Έχει σχεδιαστεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι απλό στην χρήση, αλλά να δίνει στον μελετητή αξιόπιστα και ρεαλιστικά αποτελέσματα σχετικά με την παραγωγή και μεταφορά θερμότητας, τοξικών αερίων και θερμοκρασίας σε όλους τους χώρους της υπό μελέτη κατασκευής. (Peacock, Reneke, & Forney, 2013)

Το CFAST ανήκει στην οικογένεια των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων και ειδικότερα στα διζωνικά μοντέλα (two-zone fire models). Στα διζωνικά μοντέλα, ο υπό μελέτη χώρος διαιρείται καθ' ύψος σε δυο ζώνες: την ανώτερη θερμή ζώνη, όπου συγκεντρώνεται ο καπνός και το μεγαλύτερο μέρος των παραγόμενων αερίων και την κατώτερη ψυχρή ζώνη, μέσω της οποίας εισέρχεται ο αέρας που τροφοδοτεί την πυρκαγιά. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί ένα σετ διαφορικών εξισώσεων οι οποίες έχουν προκύψει από τις αρχές της διατήρησης μάζας και ενέργειας, το νόμο των ιδανικών αερίων και εξισώσεις σχετικά με την πυκνότητα και την εσωτερική ενέργεια. Οι εξισώσεις αυτές εκτιμούν ως συνάρτηση του χρόνου την πίεση, το ύψος της κάθε ζώνης και τις θερμοκρασίες με βάση την συσσώρευση μάζας και την ενθαλπία σε κάθε μια από τις δυο ζώνες. (Floyd, 2002)



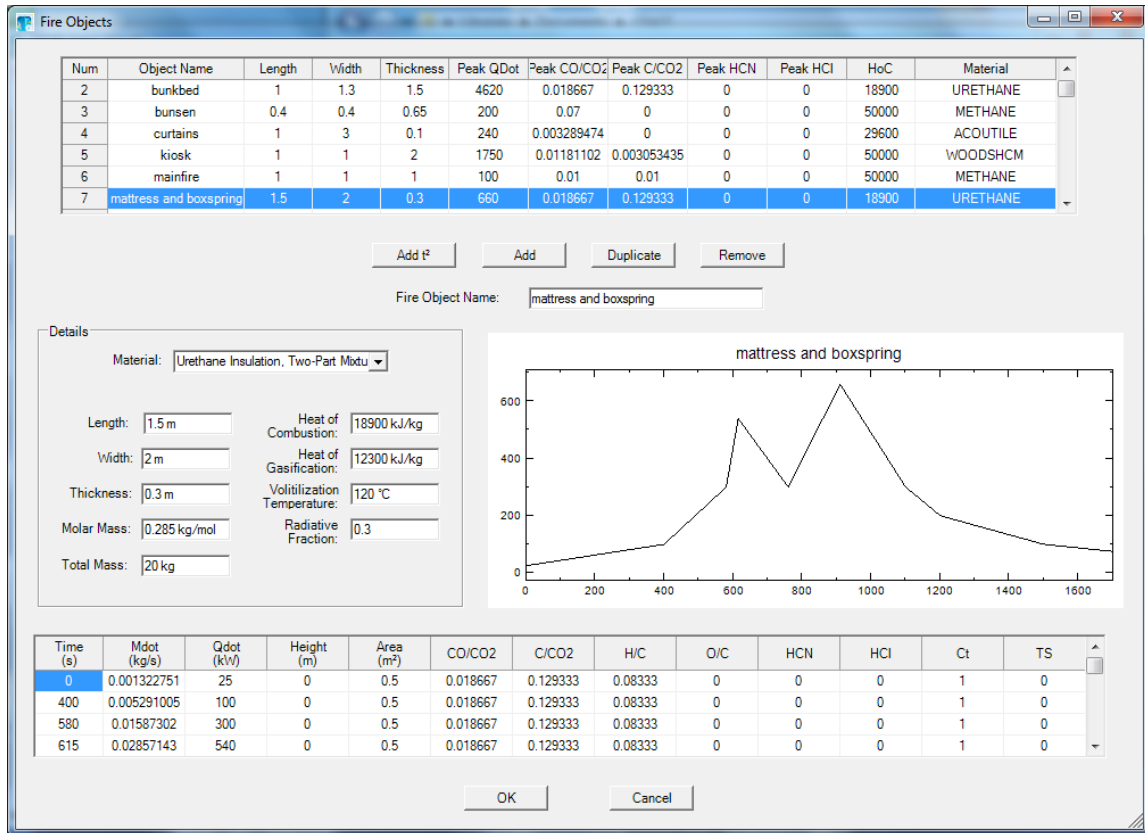
Εικόνα 5.2.1: η θεωρία των διζωνικών μοντέλων

Τα δεδομένα που εισάγονται στο μοντέλο είναι:

- Οι διαστάσεις των διαφόρων διαμερισμάτων
- Τα υλικά κατασκευής του κάθε διαμερίσματος
- Οι ιδιότητες των διαφόρων υλικών (θερμική αγωγιμότητα, ειδική θερμότητα, πυκνότητα, πάχος, θερμότητα καύσης)
- Διαστάσεις και θέσεις οριζόντιων και κάθετων ανοιγμάτων, όπως πόρτες, παράθυρα και οπές εξαερισμού
- Προδιαγραφές εγκατεστημένων συστημάτων μηχανικού εξαερισμού
- Ιδιότητες της πυρκαγιάς (ρυθμός έκλυσης θερμότητας, όριο συγκέντρωσης οξυγόνου και παραγωγή αέριων προϊόντων ως συνάρτηση του χρόνου)
- Προδιαγραφές εγκατεστημένων συστημάτων εντοπισμού (detectors) και αυτόματης κατάσβεσης (sprinklers)
- Θέσεις, μεγέθη και χαρακτηριστικά στόχων (targets)

Όσον αφορά την πυρκαγιά, ο χρήστης έχει δυο επιλογές: είτε την σχεδίαση μιας πυρκαγιάς μέσω της δημιουργίας μιας τυπικής καμπύλης του ρυθμού έκλυσης θερμότητας (heat release rate – HRR curve), είτε την δημιουργία ενός σεναρίου όπου ορίζει το αντικείμενο από το οποίο ξεκινά η πυρκαγιά καθώς και την έκλυση θερμότητας της πηγής.

Για την διευκόλυνση του χρήστη, το πρόγραμμα CFAST περιλαμβάνει έναν κατάλογο από συνήθη αντικείμενα, όπως κρεβάτια, γραφεία και καρέκλες, διαφορετικών τύπων και υλικών κατασκευής καθώς και τις θερμικές τους ιδιότητες. Την ίδια δυνατότητα μας δίνει και για τα διαχωριστικά χώρων, με μια πλειάδα συνήθων υλικών όπως χάλυβα, αλουμίνιο, τούβλο, πολυουρεθάνη κλπ. Επίσης ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να τοποθετήσει εντός του κατασκευαζόμενου χώρου συστήματα πυρόσβεσης όπως αισθητήρες και sprinklers, είτε αυτόνομα είτε με ταυτόχρονη ενεργοποίηση μέσω αισθητήρα.



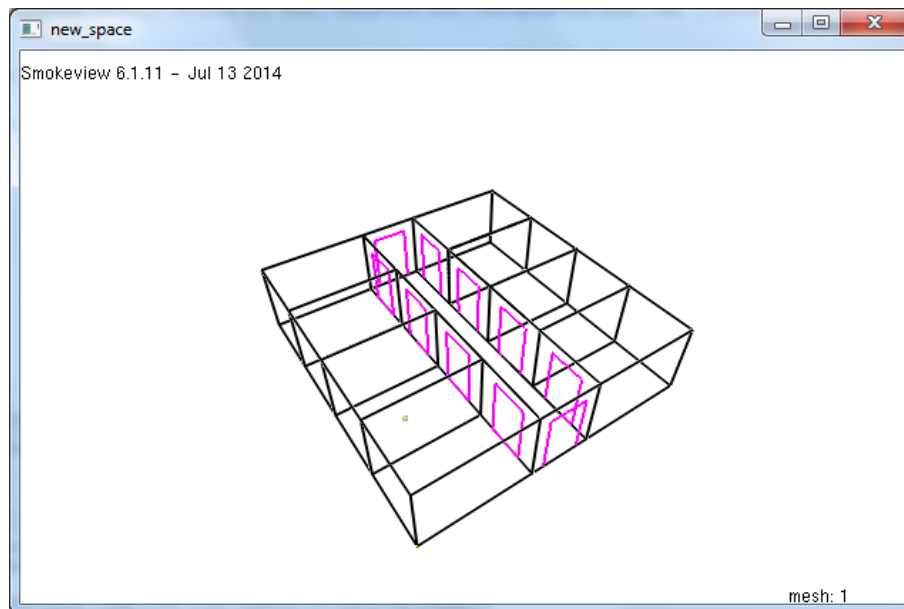
Εικόνα 5.2.2: κατασκευή καμπύλης ρυθμού έκλυσης θερμότητας (HRR curve)

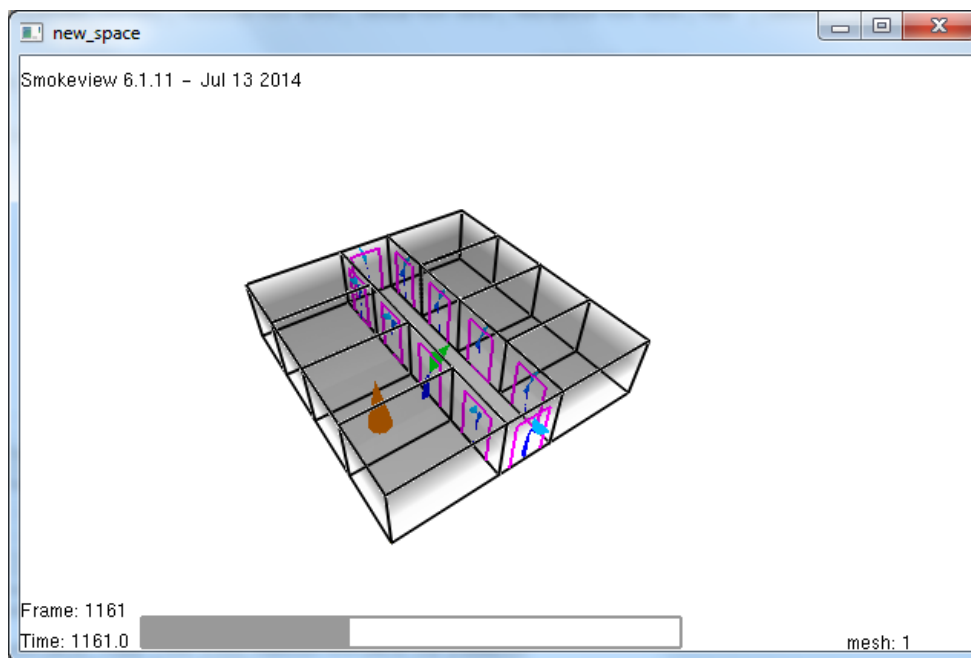
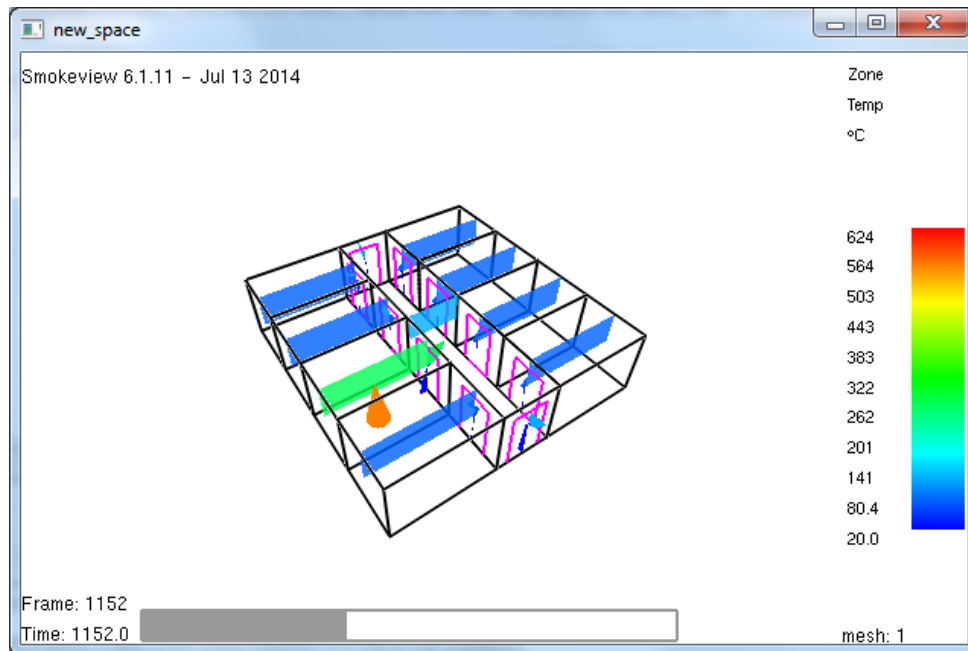
Όσον αφορά τα εξαγόμενα δεδομένα, το CFAST δημιουργεί 5 αρχεία Microsoft Excel, στα οποία δίνονται ως συνάρτηση του χρόνου τα εξής:

- Περιβαλλοντικές συνθήκες εντός του χώρου (θερμοκρασίες ανώτερων και κατώτερων στρωμάτων, θερμοκρασία στον άξονα της φλόγας, θερμοκρασίες δαπέδου, τοίχων και οροφής, συγκεντρώσεις οξυγόνου, διοξειδίου του άνθρακα, μονοξειδίου του άνθρακα, υδροκυανίου και λοιπών αέριων παραγώγων, οπτική πυκνότητα καπνού)
- Πληροφορίες σχετικά με την εκλυόμενη θερμότητα (θερμότητα λόγω συναγωγής, θερμότητα λόγω ακτινοβολίας, ροές θερμότητας μέσω διαχωριστικών χώρων)
- Ένταση πυρκαγιάς και ύψος φλόγας
- Ταχύτητες ροών αέρα μέσω ανοιγμάτων και οπών εξαερισμού
- Χρόνος ενεργοποίησης ανιχνευτών πυρκαγιάς και αυτόματου συστήματος πυρόσβεσης.

Μέσω της γραφικής τρισδιάστατης αναπαράστασης της πυρκαγιάς, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να παρακολουθήσει σε πραγματικό χρόνο την παραγωγή και την διασπορά των ανωτέρω παραγόντων καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Παρότι το μοντέλο CFAST, όπως και η συντριπτική πλειοψηφία των σχετικών μοντέλων, έχει αναπτυχθεί για την προσομοίωση πυρκαγιάς σε κτίρια, οι Ν. Νικολάου και Κ. Σπύρου έχουν δείξει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την περίπτωση των πλοίων. Το βασικό μειονέκτημα του CFAST σε αυτή την περίπτωση είναι ο περιορισμός σε μόλις 30 ξεχωριστά διαμερίσματα που επιβάλλει, αριθμός που ξεπερνιέται κατά πολύ σε περιπτώσεις μεγάλων επιβατηγών πλοίων. Άλλα μειονεκτήματα του μοντέλου είναι η απλή ορθογωνική γεωμετρία των διαμερισμάτων και οι διάφορες απλουστεύσεις που δεν επιτρέπουν την λεπτομερή προσομοίωση της κίνησης των διαφόρων αερίων εντός του χώρου, την περιγραφή φαινομένων όπως οι εκρήξεις και τις επιδράσεις των κινήσεων του πλοίου στην εξέλιξη της πυρκαγιάς. (Νικολάου & Σπύρου, 2009) Παρόλα αυτά, η φιλικότητα προς τον χρήστη, η απαίτηση σαφώς μικρότερης υπολογιστικής ισχύος και η ταχύτητα εξαγωγής αποτελεσμάτων σε σχέση με άλλα πιο σύνθετα αλλά εξίσου διαδεδομένα CFD μοντέλα όπως το FDS (Fire Dynamics Simulation), κάνουν το CFAST μια ενδεδειγμένη επιλογή για την εφαρμογή του σε ένα εξίσου απλό και εύχρηστο μοντέλο διαφυγής, στο οποίο μας ενδιαφέρει κυρίως η διασπορά καπνού και αερίων και όχι η λεπτομερής προσομοίωση της πυρκαγιάς.





Εικόνες 5.2.3-5.2.5: 3-D αναπαράσταση της εξέλιξης της πυρκαγιάς και της διασποράς καπνού

5.3 Μοντέλο του Purser για την τοξικότητα της πυρκαγιάς

Η πυρκαγιά είναι ένα φαινόμενο που προκαλεί πολλούς κινδύνους για τον άνθρωπο. Πέρα από τις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται και την δυσκολία στην κίνηση και την αναπνοή λόγω του καπνού, οι διάφορες τοξικές ουσίες που εκλύονται δημιουργούν μια ιδιαίτερα επικίνδυνη κατάσταση για τον άνθρωπο, η οποία μπορεί να οδηγήσει έως και τον θάνατο. Οι κυριότερες από αυτές τις ουσίες είναι το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το υδροκυάνιο (HCN) και το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂).

Ο D.A. Purser από το ερευνητικό κέντρο του Huntington της Μεγάλης Βρετανίας (Huntington Research Center – Cambridge), έχει προτείνει μια μεθοδολογία μοντελοποίησης των κινδύνων αυτών με βάση την θεωρία της κλασματικής δραστικής δόσης (fractional effective dose - FED). (Purser, 1989) Η κλασματική δραστική δόση είναι το ποσοστό της δόσης του εκάστοτε παράγοντα που μπορεί να προκαλέσει απώλεια αισθήσεων και προκύπτει από την δόση που λαμβάνει το άτομο σε μια χρονική στιγμή, διαιρούμενο με την συνολική δόση που προκαλεί απώλεια αισθήσεων.

$$FED = \frac{\text{δόση που λαμβάνεται την χρονική στιγμή } t}{\text{δόση που προκαλεί απώλεια αισθήσεων ή θάνατο}}$$

Από τους διάφορους παράγοντες κινδύνου οι ερεθισμοί των αισθητηρίων οργάνων και ο περιορισμός της ορατότητας εξαρτώνται αποκλειστικά από την συγκέντρωση του καπνού. Το ίδιο ισχύει ως ένα βαθμό και για την έκλυση θερμότητας, με σοβαρά εγκαύματα και συνεπακόλουθη απώλεια αισθήσεων και θάνατο να προκαλούνται ταχέως για τιμές πάνω από 0.25 W/m². Όλοι οι υπόλοιποι όμως, και ειδικά για τα διάφορα αέρια που παράγονται και η υποξία που προκαλείται από την περιορισμένη συγκέντρωση οξυγόνου, εξαρτώνται περισσότερο από την συνολική δόση που λαμβάνεται από το άτομο και όχι τόσο από την συγκέντρωση του κάθε παράγοντα. Ωστόσο, η δόση αυτή συνδέεται με την συγκέντρωση, καθώς σε γενικές γραμμές ισχύει ότι η δόση k ενός αέριου τοξικού παράγοντα ισούται με το γινόμενο $c \times t$, όπου c η συγκέντρωση του παράγοντα και t το χρονικό διάστημα έκθεσης του ατόμου στην συγκέντρωση αυτή. Έτσι, υπολογίζεται ο αριθμητής του κλάσματος της FED, και προσθέτοντας τις τιμές για όλες τις χρονικές στιγμές t , προκύπτει η συνολική FED για την έκθεση του ατόμου στον παράγοντα αυτόν. Όταν η συνολική αυτή FED ξεπεράσει την τιμή 1, τότε το άτομο χάνει τις αισθήσεις του και οδηγείται ταχέως προς τον θάνατο.

Μονοξείδιο του άνθρακα

Το μονοξείδιο του άνθρακα προσλαμβάνεται από τον οργανισμό με την αναπνοή, επικάθεται στα ερυθρά αιμοσφαίρια και λαμβάνει την μορφή μιας ουσίας με την ονομασία ανθρακοαιμοσφαιρίνη (carboxyhaemoglobin, COHb). Η ανθρακοαιμοσφαιρίνη, που μειώνει δραστικά την δυνατότητα του οργανισμού να προσλάβει το απαραίτητο οξυγόνο, προκαλεί σε χαμηλές συγκεντρώσεις αίσθηση κόπωσης, ζαλάδα και απώλεια αισθήσεων, ενώ σε υψηλότερες σοβαρή υποξία και θάνατο. Η συγκέντρωση αυτή υπολογίζεται από τον τύπο του Stewart:

$$\%COHb = (3.317 \times 10^{-5})(ppm CO^{1.036})(RMV)(t)$$

όπου:

CO: η συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα σε ppm (parts per million)

RMV: η ποσότητα του αέρα που προσλαμβάνεται από το άτομο σε ένα λεπτό (litres/min)

t: ο χρόνος έκθεσης στην παραπάνω συγκέντρωση (min)

Θεωρώντας έναν μέσο ενήλικα με βάρος 70 kg, που ασκεί κάποια χαλαρή δραστηριότητα (όπως το περπάτημα), προκύπτει η fractional effective dose για το μονοξείδιο του άνθρακα:

$$F_{lco} = \frac{K(CO^{1.036})(t)}{60 \cdot D}$$

όπου:

K = 0.00082925 για RMV = 25 l/min (χαλαρή δραστηριότητα)

D = συγκέντρωση COHb που οδηγεί σε απώλεια αισθήσεων (30 για χαλαρή δραστηριότητα)

t = χρόνος σε sec (ισούται με 1 στην περίπτωση που το χρονικό βήμα προσομοίωσης ισούται με 1 sec)

Υδροκυάνιο

Το υδροκυάνιο (hydrogen cyanide – HCN) παράγεται από την καύση πολυμερών υλικών και κυρίως αυτών που χρησιμοποιείται νιτρίλιο (nitrile) για την παρασκευή τους, όπως το βινύλιο και η πολυουρεθάνη. Σε μεγάλες συγκεντρώσεις μπλοκάρει τους υποδοχείς οξυγόνου των κυττάρων και οδηγεί σε επιληπτικές κρίσεις, άπνοια, κόμμα, ανακοπή και τελικά σε θάνατο. Για τιμές κάτω από 80 ppm και για περιόδους μικρότερες της 1 ώρας, η έκθεση στο υδροκυάνιο προκαλεί μόνο κάποια ελαφριά ή και καθόλου συμπτώματα, ενώ για συγκεντρώσεις 80-180 ppm χρειάζονται από 2 έως και 30 λεπτά ώστε το άτομο να χάσει τις αισθήσεις του. Για συγκεντρώσεις πάνω από 180 ppm, τα συμπτώματα είναι άμεσα και σοβαρά και ο θάνατος επέρχεται μέσα σε ελάχιστα λεπτά (0-2 min). Ο τύπος υπολογισμού του διαθέσιμου χρόνου μέχρι την απώλεια αισθήσεων είναι ο ακόλουθος:

$$t_{Icn}[min] = \frac{(185 - ppm\ HCN)}{4.4}$$

Από τον τύπο αυτόν προκύπτει και η fractional effective dose του υδροκυανίου για χρονικό διάστημα 1 sec:

$$F_{Icn} = \frac{4.4}{60 \cdot (185 - ppm\ HCN)}$$

Υποξία λόγω χαμηλής συγκέντρωσης οξυγόνου

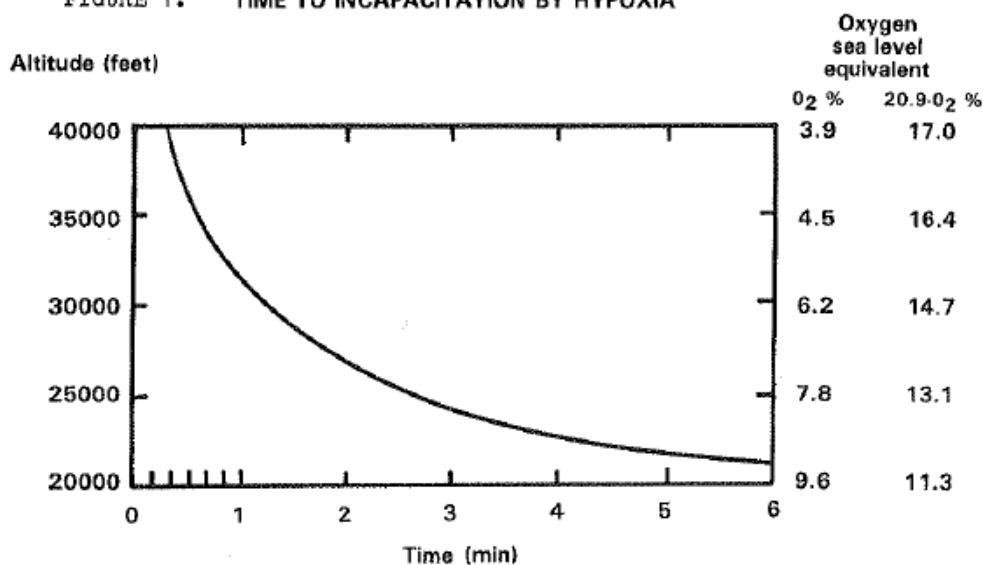
Η παρατεταμένη έκθεση του ανθρώπου σε συνθήκες με ελάχιστο οξυγόνο, προκαλεί πτώση της συγκέντρωσής του στο αίμα και τους ιστούς και οδηγεί σε υποξία. Τα συμπτώματα της υποξίας είναι η αταξία, η σύγχυση που ακολουθείται συνήθως από αποπροσανατολισμό και ψευδαισθήσεις, ισχυρός πονοκέφαλος, ταχυκαρδία και υψηλή αρτηριακή πίεση. Σε σοβαρές περιπτώσεις, οπότε και τα επίπεδα οξυγόνου στο αίμα είναι πλέον πολύ χαμηλά, προκαλεί απώλεια αισθήσεων και γρήγορο θάνατο. Ο χρόνος που απαιτείται ώστε το άτομο να χάσει τις αισθήσεις του υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$t_{Io}[min] = e^{(8.13 - 0.54(20.9 - \%O_2))}$$

Από τον τύπο αυτό εξάγεται η fractional effective dose για την υποξία:

$$F_{Io} = \frac{1}{60 \cdot e^{8.13 - 0.54(20.9 - \%O_2)}}$$

FIGURE 1. TIME TO INCAPACITATION BY HYPOXIA



Εικόνα 5.3.1: καμπύλη υποξίας

Διοξείδιο του άνθρακα

Το διοξείδιο του άνθρακα (carbon dioxide – CO₂) είναι πολύ σημαντικό στοιχείο τις μεταβολικής λειτουργίας του οργανισμού, καθώς με βάση την συγκέντρωσή του στο αίμα ρυθμίζεται η απαιτούμενη πρόσληψη οξυγόνου. Σε μεγάλες συγκεντρώσεις παρατηρείται το φαινόμενο της υπερκαπνίας, κατάσταση όπου τα ερυθρά αιμοσφαίρια δεν δύνανται να μεταφέρουν το οξυγόνο και η οποία οδηγεί σε οξεία αναπνευστική ανεπάρκεια και θάνατο. Κατά συνέπεια, τα αυξημένα επίπεδα CO₂ προκαλούν δυο εμφανή αποτελέσματα:

- 1) Αύξηση τις εισπνεόμενης ποσότητας αέρα (RMV), η οποία προκαλεί ανάλογη αύξηση και στην εισπνεόμενη ποσότητα των προαναφερόμενων τοξικών αερίων που παράγονται από την πυρκαγιά.
- 2) Νάρκωση λόγω της έλλειψης οξυγόνου, η οποία σε μεγάλες συγκεντρώσεις οδηγεί σε απώλεια αισθήσεων και θάνατο.

Η αύξηση τις εισπνεόμενης ποσότητας αέρα υπολογίζεται με χρήση τις πολλαπλασιαστικού παράγοντα, ο οποίος προκύπτει από τον παρακάτω εμπειρικό τύπο:

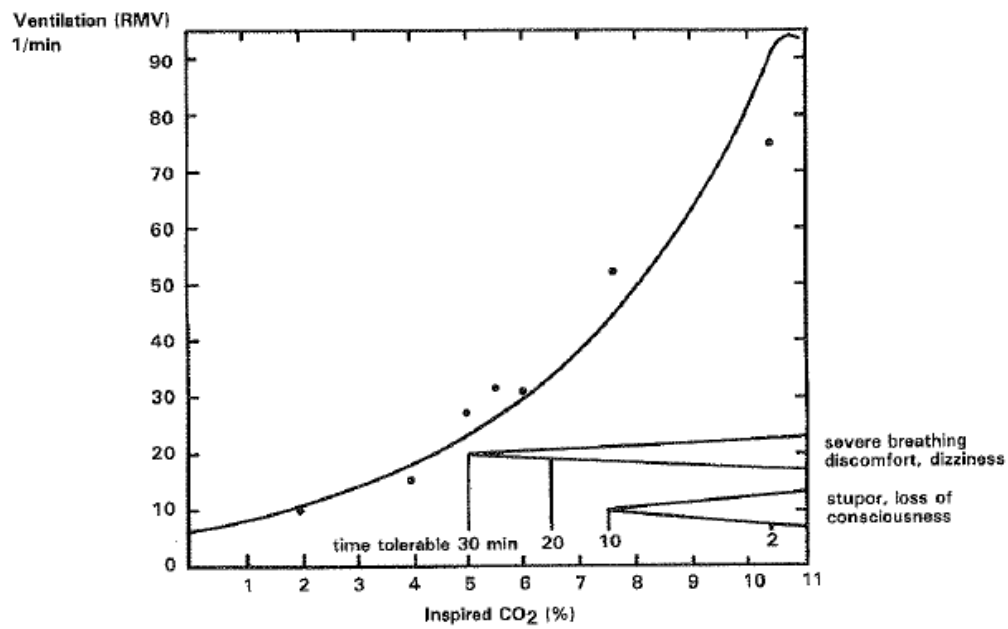
$$\text{Multiplication Factor } CO_2 = \frac{e^{0.2496 \times \%CO_2 + 1.9086}}{6.8}$$

Ο χρόνος που απαιτείται ώστε το άτομο να χάσει τις αισθήσεις του λόγω του διοξειδίου του άνθρακα είναι:

$$t_{ICO_2} [min] = e \cdot (6.1623 - 0.5189 \cdot \%CO_2)$$

Επομένως, το fractional effective dose του διοξειδίου του άνθρακα για χρονικό βήμα 1 sec είναι:

$$F_{ICO_2} = \frac{1}{60 \cdot e \cdot (5.1623 - 0.5189 \cdot \%CO_2)}$$



Εικόνα 5.3.2: αύξηση εισπνεόμενης ποσότητας αέρα λόγω συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα

Ταυτόχρονη επίδραση τοξικών παραγόντων

Τα μέχρι τώρα διαθέσιμα δεδομένα σχετικά με την ταυτόχρονη επίδραση των διαφόρων τοξικών παραγόντων της πυρκαγιάς, παρότι σχετικά περιορισμένα, έχουν επιτρέψει στους επιστήμονες να εξάγουν κάποια συμπεράσματα. Αυτά είναι:

- 1) Οι ποσότητες CO και HCN που προσλαμβάνει το άτομο μέσω της αναπνοής, επιδρούν σωρευτικά στον οργανισμό.
- 2) Το διοξείδιο του άνθρακα αυξάνει τον ρυθμό πρόσληψης μονοξειδίου του άνθρακα και υδροκυανίου σε ποσοστό ανάλογο της αύξησης της εισπνεόμενης ποσότητας αέρα.
- 3) Η νάρκωση που προκαλείται από την μειωμένη πρόσληψη οξυγόνου επιδρά προσθετικά στα συμπτώματα της πρόσληψης CO και HCN, αλλά δεν επηρεάζεται από την αύξηση της εισπνεόμενης ποσότητας αέρα λόγω του διοξειδίου του άνθρακα.
- 4) Η νάρκωση που προκαλείται από το διοξείδιο του άνθρακα είναι ανεξάρτητη από τα συμπτώματα που προκαλούνται από τα άλλα αέρια.

Με βάση τα παραπάνω, ο Purser καταλήγει στην ακόλουθη εμπειρική σχέση υπολογισμού του συνολικού fractional effective dose για την ταυτόχρονη επίδραση των προαναφερόμενων τοξικών παραγόντων:

$$F_{IN} = (F_{ICO} + F_{ICN}) \cdot VCO_2 + F_{IO} \text{ ή } F_{ICO_2}$$

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω σχέση καθίσταται δυνατό να υπολογίσουμε την fractional effective dose σε κάθε χρονικό βήμα. Η συνθήκη λοιπόν ώστε το άτομο να χάσει τις αισθήσεις του, να χαρακτηριστεί ως απώλεια (casualty) και να σταματήσει να συμμετέχει στην προσομοίωση, είναι:

$$Total F_{IN,t} = F_{IN,t} + \sum_{i=0}^{t-1} F_{IN,i}$$

$$Total F_{IN,t} = 1$$

Θερμότητα

Πέρα από τα διάφορα τοξικά αέρια που παράγονται από την πυρκαγιά, σημαντικό κίνδυνο για τον άνθρωπο αποτελεί και η θερμότητα που εκλύεται από την πυρκαγιά. Η θερμότητα αυτή είναι δυο ειδών: η θερμότητα εξ ακτινοβολίας (radiant heat) και η θερμότητα εξ απαγωγής (convected heat).

Όσον αφορά την θερμότητα εξ ακτινοβολίας, ο D. Purser έχει εντοπίσει την κρίσιμη τιμή 0.25 w/cm^2 (ή 2.5 kw/m^2). Για τιμές μικρότερες από αυτήν, το άτομο μπορεί να την ανεχθεί για αρκετά λεπτά. Για τιμές ίσες ή μεγαλύτερες όμως, η αντοχή του περιορίζεται σε ελάχιστα λεπτά, καθώς προκαλείται άμεσα έντονος πόνος και σοβαρά εγκαύματα.

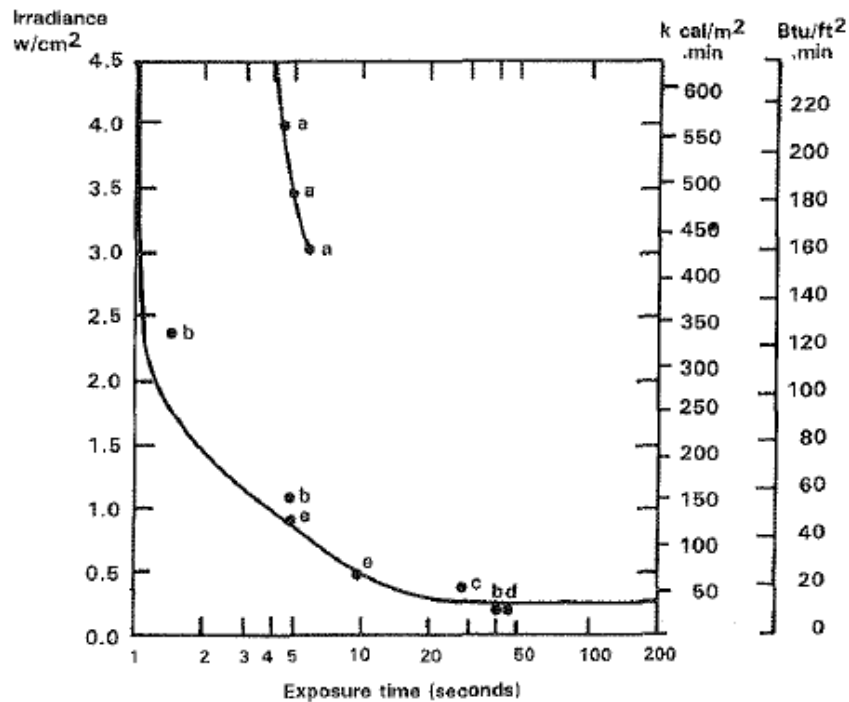
Για την θερμότητα εξ επαγωγής, συγκεντρώνοντας στοιχεία από την βιβλιογραφία, εξάγει τον ακόλουθο τύπο υπολογισμού του διαθέσιμου χρόνου έως ότου το άτομο να μην μπορεί να κινηθεί λόγω των εγκαυμάτων:

$$t_{lh} = e^{5.1849 - 0.0273T}$$

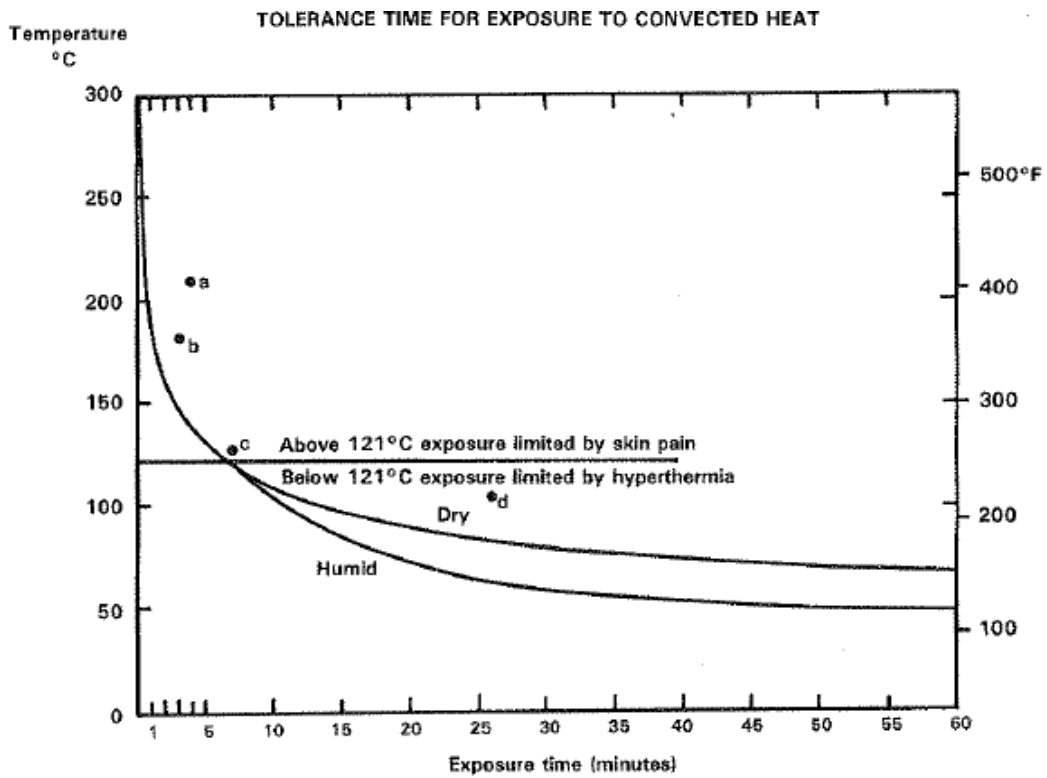
όπου T = η θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου

Έτσι, θεωρώντας ότι η θερμότητα εξ επαγωγής έχει παρόμοια αθροιστική επίδραση στον οργανισμό του ατόμου με τα τοξικά αέρια, εξάγεται ο ακόλουθος τύπος για την fractional effective dose της θερμότητας για χρονικό βήμα ίσο με 1 sec:

$$F_{lh} = \frac{1}{60 \cdot e^{5.1849 - 0.0273T}}$$



Εικόνα 5.3.3: διαθέσιμος χρόνος μέχρι την πρόκληση σοβαρών βλαβών στο δέρμα εξαιτίας της θερμότητας δια ακτινοβολίας



Εικόνα 5.3.4: χρόνος ανοχής στην θερμότητα εξ επαγωγής

5.4 Μοντέλο διαφυγής

5.4.1 Μοντελοποίηση του χώρου

Όπως είπαμε και προηγουμένως, το μοντέλο του Carleton είναι ένα coarse network μοντέλο. Έτσι, οι διάφοροι χώροι του κτιρίου αναπαριστώνται ως διαμερίσματα ή κλιμακοστάσια που είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους με πόρτες. Για λόγους απλοποίησης, τα διαμερίσματα αυτά θεωρείται ότι είναι ορθογώνια σε διάταξη, οπότε αν ο χώρος που θέλουμε να αναπαραστήσουμε έχει πιο σύνθετη γεωμετρία (όπως συχνά συμβαίνει στην περίπτωση των πλοίων), αντικαθίσταται στο μοντέλο από ένα ορθογώνιο με τις ίδιες διαστάσεις (εμβαδό και διαγώνιο). Λόγω του γεγονότος ότι το μοντέλο αναπτύχθηκε για να χρησιμοποιηθεί με μοντέλα ζώνης (zone fire models) στα οποία οι συνθήκες εντός των οριζόντιων ζωνών είναι ομοιόμορφες, έτσι και εδώ οι περιβαλλοντικές συνθήκες θεωρούνται ίδιες σε κάθε σημείο του χώρου. Επίσης, το μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη τυχόν εμπόδια που βρίσκονται εντός του χώρου (π.χ. έπιπλα), γιατί θεωρείται πως ο χρόνος που χρειάζεται το άτομο για να τα αποφύγει είναι αμελητέος σε σχέση με τον συνολικό χρόνο διαφυγής. Τα διάφορα διαμερίσματα και οι πόρτες περιγράφονται από τα εξής:

- Τα δωμάτια (compartments) από το εμβαδόν και την διαγώνιό τους
- Οι διάδρομοι (corridors) από το εμβαδόν και το ολικό τους μήκος
- Οι σκάλες από το συνολικό εμβαδόν και την γραμμική απόσταση μεταξύ των ορόφων (ή των καταστρωμάτων στην περίπτωση του πλοίου) τους οποίους ενώνουν.
- Οι πόρτες από το καθαρό τους πλάτος (clear width). Ως καθαρό πλάτος ορίζεται το πλάτος του ανοίγματος της πόρτας μείον το πάχος αυτής.

Για να υπολογιστεί η απόσταση που πρέπει να διανύσει το κάθε άτομο, το διαμέρισμα κατηγοριοποιείται ως δωμάτιο, διάδρομος ή κλιμακοστάσιο. Εδώ, διακρίνονται τρεις περιπτώσεις:

- Στην περίπτωση όπου ο επιβάτης βρίσκεται αρχικά στον χώρο αυτό, λαμβάνεται ως απόσταση από την επιλεγμένη έξοδο μια τυχαία τιμή μεταξύ του μηδέν και της διαγωνίου του δωματίου, του ολικού μήκους του διαδρόμου ή της γραμμικής μεταξύ των καταστρωμάτων αν πρόκειται για κλιμακοστάσιο.
- Στην περίπτωση που ο επιβάτης εισέρχεται στον χώρο σε κάποια χρονική στιγμή της προσομοίωσης, λαμβάνεται μια τυχαία τιμή μεταξύ της ευθείας απόστασης μεταξύ των πορτών εισόδου και εξόδου και της διαγωνίου του δωματίου ή του ολικού μήκους του

διαδρόμου ή της γραμμικής απόστασης μεταξύ των καταστρωμάτων που ενώνει το κλιμακοστάσιο.

- Στην περίπτωση που ο επιβάτης εισέρχεται σε έναν «τυφλό» χώρο, δηλαδή έναν χώρο με μόνο μια είσοδο/έξοδο, λαμβάνεται ως απόσταση μια τυχαία τιμή μεταξύ του μηδέν και της διαγωνίου του δωματίου ή του ολικού μήκους του διαδρόμου ή της γραμμικής απόστασης μεταξύ των καταστρωμάτων που ενώνει το κλιμακοστάσιο.

Η διαγώνιος, το ολικό μήκος και η κατακόρυφη απόσταση υπεισέρχονται στον υπολογισμό της απόστασης προκειμένου να προσομοιώσουν τις αλλαγές στην πορεία του ατόμου λόγω της παρουσίας εμποδίων, άλλων ατόμων αλλά και της μειωμένης ορατότητας λόγω καπνού.

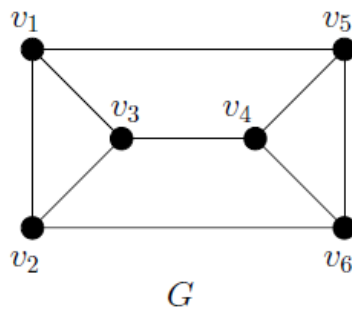
Εδώ είναι και η πρώτη αλλαγή που κάναμε στο μοντέλο του Carleton. Στο μοντέλο αυτό, όταν ο επιβάτης εισέρχεται στον χώρο λαμβάνεται ως απόσταση η διαγώνιος του δωματίου ασχέτως της ευθείας απόστασης ανάμεσα στην είσοδο και την επιλεγμένη έξοδο. Η απλοποίηση αυτή είναι εφαρμόσιμη στην περίπτωση ενός κτιρίου όπου οι χώροι είναι συνήθως μικροί σε διαστάσεις και οι πόρτες περιορισμένες (και άρα η διαφορά ανάμεσα στην απόσταση μεταξύ των πορτών και την διαγώνιο είναι μικρή). Στην περίπτωση όμως ενός πλοίου, και ειδικά επιβατηγού όπου οι χώροι είναι αρκετά μεγαλύτεροι και οι πόρτες περισσότερες, θεωρήσαμε ότι οι αποστάσεις που θα προέκυπταν θα ήταν σε κάποιες περιπτώσεις (π.χ. πόρτες προς διαφορετικούς χώρους σε μικρή απόσταση μεταξύ τους) δυσανάλογα μεγάλες και ως εκ τούτου μη ρεαλιστικές.

Όσον αφορά την μεθοδολογία μοντελοποίησης του χώρου, στις δημοσιεύσεις σχετικά με το μοντέλο του Carleton δεν μας δίνονται πληροφορίες όσον αφορά τον τρόπο με τον οποίο εισάγεται ο χώρος στο μοντέλο. Ανατρέξαμε λοιπόν στις δημοσιεύσεις σχετικά με άλλα μοντέλα διαφυγής και διαπιστώσαμε όλα τα μοντέλα για τα οποία διαθέταμε λεπτομερείς πληροφορίες (EVI, MaritimeExodus, VELOS), χρησιμοποιούσαν διάφορες μορφές **γράφου** (graph) για την εισαγωγή του χώρου. Πριν περιγράψουμε αναλυτικά τον γράφο που χρησιμοποιήσαμε, θα αναφερθούμε συνοπτικά στην θεωρία των γράφων.

Στοιχεία θεωρίας γράφων

Σύμφωνα με τον πλέον αποδεκτό ορισμό, ο γράφος είναι “κάθε διατεταγμένο ζεύγος $G = (V, E)$ όπου V είναι ένα πεπερασμένο σύνολο και E είναι ένα σύνολο υποσυνόλων του V το καθένα εκ των οποίων έχει δύο στοιχεία του V . Καλούμε τα στοιχεία του V κορυφές του G και τα στοιχεία του E ακμές του G . Για κάθε ακμή $e = \{v, u\} \in E$, καλούμε τις κορυφές v και u άκρα της e και λέμε ότι οι κορυφές v και u είναι συνδεδεμένες στο G .” (Θηλυκός, 2013). Στην επόμενη εικόνα

βλέπουμε ένα παράδειγμα απλού γράφου G , όπου οι κορυφές αναπαριστώνται με τελείες ($u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6$) και οι ακμές που τις συνδέουν, με γραμμές $\{(u_1, u_2), (u_1, u_3), (u_1, u_5), \dots\}$.



Εικόνα 5.4.1.1: απλός γράφος

Η θεωρία των γράφων ξεκίνησε το 1736 από τον μαθηματικό Leonard Euler, όταν και διατύπωσε το πρόβλημα των “7 Γεφυρών του Königsberg”. Το Königsberg (σημερινό Καλίνινγκραντ της Ρωσίας) βρίσκεται επάνω στην κοίτη του ποταμού Pregel, ο οποίος και σχηματίζει δυο νησιά τα οποία συνδέονται με τις δυο όχθες αλλά και μεταξύ τους με 7 γέφυρες. Η διατύπωση του προβλήματος ήταν η εξής: “ποια η διαδρομή που πρέπει να ακολουθήσει το άτομο προκειμένου να διασχίσει και τις επτά γέφυρες της πόλης επιστρέφοντας στο ίδιο ακριβώς σημείο από το οποίο ξεκίνησε τη διαδρομή του περνώντας από κάθε γέφυρα το πολύ μια φορά.” Για να επιλύσει το πρόβλημα, ο Euler θεώρησε ότι δεν μας ενδιαφέρει η ακριβής διαδρομή εντός του κάθε κομματιού ξηράς και ότι το σημαντικό στοιχείο της διαδρομής είναι η σειρά με την οποία διασχίζουμε τις γέφυρες. Έτσι, εξέλαβε το κάθε κομμάτι ξηράς ως κόμβο και την κάθε γέφυρα ως την σύνδεση μεταξύ των διάφορων κόμβων. Η συλλογιστική του Euler φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα:

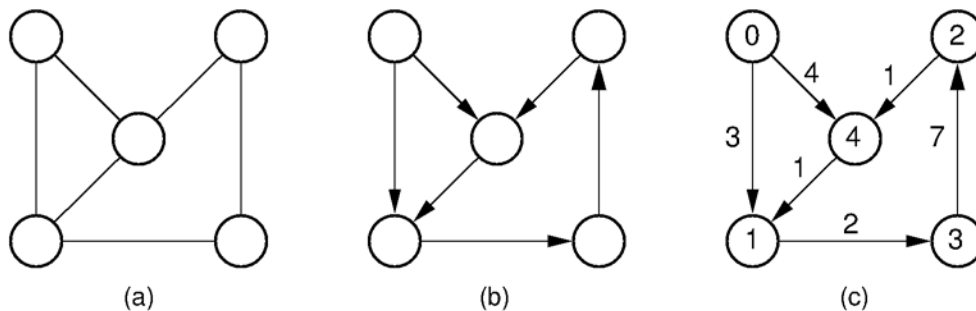


Εικόνα 5.4.1.2: επίλυση του προβλήματος των «7 Γεφυρών του Königsberg»

Σήμερα, η θεωρία των γράφων αποτελεί σημαντικό κομμάτι του τομέα των *Διακριτών Μαθηματικών* και ειδικότερα της *Τοπολογίας*. Οι γράφοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οποιοδήποτε πρόβλημα περιλαμβάνει σύστημα διαφορετικών αντικειμένων (objects) και έχουν εφαρμοστεί ευρέως σε δίκτυα υπολογιστών, μηχανολογικά και υδραυλικά συστήματα, δίκτυα μεταφοράς ενέργειας, οικονομικές εφαρμογές, νευρωνικά δίκτυα και με ιδιαίτερα

μεγάλη επιτυχία στην μοντελοποίηση γεωγραφικών περιοχών ή εσωτερικών χώρων, σχεδίαση οδικών και συγκοινωνιακών δικτύων, καθώς και σε συστήματα γεωγραφικού εντοπισμού (GPS) προκειμένου να εντοπιστούν οι βέλτιστες διαδρομές.

Η κύρια κατηγοριοποίηση μεταξύ των γράφων είναι ο **απλός γράφος** (ή μη κατευθυνόμενος) και ο **κατευθυνόμενος γράφος**. Στον απλό γράφο, δυο κορυφές (έστω 1 και 2) συνδέονται με μία ακμή και ισχύει γενικά ότι $(1,2) = (2,1)$. Αυτό σημαίνει ότι το ζεύγος κορυφών (εδώ *άκρα* του γράφου) είναι μη διατεταγμένο. Αντιθέτως, στον κατευθυνόμενο γράφο η ακμή έχει κατεύθυνση, επομένως μπορεί να παρασταθεί διανυσματικά με τη διαφορά ότι οι συντεταγμένες της ακμής δεν είναι καρτεσιανές, αλλά εκφράζουν την κατεύθυνση του γράφου από την *κορυφή-πηγή* στην *κορυφή-προορισμό*. Αρα, χρησιμοποιώντας το προηγούμενο παράδειγμα, στην περίπτωση του κατευθυνόμενου γράφου η ακμή $(1,2)$ δεν είναι ίδια με την ακμή $(2,1)$: συνδέουν τις ίδιες ακμές (την 1 και την 2) αλλά έχουν αντίθετη κατεύθυνση. Μια άλλη σημαντική κατηγορία γράφων είναι οι **σταθμισμένοι γράφοι** (ή γράφοι με βάρη), στις ακμές των οποίων ανατίθενται **βάρη**. Το βάρος μπορεί να είναι οποιοδήποτε μέγεθος χαρακτηρίζει την ακμή, όπως π.χ. η χιλιομετρική απόσταση δυο πόλεων, η πιθανότητα πραγματοποίησης ενός συμβάντος, η χωρητικότητα μιας γραμμής δικτύου κλπ. Οι σταθμισμένοι γράφοι μπορεί να είναι είτε απλοί, είτε κατευθυνόμενοι. Στην επόμενη εικόνα βλέπουμε τις διαφορές μεταξύ των απλών, των κατευθυνόμενων και των σταθμισμένων γράφων:



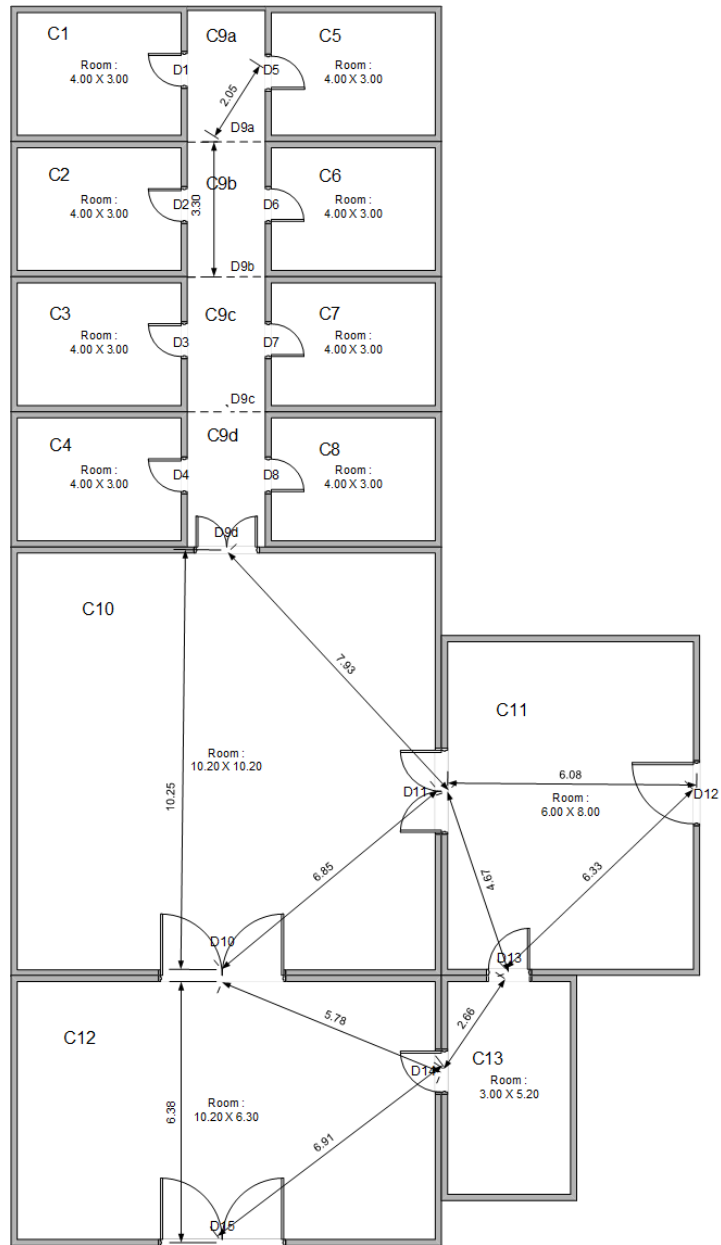
Εικόνα 5.4.1.3: απλός, κατευθυνόμενος και σταθμισμένος γράφος

Μοντελοποίηση του χώρου ως γράφου

Προκειμένου να εισάγουμε την απόσταση που διανύει ένα άτομο εντός του διαμερίσματος, η οποία όπως είπαμε εξαρτάται από τη διαγώνιο του χώρου και την ευθεία απόσταση μεταξύ των πορτών, επιλέξαμε τη δομή των *κατευθυνόμενων πολύγραφων με βάρη* (weighted directed multigraph). Ο κατευθυνόμενος πολύγραφος είναι ένας κατευθυνόμενος γράφος, οι κόμβοι του οποίου συνδέονται μεταξύ τους με δυο ή και παραπάνω ακμές. Ο γράφος που προκύπτει αναπαριστά τον χώρο ως εξής:

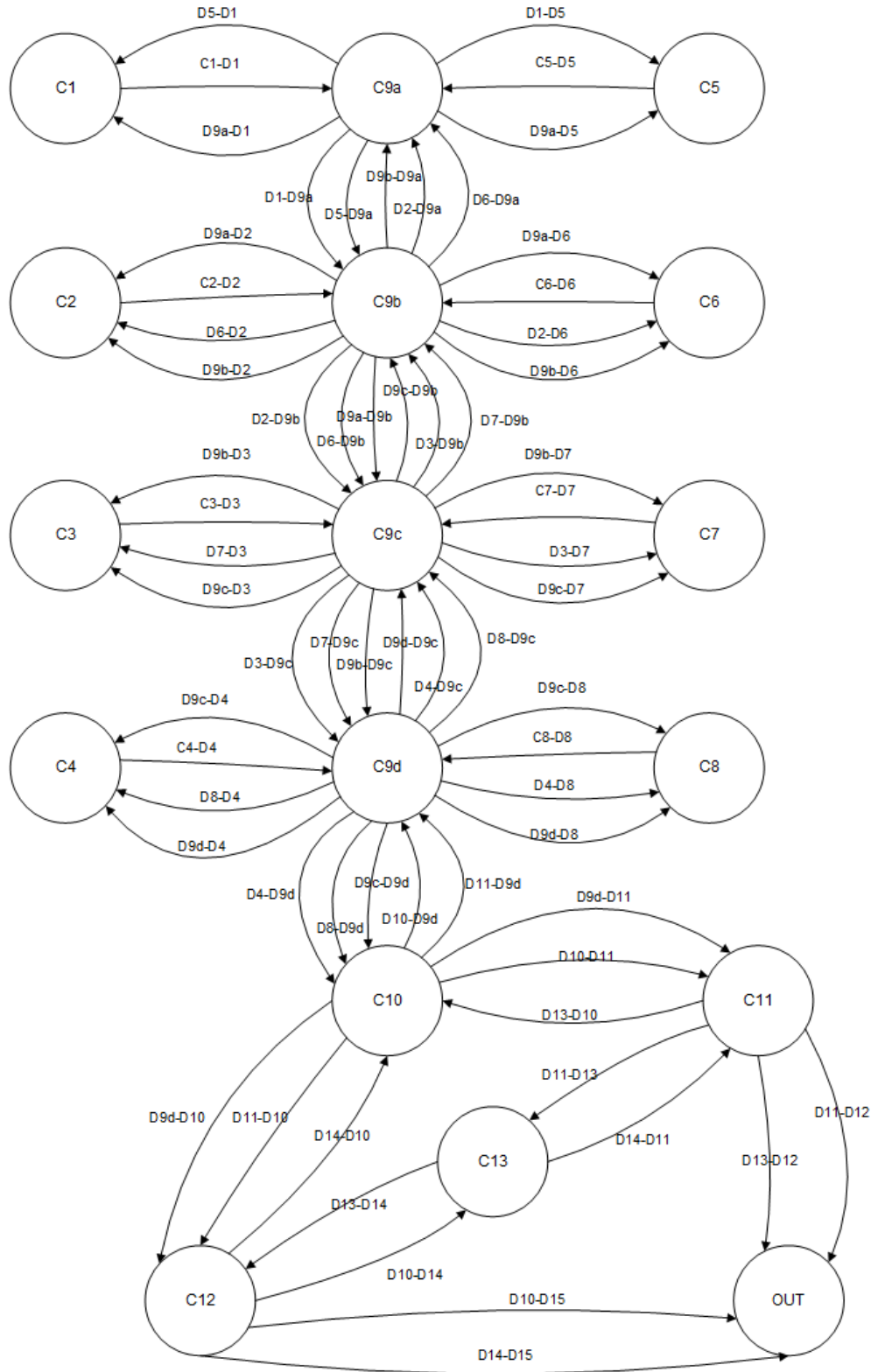
- τα διάφορα διαμερίσματα αντιστοιχίζονται σε *κόμβους* (nodes), οι οποίοι διαθέτουν ένα μοναδικό αλφαριθμητικό ταυτοποίησης (ID string), καθώς και τις διάφορες ιδιότητες τους (θερμοκρασία, επίπεδα καπνού και τοξικών εκλύσεων, εμβαδόν, διαγώνιο κλπ.).
- Οι διαδρομές εισόδου και εξόδου από τον κάθε χώρο περιγράφονται από *ακμές* (arcs). Για τις πόρτες που οδηγούν από ένα διαμέρισμα σε ένα άλλο (και επομένως έχουν δυο κατευθύνσεις) χρησιμοποιούνται τουλάχιστον δυο ακμές, ενώ για αυτές που οδηγούν στο εξωτερικό του πλοίου (μια κατεύθυνση) από μια ακμή. Οι ακμές, όπως και οι κόμβοι, διαθέτουν ένα αλφαριθμητικό ταυτοποίησης καθώς και την βασική πιθανότητα εκλογής p_0 (τον λόγο ύπαρξης της πιθανότητας αυτής θα τον αναλύσουμε στην παράγραφο για την επιλογή διαδρομής), το πλάτος της πόρτας και την απόσταση μεταξύ των διαμερισμάτων-κόμβων που συνδέει. Το σύνολο αυτών των τιμών αποτελούν το βάρος της ακμής-διαδρομής.

Ας δούμε για παράδειγμα τον παρακάτω χώρο, που αποτελείται από 8 διαμερίσματα με τυπικές διαστάσεις καμπινών (C1-C7), έναν διάδρομο (C9) και τέσσερις κοινόχρηστους χώρους (C10-C13). Τα διαμερίσματα C11 και C12 συνδέονται με τον εξωτερικό χώρο με ισάριθμες πόρτες. Τον διάδρομο τον έχουμε χωρίσει σε τέσσερις μικρότερους, προκειμένου να απλοποιηθεί και να γίνει πιο κατανοητός ο γράφος. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται ο χώρος και ο γράφος που δημιουργείται για να τον περιγράψει:



Εικόνα 5.4.1.4: παράδειγμα χώρου

Ο γράφος που προκύπτει από τον χώρο αυτό, είναι ο ακόλουθος:



Εικόνα 5.4.1.5: ο γράφος που δημιουργείται από το μοντέλο

Ας πάρουμε το διαμέρισμα C1 και τον διάδρομο C1a. Το C1 συνδέεται με τον C1a μέσω της πόρτας D1, ενώ ο C1a συνδέεται με το διαμέρισμα C5 μέσω της πόρτας D5 και τον διάδρομο C1b μέσω της πόρτας D9a. Από το διαμέρισμα C1 έχουμε την εξερχόμενη ακμή [C1-D1], η οποία έχει βάρος ίσο με τη διαγώνιο του C1, και δυο εισερχόμενες ακμές: την ακμή [D5-D1] με βάρος ίσο με την απόσταση μεταξύ των πορτών D1 και D5, και την ακμή [D9a-D1] με βάρος ίσο με την απόσταση μεταξύ D1 και D5.

Ας δούμε και το διαμέρισμα C11, το οποίο ενώνεται με το διαμέρισμα C10 μέσω της πόρτας D11, το διαμέρισμα C13 μέσω της πόρτας D13 και τον εξωτερικό χώρο (που προσομοιώνεται ως διαμέρισμα πολύ μεγάλων διαστάσεων) μέσω της πόρτας D12. Στο C11 εισέρχονται δυο ακμές μέσω της πόρτας D11 και μια ακμή μέσω της πόρτας D13. Παρατηρούμε ότι από τον κόμβο OUT δεν εισέρχονται ακμές προς τον C11: αυτό συμβαίνει διότι όταν ένα άτομο βρεθεί στον εξωτερικό χώρο, δεν εισέρχεται και πάλι στο εσωτερικό του πλοίου οπότε και δεν κατασκευάζεται η αντίστοιχη ακμή που θα προσομοίωνε την διαδρομή αυτή.

Ο αλγόριθμος σε ψευδοκώδικα που κατασκευάζει τον γράφο, είναι ο ακόλουθος:

Για κάθε ds1 (πλευρά πόρτας){

 Αν το ds1 δεν ανήκει στον εξωτερικό χώρο{

 Αν το διαμέρισμα έχει μόνο μια πλευρά πόρτας{

 Φτιάξε μια ακμή rt1 με μηδενική προέλευση, προορισμό τη ds1 και μήκος ίσο με την διαγώνιο του διαμερίσματος της και όρισέ την να ενώνει το διαμέρισμα της ds1 με το διαμέρισμα στο οποίο ανήκει η αντίστροφη της ds1

 Αλλιώς, για κάθε ds2 που ανήκει στο ίδιο διαμέρισμα με την ds1 και η αντίστροφη της ds2 δεν ανήκει στον εξωτερικό χώρο{

 Φτιάξε ακμή με προέλευση τη ds2, προορισμό την ds1 και μήκος ίσο με την απόσταση μεταξύ των πορτών των ds1-ds2 και όρισέ την να ενώνει το διαμέρισμα της ds2 με το διαμέρισμα στο οποίο ανήκει η αντίστροφη της ds2.

 }

 }

}

5.4.2 Κατηγορίες επιβατών και δημογραφικό δείγμα

Το μοντέλο του Carleton χρησιμοποιεί ως προεπιλογή το δείγμα που ορίζει ο Οικοδομικός Κανονισμός του Καναδά (National Building Code of Canada) στις αντίστοιχες απαιτήσεις του για ανάλυση διαδικασίας διαφυγής από κτίρια στα οποία υπάρχει πυρκαγιά. Εμείς χρησιμοποιήσαμε το δείγμα που προτείνει ο IMO στις μεθοδολογίες του, αφενός γιατί είναι περισσότερο αντιπροσωπευτικό για την περίπτωση του πλοίου, αφετέρου γιατί περιλαμβάνει και το πλήρωμα. Το δείγμα αποτελείται από τις ακόλουθες κατηγορίες:

- Με βάση το φύλο, σε άνδρες και γυναίκες
- Με βάση την ηλικία, σε κάτω των 30 ετών, μεταξύ 30 και 50 ετών και άνω των 50 ετών.
- Με βάση την ιδιότητα, σε επιβάτες και πλήρωμα
- Με βάση την κινητική ικανότητα, σε πλήρως ικανά άτομα, σε άτομα με κινητικές δυσκολίες κατηγορίας 1 και άτομα με κινητικές δυσκολίες κατηγορίας 2.

Τελικώς, το προεπιλεγμένο δείγμα είναι το ακόλουθο:

Table 3.1 – Population’s composition (age and gender)

Population groups - passengers	Percentage of passengers (%)
Females younger than 30 years	7
Females 30-50 years old	7
Females older than 50 years	16
Females older than 50, mobility impaired (1)	10
Females older than 50, mobility impaired (2)	10
Males younger than 30 years	7
Males 30-50 years old	7
Males older than 50 years	16
Males older than 50, mobility impaired (1)	10
Males older than 50, mobility impaired (2)	10
<i>Population groups – crew</i>	Percentage of crew (%)
Crew females	50
Crew males	50

Εικόνα 5.4.2.1: δημογραφικό δείγμα επιβατών σύμφωνα με την οδηγία MSC.1/Circ.1238

Αυτές οι κατηγορίες επιβατών επηρεάζουν, όπως θα δούμε και παρακάτω, την αρχική κατανομή τους στον υπό μελέτη χώρο, τις επιλογές τους όσον αφορά την διαδρομή διαφυγής και την ταχύτητά τους.

Είναι σημαντικό να τονιστεί εδώ ότι στον κώδικα που αναπτύξαμε ώστε να μπορούμε να τρέξουμε το μοντέλο, το προεπιλεγμένο δείγμα έχει εισαχθεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι εύκολο για τον χρήστη να αλλάξει τα ποσοστά κατανομής για κάθε κατηγορία ατόμων.

5.4.3 Κατανομή επιβατών στον χώρο

Όπως και στις κατηγορίες και τα χαρακτηριστικά των επιβατών, έτσι κι εδώ χρησιμοποιήσαμε τις υποδείξεις της οδηγίας του IMO για την ανάλυση της διαδικασίας διαφυγής. Σύμφωνα με αυτήν, η αρχική κατανομή επιβατών στον χώρο θα πρέπει να γίνεται με βάση τα σενάρια ημέρας και νύκτας, που προδιαγράφονται στο κεφάλαιο 13 του κώδικα FSS. Προκειμένου να κατανεμηθούν οι επιβάτες σύμφωνα με αυτά, εισάγουμε στο μοντέλο άλλη μια κατηγοριοποίηση των χώρων, με βάση την λειτουργία τους αυτή τη φορά. Έτσι, οι διάφοροι χώροι διακρίνονται σε:

- Καμπίνες επιβατών
- Κοινόχρηστοι χώροι επιβατών (public spaces)
- Χώροι υπηρεσίας πληρώματος (service spaces)
- Χώροι ενδιαιτήσης πληρώματος (crew accommodation spaces)

Σημειώνεται ότι στους κοινόχρηστους χώρους περιλαμβάνονται όλοι οι χώροι στους οποίους κινούνται οι επιβάτες, συμπεριλαμβανομένων διαδρόμων στους χώρους ενδιαιτήσης και κλιμακοστασίων.

Σύμφωνα με τον κώδικα FSS, τα βασικά σενάρια είναι τα ακόλουθα:

Βασικό σενάριο 1 (σενάριο νύκτας): Οι επιβάτες καταλαμβάνουν πλήρως την χωρητικότητα των καμπινών στον υπό μελέτη χώρο. Τα 2/3 του πληρώματος κατανέμονται στις καμπίνες, ενώ το υπόλοιπο 1/3 κατανέμεται στους χώρους υπηρεσίας.

Βασικό σενάριο 2 (σενάριο ημέρας): Τα 3/4 των επιβατών κατανέμονται στους κοινόχρηστους χώρους. Το 1/3 του πληρώματος κατανέμεται στους κοινόχρηστους χώρους, το 1/3 στους χώρους υπηρεσίας και το υπόλοιπο 1/3 στους χώρους ενδιαιτήσης πληρώματος.

Πέραν των δυο αυτών σεναρίων, η οδηγία MSC.1/Circ.1238 προτείνει να εξεταστούν και δυο εναλλακτικά σενάρια για την κύρια κάθετη ζώνη (main vertical zone) στην οποία παρατηρήθηκε ο μεγαλύτερος συνολικός χρόνος ολοκλήρωσης της διαδικασίας. Τα εναλλακτικά σενάρια χρησιμοποιούν τις κατανομές επιβατών και πληρώματος για τα σενάρια ημέρας και νύκτας, αλλά διαφοροποιούνται ως προς τις διαδρομές διαφυγής που είναι διαθέσιμες. Τα σενάρια αυτά είναι τα ακόλουθα:

Εναλλακτικό σενάριο 1: το κλιμακοστάσιο με την μεγαλύτερη χωρητικότητα στην υπό εξέταση κύρια κάθετη ζώνη θεωρείται μη διαθέσιμο

Εναλλακτικό σενάριο 2: το 50% των επιβατών που βρίσκονται αρχικά σε μια από τις γειτνιαζουσες κύριες κάθετες ζώνες, αναγκάζεται να εισέλθει στην υπό εξέταση κύρια κάθετη ζώνη και να κινηθεί προς τον αντίστοιχο χώρο συγκέντρωσης.

5.4.4 Χρόνος απόκρισης (ή εκκίνησης)

Ο χρόνος απόκρισης (δηλαδή ο χρόνος από την ενεργοποίηση του συστήματος ειδοποίησης έως και την εκκίνηση του επιβάτη) σε ένα έκτακτο συμβάν είναι ιδιαίτερα σημαντικός για την ασφαλή και έγκαιρη διαφυγή από το εσωτερικό μιας κατασκευής σε περίπτωση πυρκαγιάς. Όπως είδαμε στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου, το μοντέλο του Carleton χρησιμοποιεί μια μεθοδολογία που έχει αναπτυχθεί στο ερευνητικό κέντρο NRC-CNRC του Καναδά, με την ονομασία OCRM (occupant response model). Η μεθοδολογία αυτή, πέρα από τον υπολογισμό του χρόνου εκκίνησης των ατόμων, υπολογίζει και τις πιθανότητες ώστε αυτοί να προβούν και σε επιπλέον πράξεις, όπως η ειδοποίηση άλλων ενοίκων, η προσπάθεια κατάσβεσης της πυρκαγιάς ή η κλήση της πυροσβεστικής. Όπως γίνεται κατανοητό, η μεθοδολογία OCRM έχει αναπτυχθεί αποκλειστικά για κτίρια, οπότε δεν είναι εφαρμόσιμη στην περίπτωση του πλοίου.

Ο IMO στις προτεινόμενες μεθοδολογίες του χρησιμοποιεί δυο κατανομές για τον χρόνο απόκρισης, μια για τα σενάρια νύχτας και μια για τα σενάρια ημέρας (βασικά και εναλλακτικά). Οι κατανομές αυτές προέκυψαν με βάση στοιχεία που συλλέχθηκαν από δοκιμές ετοιμότητας (evacuation drills) σε πλοία RO-PAX στα πλαίσια της σύνταξης της οδηγίας MSC/Circ.1033.

Οι R. Brown, E.R. Galea, S.Deere και L. Filippidis, στα πλαίσια του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος SAFEGUARD, διεξήγαγαν σε μεταγενέστερο χρόνο αντίστοιχες δοκιμές σε πλοίο RO-PAX αλλά και κρουαζιερόπλοιο ώστε αφενός να εξάγουν περισσότερα δεδομένα για τα πλοία RO-PAX αλλά και κρουαζιερόπλοια. Οι ασκήσεις έγιναν σε δυο διαφορετικά πλοία:

- το πρώτο πλοίο είναι τύπου RO-PAX, το οποίο ανήκει στην εταιρία Color Line και απασχολείται στην γραμμή μεταξύ του Kristiansand της Νορβηγίας και του Hirtshals της Δανίας (διάρκεια ταξιδιού 3 ώρες και 15 λεπτά). Το πλοίο αυτό μπορεί να μεταφέρει περίπου 2000 επιβάτες και πλήρωμα και 700 οχήματα. Οι χώροι που περιλαμβάνει το πλοίο είναι σαλόνια με καθίσματα αεροπορικού τύπου, καταστήματα, εστιατόρια και μπαρ, καθώς και εξωτερικούς χώρους με τραπεζοκαθίσματα. Έγιναν συνολικά δυο

ασκήσεις στο πλοίο αυτό, σε διαφορετικές μέρες ώστε οι επιβάτες να μην είναι οι ίδιοι και συμμετείχαν 1431 άτομα στην πρώτη άσκηση και 1349 στη δεύτερη.

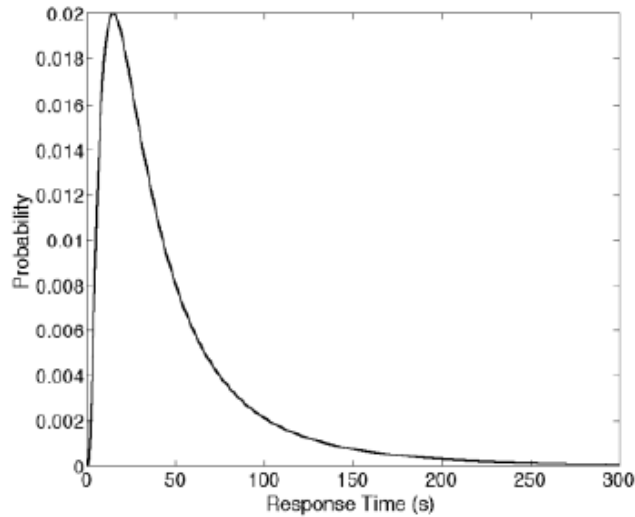
- το δεύτερο πλοίο είναι κρουαζιερόπλοιο της εταιρίας Royal Caribbean Cruise Lines International, το οποίο έκανε κυκλικό ταξίδι μεταξύ του Harwich της Μ. Βρετανίας και της Αγίας Πετρούπολης, με ενδιάμεσο σταθμό την Κοπεγχάγη και συνολική διάρκεια 7 ημερών. Η άσκηση διεξήχθη στο πρώτο μέρος του ταξιδιού, δηλαδή από το Harwich στην Κοπεγχάγη. Το πλοίο μπορεί να μεταφέρει 2500 επιβάτες, έχει 842 άτομα πλήρωμα και διαθέτει 12 καταστρώματα επιβατών με καμπίνες, εστιατόρια, μπαρ, καταστήματα, θέατρο, κινηματογράφο, γυμναστήριο, αθλητικούς χώρους, καζίνο, εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους αναψυχής. Στο πλοίο αυτό έγινε μια άσκηση, την δεύτερη μέρα του ταξιδιού και συμμετείχαν 2292 επιβάτες.

Για ηθικούς λόγους, οι επιβάτες γνώριζαν και στις δυο περιπτώσεις ότι πρόκειται να διεξαχθεί άσκηση ετοιμότητας, αλλά δεν γνώριζαν πότε ακριβώς. Για την καταγραφή των χρόνων απόκρισης χρησιμοποιήθηκε το κλειστό κύκλωμα καμερών του κάθε πλοίου, καθώς και επιπλέον κάμερες που τοποθετήθηκαν για αυτό το σκοπό. Συνολικά, χρησιμοποιήθηκαν 30 κάμερες στο πλοίο 1 και 106 κάμερες στο πλοίο 2, οι οποίες και κατέγραψαν συνολικά 53 ώρες εικόνας και στις τρεις ασκήσεις. Από την ανάλυση του καταγεγραμμένου υλικού, προέκυψαν 1003 σημεία δεδομένων για το πλοίο RO-PAX (533 στην πρώτη άσκηση και 470 στη δεύτερη) και 1228 σημεία δεδομένων για το κρουαζιερόπλοιο. Από τα στοιχεία αυτά και σε συνδυασμό με τα στοιχεία που χρησιμοποιεί ο IMO στην οδηγία MSC.1/Circ.1238, προέκυψαν δυο κατανομές (ημέρας και νύχτας) για κρουαζιερόπλοια και μια καινούρια κατανομή (σενάριο ημέρας) για τα πλοία ROPAX. (Brown, Galea, Deere, & Filippidis, 2012)

Εμείς, θα χρησιμοποιήσουμε τις τρεις αυτές κατανομές (σενάριο ημέρας και νύχτας για κρουαζιερόπλοια, σενάριο ημέρας για πλοία RO-PAX) καθώς και την κατανομή που δίνει ο IMO για το σενάριο νύχτας σε πλοία RO-PAX.

Πλοίο RO-PAX

α) Σενάριο ημέρας



Εικόνα 5.4.4.1: κατανομή χρόνου απόκρισης για σενάριο ημέρας σε πλοίο RO-PAX

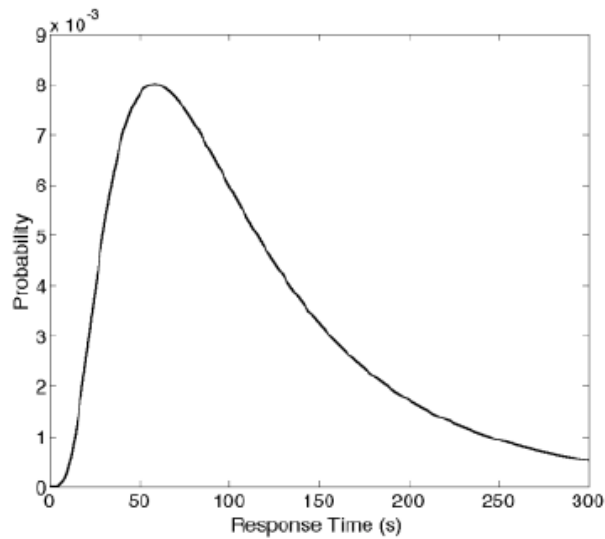
$$y = \frac{1.0076}{\sqrt{2\pi} \cdot 0.903x} \exp \left[-\frac{(\ln(x) - 3.511)^2}{2 \times 0.903^2} \right] \quad \mu\epsilon \ 0 < x < 300$$

β) Σενάριο νύχτας

$$y = \frac{1.01875}{\sqrt{2\pi} \cdot 0.84(x - 400)} \exp \left[-\frac{(\ln(x - 400) - 3.95)^2}{2 \times 0.84^2} \right] \quad \mu\epsilon \ 400 < x < 700$$

Κρουαζιερόπλοιο

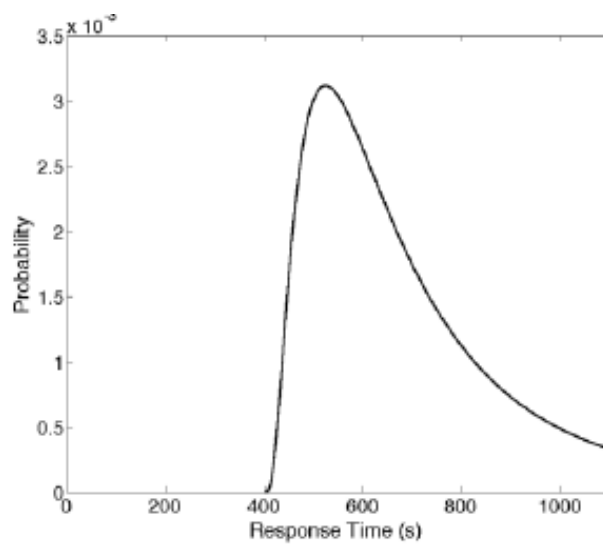
α) Σενάριο ημέρας



Εικόνα 5.4.4.2: κατανομή χρόνου απόκρισης για σενάριο ημέρας σε κρουαζιερόπλοιο

$$y = \frac{1.0548}{\sqrt{2\pi} \cdot 0.702x} \exp \left[-\frac{(\ln(x) - 4.562)^2}{2 \times 0.702^2} \right] \text{ με } 0 < x < 300$$

β) Σενάριο νύχτας



Εικόνα 5.4.4.3: κατανομή χρόνου απόκρισης για σενάριο νύχτας σε κρουαζιερόπλοιο

$$y = \frac{1.1074}{\sqrt{2\pi} \cdot 0.817(x - 400)} \exp \left[-\frac{(\ln(x - 400) - 5.49)^2}{2 \times 0.817^2} \right] \quad \mu\epsilon \ 400 < x < 1100$$

5.4.5 Ταχύτητες κίνησης

Η ταχύτητα κίνησης στο μοντέλο του Carleton εξαρτάται από τρεις παράγοντες: την **βασική ταχύτητα κίνησης s_0** , την **οπτική πυκνότητα του καπνού OD** και την **πυκνότητα ατόμων στον χώρο**.

Η βασική ταχύτητα κίνησης είναι ουσιαστικά η ταχύτητα του ατόμου όταν η κίνησή του δεν παρεμποδίζεται λόγω παρουσίας άλλων ατόμων, καπνού ή διαφόρων εμποδίων (π.χ. έπιπλα ή πεσμένα αντικείμενα). Για τον ορισμό της βασικής ταχύτητας κίνησης για άτομα πλήρως ικανά το μοντέλο του Carleton χρησιμοποιεί τις κατανομές που δίνονται στις προτεινόμενες μεθοδολογίες του IMO, ενώ για άτομα με κινητικά προβλήματα χρησιμοποιεί τα στοιχεία που εξάγονται από δοκιμές που διεξήγαγαν οι K.E. Boyce, T.J. Shields και G.W.H. Silcock σχετικά με την κίνηση ατόμων με διάφορες αναπηρίες.

Εμείς, από τη στιγμή που χρησιμοποιήσαμε την κατηγοριοποίηση επιβατών κατά την οδηγία του IMO (η οποία περιλαμβάνει και το πλήρωμα), θα χρησιμοποιήσουμε και τις αντίστοιχες κατανομές ταχυτήτων που αυτή μας δίνει. Έτσι, οι βασικές ταχύτητες ανά κατηγορία επιβατών στο επίπεδο και το επικλινές είναι οι ακόλουθες:

Table 3.4 – Walking speed on flat terrain (e.g., corridors)

Population groups – passengers	Walking speed on flat terrain (e.g., corridors)	
	Minimum (m/s)	Maximum (m/s)
Females younger than 30 years	0.93	1.55
Females 30-50 years old	0.71	1.19
Females older than 50 years	0.56	0.94
Females older than 50, mobility impaired (1)	0.43	0.71
Females older than 50, mobility impaired (2)	0.37	0.61
Males younger than 30 years	1.11	1.85
Males 30-50 years old	0.97	1.62
Males older than 50 years	0.84	1.4
Males older than 50, mobility impaired (1)	0.64	1.06
Males older than 50, mobility impaired (2)	0.55	0.91
Population groups – crew	Walking speed on flat terrain (e.g., corridors)	
	Minimum (m/s)	Maximum (m/s)
Crew females	0.93	1.55
Crew males	1.11	1.85

Εικόνα 5.4.5.1: κατανομές ταχυτήτων στο επίπεδο σύμφωνα με την οδηγία MSC.1/Circ.1238

Table 3.5 – Walking speed on stairs

Population groups – passengers	Walking speed on stairs (m/s)			
	Stairs down		Stairs up	
	Min.	Max.	Min.	Max.
Females younger than 30 years	0.56	0.94	0.47	0.79
Females 30-50 years old	0.49	0.81	0.44	0.74
Females older than 50 years	0.45	0.75	0.37	0.61
Females older than 50, mobility impaired (1)	0.34	0.56	0.28	0.46
Females older than 50, mobility impaired (2)	0.29	0.49	0.23	0.39
Males younger than 30 years	0.76	1.26	0.5	0.84
Males 30-50 years old	0.64	1.07	0.47	0.79
Males older than 50 years	0.5	0.84	0.38	0.64
Males older than 50, mobility impaired (1)	0.38	0.64	0.29	0.49
Males older than 50, mobility impaired (2)	0.33	0.55	0.25	0.41
Population groups – Crew	Walking speed on stairs (m/s)			
	Stairs down		Stairs up	
	Min.	Max.	Min.	Max.
Crew females	0.56	0.94	0.47	0.79
Crew males	0.76	1.26	0.5	0.84

Εικόνα 5.4.5.2: κατανομές ταχυτήτων στο επικλινές σύμφωνα με την οδηγία MSC.1/Circ.1238

Όπως παρατηρούμε, ανά κατηγορία επιβατών δίνονται δυο τιμές, μια κατώτερη και μια ανώτερη. Με βάση αυτές τις δυο τιμές και χρησιμοποιώντας ομοιόμορφη κατανομή, δίνουμε πριν την εκκίνηση της προσομοίωσης την αντίστοιχη βασική ταχύτητα σε κάθε άτομο ανάλογα με την κατηγορία στην οποία ανήκει.

Όσον αφορά την επίδραση του καπνού στην ταχύτητα κίνησης, το μοντέλο του Carleton χρησιμοποιεί έναν συντελεστή f_s ο οποίος έχει προκύψει από τα αποτελέσματα των δοκιμών στην διάταξη SHEBA που είδαμε στο κεφάλαιο 4. Συγκρινόμενα τα στοιχεία αυτά με βάση τις βασικές ταχύτητες από την οδηγία του IMO, προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις για τον συντελεστή αυτόν:

- Για οπτική πυκνότητα μικρότερη ή ίση με 0.1 OD/m, η επίδραση της ορατότητας θεωρείται αμελητέα. Έτσι:

$$f_s = 1$$

- Για οπτική πυκνότητα $0.1 \text{ OD/m} < \text{optical density} \leq 0.5 \text{ OD/m}$

$$f_s = 1 - 0.2375 \cdot \text{OpticalDensity}$$

- Για οπτική πυκνότητα $0.5 < \text{optical density} \leq 1.0 \text{ OD/m}$

$$f_s = 0.9 - 0.2 \cdot \text{OpticalDensity}$$

- Για οπτική πυκνότητα μεγαλύτερη από 1.0 OD/m

$$f_s = 0.5$$

Για τον υπολογισμό της επίδρασης της πυκνότητας επιβατών, το μοντέλο του Carleton χρησιμοποιεί τα στοιχεία σχετικά με την ταχύτητα κίνησης σε συνάρτηση με την πυκνότητα επιβατών που δίνονται από τους H.E. Nelson και F.W. Mowrer στο εγχειρίδιο της Ένωσης Μηχανικών Πυροπροστασίας των ΗΠΑ (Society of Fire Protection Engineers). Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι τα ίδια στοιχεία χρησιμοποιούνται και από τις προτεινόμενες μεθοδολογίες του IMO για τον υπολογισμό της ταχύτητας κίνησης των επιβατών κατά μήκος των διαδρομών διαφυγής. Από τα στοιχεία αυτά προκύπτουν τα ακόλουθα:

- Για πυκνότητες μικρότερες ή ίσες με 0.55 persons/m², η επίδραση στην κίνηση θεωρείται αμελητέα. Έτσι:

$$f_d = 1$$

- Για πυκνότητες μεγαλύτερες από 0.55 persons/m², η μείωση στην ταχύτητα είναι σχεδόν γραμμική και ο αντίστοιχος συντελεστής υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$f_d = \frac{1 - 0.266d}{0.8537}$$

Τελικώς, η ταχύτητα σε κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$s = s_0 \cdot f_s \cdot f_d$$

5.4.6 Κλίση και κίνηση του πλοίου

Στην παράγραφο 4.6.1 παραθέσαμε όσα στοιχεία διαθέταμε από την βιβλιογραφία σχετικά με την επίδραση της κλίσης και της κίνησης του πλοίου στις ταχύτητες των επιβατών που προσπαθούν να διαφύγουν από το εσωτερικό του πλοίου. Οι ταχύτητες αυτές εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από την κατεύθυνση του επιβάτη ως προς τον άξονα κλίσης του πλοίου.

Όπως είπαμε στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου, το μοντέλο που παρουσιάζουμε δεν χρησιμοποιεί κάποιο σύστημα συντεταγμένων για τον εντοπισμό της θέσης του επιβάτη. Η θέση αυτή καθορίζεται από δυο παράγοντες: το διαμέρισμα στο οποίο βρίσκεται και την απομένουσα απόσταση από την έξοδο που έχει επιλέξει.

Για να μοντελοποιήσουμε λοιπόν την επίδραση των κινήσεων του πλοίου, δεν μεταβάλλουμε την ταχύτητα του επιβάτη, αλλά λαμβάνουμε την ισοδύναμη απόσταση έως την έξοδο που έχει επιλέξει. Παραδείγματος χάριν, ένα άτομο που κινείται με ταχύτητα 1 m/s διανύει μια απόσταση 10 m σε 10 sec. Αν το άτομο αυτό κινηθεί με ταχύτητα 10% μικρότερη, τότε για να διανύσει την ίδια απόσταση θα χρειαστεί $t = 10 \text{ sec} / 0.9 = 11.1 \text{ sec}$. Αν κινούνταν με την ίδια ταχύτητα (δηλαδή 1 m/s), σε 11.1 sec θα διένυε 11.1 m. Η τιμή αυτή είναι η ισοδύναμη απόσταση.

Για τους συντελεστές απομείωσης της ταχύτητας, μέσω των οποίων εξάγονται οι ισοδύναμες αποστάσεις, χρησιμοποιούμε τα στοιχεία της έρευνας του ινστιτούτου TNO Human Factors για τις στατικές κλίσεις και τα στοιχεία του ιαπωνικού κέντρου NMRI για τις δυναμικές κλίσεις, τα οποία είδαμε στην παράγραφο 4.6.1. Υπενθυμίζουμε ότι τα στοιχεία του NMRI δεν αναφέρονται σε συγκεκριμένες κατηγορίες επιβατών, επομένως τα χρησιμοποιούμε καταχρηστικά για όλους τους επιβάτες. Επίσης, λόγω του γεγονότος ότι το μοντέλο αναγνωρίζει μόνο τις αποστάσεις μεταξύ των πορτών και όχι την κατεύθυνση, λαμβάνουμε ως συντελεστή απομείωσης της ταχύτητας (και άρα αύξησης της ισοδύναμης απόστασης) την μέση τιμή μεταξύ των συντελεστών για θετική και αρνητική κλίση (π.χ. 10 μοίρες και -10 μοίρες). Επομένως, οι παράγοντες απομείωσης διαμορφώνονται ως εξής:

Συντελεστές για στατική εγκάρσια κλίση		
Ηλικία	10 μοίρες	20 μοίρες
30 <	0.94	0.88
30 - 50	0.92	0.84
50 >	0.9	0.8

Συντελεστές για στατική διαμήκη κλίση		
Ηλικία	10 μοίρες	20 μοίρες
30 <	0.935	0.835
30 - 50	0.925	0.805
50 >	0.915	0.775

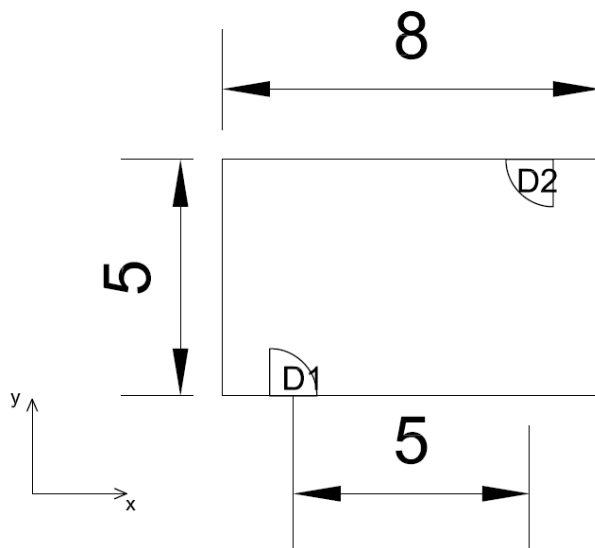
Συντελεστές για δυναμική κλίση 10 μοιρών		
Προνευτασμός	10 sec	0.81
	5 sec	0.79
Διατοιχισμός	10 sec	0.85
	5 sec	0.8

Οι συντελεστές υπολογισμού της ισοδύναμης απόστασης για τις σκάλες είναι οι ακόλουθοι:

Ταχύτητες για εγκάρσια κλίση σε σκάλες				
Ηλικία	Άνοδος		Κάθοδος	
	10 μοίρες	20 μοίρες	10 μοίρες	20 μοίρες
30 <	0.94	0.88	0.94	0.88
30 - 50	0.92	0.84	0.92	0.84
50 >	0.9	0.8	0.9	0.8

Ταχύτητες για διαμήκη κλίση σε σκάλες για όλες τις κατηγορίες			
Άνοδος		Κάθοδος	
10 μοίρες	20 μοίρες	10 μοίρες	20 μοίρες
0.935	0.85	0.92	0.785

Στην παράγραφο 5.4.1 είπαμε ότι όταν ένα άτομο εισέρχεται σε έναν χώρο και επιλέγει την έξοδο από αυτόν, λαμβάνει ως απόσταση μια τιμή μεταξύ της ευθείας απόστασης μεταξύ των πορτών και της διαγωνίου του χώρου. Επομένως, οι αποστάσεις που θα διορθωθούν θα είναι η ευθεία απόσταση και η διαγώνιος. Η διόρθωση γίνεται ανάλογα με την απόσταση ως προς τον κάθε άξονα. Για να γίνει πιο κατανοητό, θα δούμε το επόμενο παράδειγμα:



Έστω ότι ο παραπάνω χώρος βρίσκεται υπο κλίση 10 μοιρών περί τον x άξονα, επομένως κατά τη x κατεύθυνση έχουμε εγκάρσια κλίση και κατά την y κατεύθυνση διαμήκη κλίση. Ένα άτομο ηλικίας 30-50 ετών μπαίνει στον χώρο από την πόρτα D1 και κινείται προς την πόρτα D2 για να εξέλθει από αυτόν. Η απόσταση που θα του δοθεί από το μοντέλο είναι μια τιμή μεταξύ της ευθείας απόστασης των πορτών και της διαγωνίου του χώρου. Για τον υπολογισμό της διαγωνίου του χώρου, ακολουθείται η εξής διαδικασία:

$$x = \frac{\text{μήκος}}{\text{παράγοντας απομείωσης για εγκάρσια κλίση}} = \frac{8}{0,92} = 8,7 \text{ m}$$

$$y = \frac{\text{πλάτος}}{\text{παράγοντας απομείωσης για διαμήκη κλίση}} = \frac{5}{0,925} = 5,4 \text{ m}$$

$$\text{διαγώνιος} = \sqrt{8,7^2 + 5,4^2} = 10,23 \text{ m}$$

Με την ίδια διαδικασία, λαμβάνουμε ισοδύναμη ευθεία απόσταση μεταξύ των πορτών ίση με:

$$\text{απόσταση} < D1, D2 > = \sqrt{5,43^2 + 5,4^2} = 7,66 \text{ m}$$

Επομένως το μοντέλο θα δώσει απόσταση στο άτομο ίση με μια τιμή μεταξύ των 7.66 και 10.23 m.

Με αντίστοιχη διαδικασία προσαρμόζονται οι αποστάσεις και στην περίπτωση του κλιμακοστασίου, και για στατικές και για δυναμικές κλίσεις.

5.4.7 Επιλογή εξόδου

Η επιλογή εξόδου στο μοντέλο του Carleton γίνεται με τρόπο πιθανοθεωρητικό. Αρχικά υπολογίζεται η πιθανότητα επιλογής κάθε εξόδου από τον χώρο και στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας μέθοδο Monte Carlo, ορίζεται από το μοντέλο ποια έξοδο θα χρησιμοποιήσει το άτομο. Η πιθανότητα επιλογής της κάθε εξόδου υπολογίζεται με βάση τρεις παράγοντες: την βασική πιθανότητα επιλογής p_0 , τις συνθήκες που επικρατούν στο διαμέρισμα στο οποίο οδηγεί η έξοδος και την μνήμη του ατόμου σε σχέση με τις εξόδους που έχει ήδη χρησιμοποιήσει.

Η βασική πιθανότητα επιλογής είναι η πιθανότητα να επιλέξει το άτομο τη συγκεκριμένη έξοδο υπό φυσιολογικές συνθήκες, δηλαδή όταν δεν υπάρχει πυρκαγιά και η συγκεκριμένη έξοδος δεν έχει ξαναχρησιμοποιηθεί κατά την διαδικασία διαφυγής. Η πιθανότητα αυτή εισάγεται από τον χρήστη του μοντέλου και είναι καθολική για όλα τα άτομα που συμμετέχουν στην προσομοίωση.

Ο παράγοντας απομείωσης της πιθανότητας επιλογής λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$f_f = (1 - D_s) \frac{100 - T}{100 - T_0}$$

όπου:

D_s [OD/m] η οπτική πυκνότητα πυκνότητα του καπνού

T [°C] η θερμοκρασία του διαμερίσματος την συγκεκριμένη χρονική στιγμή

T_0 [°C] η αρχική θερμοκρασία του διαμερίσματος

Όσον αφορά την μνήμη, χρησιμοποιείται και εδώ ένας παράγοντας απομείωσης της πιθανότητας εκλογής f_p . Οι συγγραφείς του μοντέλου δεν μας δίνουν πληροφορίες ούτε για τις θέσεις μνήμης του κάθε ατόμου, ούτε για τον τρόπο υπολογισμού αυτού του παράγοντα πέρα από το ότι κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0 και 1. Εμείς, θέλοντας να εισάγουμε στο μοντέλο και την επίδραση της ηλικίας στην μνήμη του ατόμου, διακρίναμε δυο περιπτώσεις για τον υπολογισμό του παράγοντα μνήμης:

- Αν το άτομο είναι κάτω των 50 ετών (και άρα ανήκει στις ηλικιακές κατηγορίες κάτω των 30 ετών και μεταξύ 30 και 50 ετών), οι θέσεις μνήμης είναι 10.
- Αν το άτομο είναι άνω των 50 ετών, οι θέσεις μνήμης περιορίζονται σε 5.

Τελικώς, η πιθανότητα επιλογής της εξόδου υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

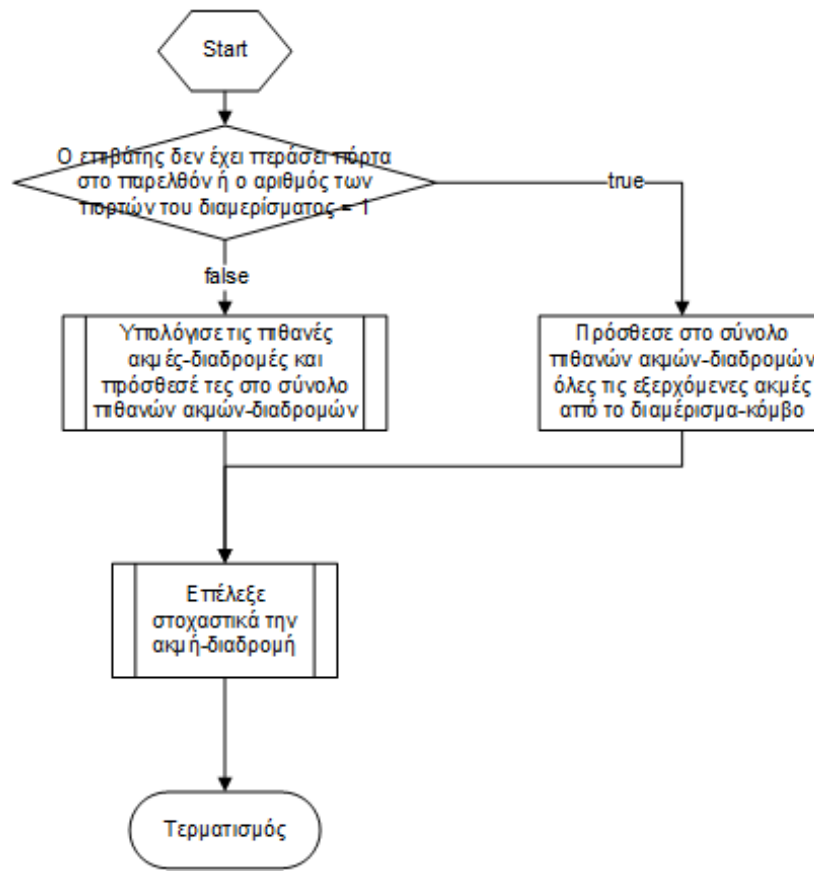
$$p = f_p \cdot f_s \cdot p_0$$

Εδώ θα πρέπει να αναφέρουμε ότι το μοντέλο του Carleton απλοποιεί την διαδικασία επιλογής, κατατώντας τον χώρο κατά τέτοιο τρόπο ώστε σε κάθε διαμέρισμα, διάδρομο ή κλιμακοστάσιο να υπάρχουν το πολύ 2 έξοδοι. Έτσι, αφού υπολογιστούν οι πιθανότητες εκλογής των εξόδων, χρησιμοποιείται ένας γεννήτορας ψευδοτυχαίων αριθμών που δίνει τιμές από 0 έως 1. Στη συνέχεια, συγκρίνεται ο τυχαίος αυτός αριθμός με την μικρότερη πιθανότητα επιλογής ανάμεσα στις δυο εξόδους: αν η πιθανότητα αυτή είναι μεγαλύτερη από τον τυχαίο αριθμό, τότε επιλέγεται αυτή η έξοδος από το άτομο, ενώ αν είναι μικρότερη τότε επιλέγεται η έξοδος με την μεγαλύτερη πιθανότητα.

Φυσικά, ενώ αυτή η απλοποίηση μειώνει την πολυπλοκότητα του μοντέλου και άρα τον χρόνο προσομοίωσης, είναι τουλάχιστον προβληματική για την περίπτωση των πλοίων όπου οι κοινόχρηστοι κυρίως χώροι (σαλόνια, εστιατόρια, διάδρομοι και κλιμακοστάσια) έχουν συνήθως περισσότερες από δυο εξόδους προς άλλους χώρους. Γι'αυτό και εμείς εφαρμόσαμε μια παραλλαγή της δειγματοληψίας Monte Carlo που επιτρέπει την επιλογή για παραπάνω από δυο εξόδους.

Ας πάρουμε για παράδειγμα ένα διαμέρισμα με τρεις εξόδους, τις A1, A2 και A3. Έστω $p(A1) = 0.3$, $p(A2) = 0.5$ και $p(A3) = 0.2$ οι πιθανότητες επιλογής τους. Ο γεννήτορας τυχαίων αριθμών θα μας δώσει μια τιμή x από 0 έως $p(A1)+p(A2)+p(A3) = 1$. Διακρίνονται τρεις περιπτώσεις:

- Αν $x \leq p(A1)$ τότε το άτομο θα επιλέξει την έξοδο A1
- Αν $p(A1) < x \leq p(A1)+p(A2)$ τότε το άτομο θα επιλέξει την έξοδο A2
- Αν $x > p(A1)+p(A2)$ τότε το άτομο θα επιλέξει την έξοδο A3



Εικόνα 5.4.7.1: διάγραμμα ροής αλγόριθμου επιλογής εξόδου

5.4.8 Υπολογισμός απόστασης

Όπως είπαμε και προηγουμένως, όταν ένα άτομο εισέλθει σε έναν χώρο (που δεν είναι ο χώρος συγκέντρωσης ή το εξωτερικό του πλοίου), καλείται να αποφασίσει από ποια έξοδο θα εισέλθει από αυτόν. Μετά την επιλογή της εξόδου, το μοντέλο του δίνει την απόσταση που θα πρέπει να διανύσει, η οποία είναι μια τιμή μεταξύ της ευθείας απόστασης μεταξύ των πορτών εισόδου και εξόδου από τον χώρο, και της διαγωνίου του χώρου στην περίπτωση δωματίου ή του ολικού μήκους του διαδρόμου.

Σε κάθε χρονικό βήμα (1 δευτερόλεπτο), το μοντέλο υπολογίζει την ταχύτητα κίνησης του επιβάτη και αφαιρεί από την συνολική απόσταση την διανυθείσα στο συγκεκριμένο χρονικό βήμα. Ας δούμε το επόμενο παράδειγμα: ένας επιβάτης εισέρχεται στον χώρο από την πόρτα A1 και επιλέγει την πόρτα A2 για να εξέλθει από αυτόν. Η απόσταση που δίνεται από το μοντέλο είναι 10 m. Στο πρώτο χρονικό βήμα υπολογίζεται ταχύτητα ίση με 1.5 m/s, οπότε η

απομένουσα απόσταση στο δεύτερο χρονικό βήμα θα είναι 8.5 m. Στο δεύτερο χρονικό βήμα η ταχύτητα υπολογίζεται ως 1.2 m/s, οπότε στο τρίτο χρονικό βήμα η απομένουσα απόσταση θα είναι 7.3 m κ.ο.κ.

Όταν η απομένουσα απόσταση γίνει μικρότερη ή ίση με το 0, τότε το μοντέλο θεωρεί πως ο επιβάτης έχει φτάσει στην έξοδο από τον χώρο, οπότε και εκκινεί την διαδικασία περάσματος της πόρτας που περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο.

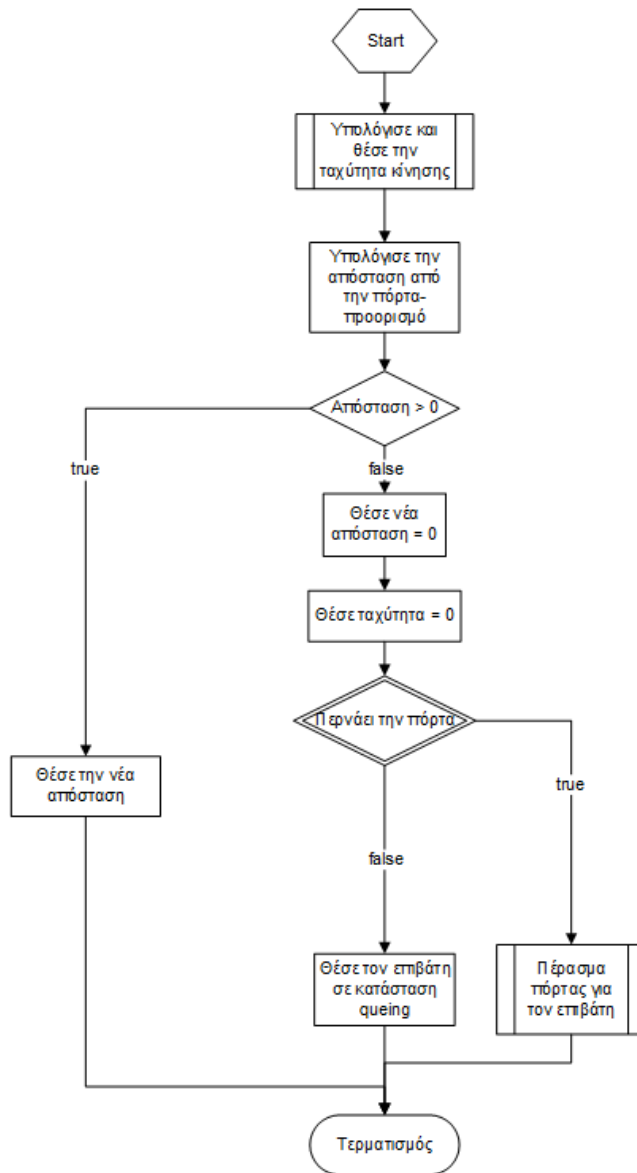
5.4.9 Πέρασμα πόρτας και σχηματισμός ουράς

Όταν ένας επιβάτης προσεγγίσει την επιλεγμένη έξοδο, το μοντέλο καλείται να κρίνει αν αυτός ο επιβάτης θα περάσει στον επόμενο χώρο ή θα πρέπει να περιμένει. Τα κριτήρια είναι δύο: η πυκνότητα επιβατών στον επόμενο χώρο και η μέγιστη επιτρεπόμενη ροή (maximum traffic capacity) της πόρτας.

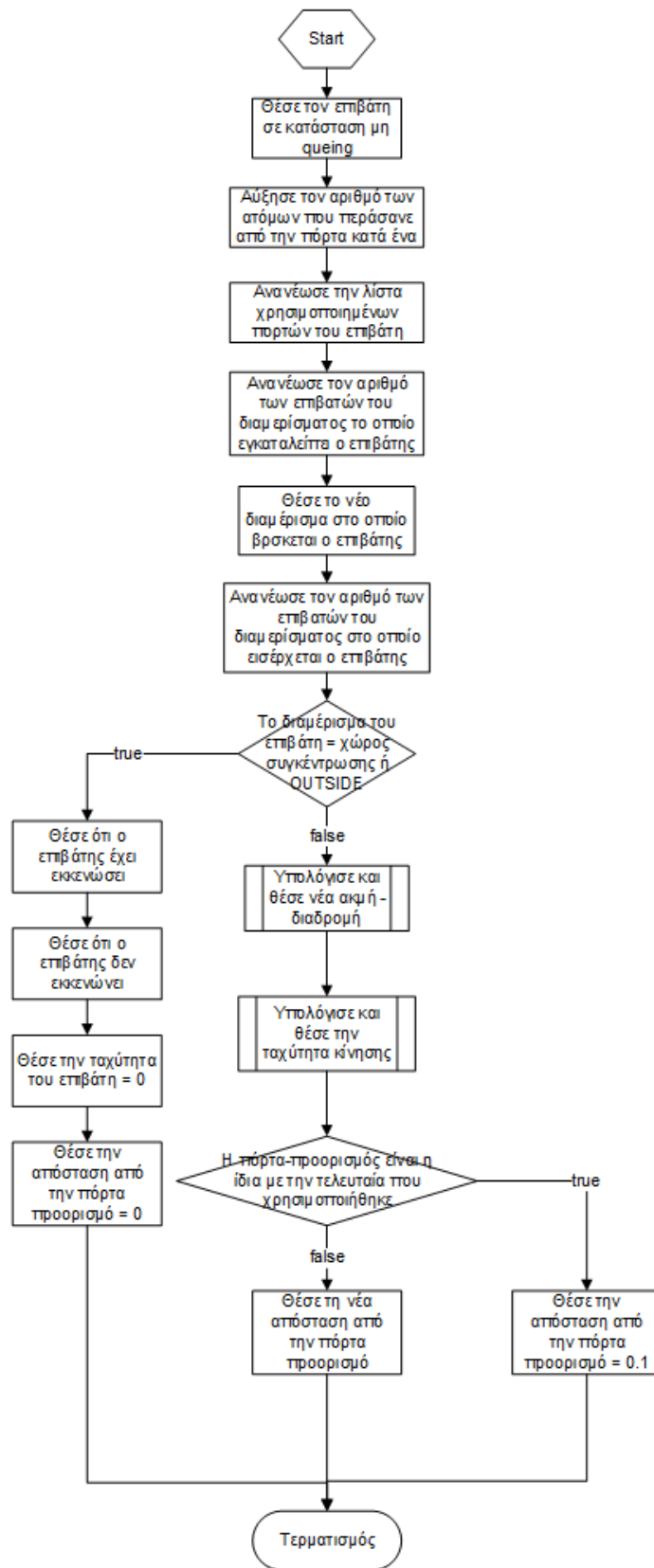
Από το μοντέλο του Carleton δίνεται η τιμή $D_s = 4 \text{ persons/m}^2$ ως κρίσιμη για την πυκνότητα επιβατών: αν η πυκνότητα στο επόμενο διαμέρισμα υπερβαίνει την τιμή αυτή, τότε οι επιβάτες που βρίσκονται στις πόρτες εισόδου παραμένουν σε αυτές (και ως εκ τούτου στον αρχικό χώρο) έως ότου να μειωθεί η πυκνότητα αυτή.

Για την μέγιστη ροή, το μοντέλο του Carleton χρησιμοποιεί την τιμή 1.3 persons/s/m η οποία δίνεται από το SFPE Handbook. Εμείς θα χρησιμοποιήσουμε την τιμή 1.33 persons/s/m που δίνεται από την οδηγία MSC.1/Circ. 1238 του IMO. Εδώ θα πρέπει να τονίσουμε ότι ως πλάτος πόρτας λαμβάνεται το καθαρό πλάτος (clear width), όπως το περιγράψαμε στην παράγραφο για την μοντελοποίηση του χώρου.

Εδώ προχωρήσαμε σε μια σημαντική διαφοροποίηση από το μοντέλο του Carleton. Στο μοντέλο αυτό, η σειρά με την οποία τα άτομα που βρίσκονται στην ίδια ουρά θα περάσουν στο επόμενο διαμέρισμα, εξαρτάται από τον αναγνωριστικό τους αριθμό (ID number). Αυτό σημαίνει ότι αν δυο άτομα περιμένουν να περάσουν στον επόμενο χώρο, θα περάσει πρώτο αυτό με το χαμηλότερο ID, ασχέτως αν έφτασε στην πόρτα σε επόμενο χρονικό βήμα (και συνεπώς βρίσκεται πιο πίσω στην ουρά). Στο δικό μας μοντέλο χρησιμοποιούμε έναν μετρητή, ο οποίος καταγράφει για πόσα χρονικά βήματα βρίσκεται το κάθε άτομο στην ουρά και δίνει προτεραιότητα σε αυτό που περίμενε τα περισσότερα.



Εικόνα 5.4.9.1: διάγραμμα ροής αλγόριθμου κίνησης επιβάτη ανα χρονικό βήμα



Εικόνα 5.4.9.2: διάγραμμα ροής αλγόριθμου περάσματος πόρτας

5.4.10 Μοντελοποίηση πανικού

Στο μοντέλο που αναπτύξαμε με βάση το μοντέλο του Carleton, και πέρα από τις αλλαγές και τις προσθήκες που κάναμε σε αυτό, προσπαθήσαμε να εισάγουμε και την επίδραση που έχουν στην διαδικασία τα άτομα τα οποία σε κάποιο χρονικό σημείο βρίσκονται υπό την επήρεια του πανικού.

Τις τυπικές συμπεριφορές των ατόμων που βρίσκονται υπό την επήρεια του πανικού, τις είδαμε στο κεφάλαιο 4 κατά την επισκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας. Λόγω του γεγονότος ότι το μοντέλο όπως είναι δομημένο δεν επιτρέπει την λεπτομερή αναπαράσταση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των επιβατών, οι όποιες συμπεριφορές μπορούν να αναπαρασταθούν μόνο ως αυξομειώσεις στις ταχύτητες κίνησης και αλλαγές στον τρόπο επιλογής των διαδρομών διαφυγής. Έτσι, από τις συμπεριφορές αυτές εισάγαμε στο μοντέλο τις ακόλουθες:

- 1) Τα άτομα που βρίσκονται υπό την επήρεια του πανικού, κινούνται πιο γρήγορα από το κανονικό. Το μοντέλο αυξάνει την βασική ταχύτητα των συγκεκριμένων ατόμων κατά 20% καθ'όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.
- 2) Η συμπεριφορά του ατόμου γίνεται φαινομενικά «αλλοπρόσαλλη». Οι επιβάτες στους οποίους έχει δοθεί από το μοντέλο η ιδιότητα “panicked”, δεν διαθέτουν μνήμη για τις πόρτες από τις οποίες έχουν περάσει ούτε λαμβάνουν λογικές αποφάσεις. Έτσι, η επιλογή εξόδου δεν γίνεται με βάση την διαδικασία που περιγράψαμε στην παράγραφο 5.4.6, αλλά είναι τελείως τυχαία. Αυτό σημαίνει ότι όταν ο επιβάτης που βρίσκεται σε πανικό κληθεί να επιλέξει πόρτα, όλες οι διαθέσιμες επιλογές του έχουν την ίδια πιθανότητα εκλογής, άσχετα αν οι συνθήκες στους επόμενους χώρους είναι απαγορευτικές.
- 3) Ως απόσταση μεταξύ της πόρτας εισόδου και της πόρτας εξόδου λαμβάνεται η μεγαλύτερη απόσταση που μπορεί να δώσει το πρόγραμμα, δηλαδή η διαγώνιος του χώρου.

Ο αριθμός των ατόμων που θα εμφανίσουν πανικό κατά την διάρκεια της προσομοίωσης εισάγεται στο μοντέλο ως ποσοστό επί του συνόλου των επιβατών. Στη συνέχεια, το μοντέλο επιλέγει τυχαία ποιοι από τους επιβάτες θα είναι υπό την επήρεια πανικού και αυτοί θα ακολουθήσουν την ανωτέρω περιγραφόμενη συμπεριφορά καθ'όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

5.4.11 Πορεία προσομοίωσης

Οι αρχικές διαδικασίες πριν την έναρξη της προσομοίωσης είναι οι ακόλουθες:

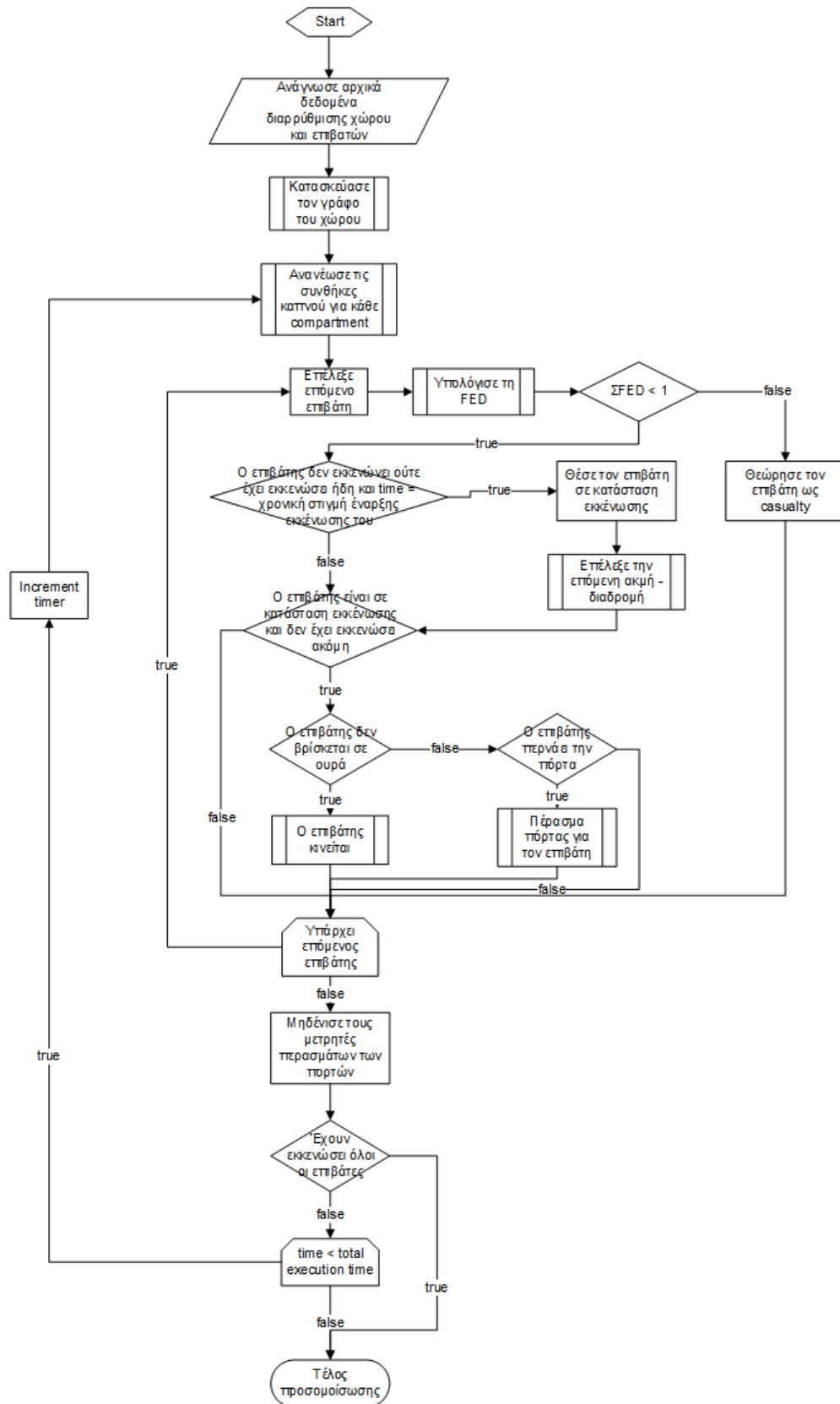
- 1) Αρχικά εισάγεται στο μοντέλο ο υπό μελέτη χώρος και το αρχείο Excel με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης πυρκαγιάς από το πρόγραμμα CFAST. Το μοντέλο ελέγχει την εγκυρότητα των αρχείων.
- 2) Ο χρήστης εισάγει τον αριθμό επιβατών και πληρώματος. Το μοντέλο ελέγχει τον εισαγόμενο πληθυσμό με βάση την χωρητικότητα καμπινών πληρώματος και επιβατών, καθώς και των κοινόχρηστων χώρων. Αν ο πληθυσμός αυτός ξεπερνά την χωρητικότητα, περιορίζεται αυτόματα από το μοντέλο ώστε να είναι ίσος με αυτήν (διαδικασία σύμφωνη με τις υποδείξεις του IMO στην οδηγία MSC.1/Circ.1238).
- 3) Το μοντέλο κατασκευάζει τα άτομα σύμφωνα με το προεπιλεγμένο δείγμα και τους δίδει τις βασικές ταχύτητες κίνησης χρησιμοποιώντας ομοιόμορφη κατανομή μεταξύ των τιμών που δίνει η οδηγία MSC.1/Circ.1238.
- 4) Επιλέγεται το είδος του σεναρίου (ημέρα ή νύχτα) και ο τύπος του υπό μελέτη πλοίου. Το μοντέλο κατανέμει με τυχαία σειρά τους επιβάτες και το πλήρωμα στους διάφορους χώρους, σύμφωνα με τα βασικά σενάρια του κεφαλαίου 13 του κώδικα FSS.
- 5) Το μοντέλο ορίζει τον χρόνο εκκίνησης του κάθε ατόμου, με βάση τις κατανομές του ερευνητικού προγράμματος SAFEGUARD.
- 6) Με βάση το ποσοστό των επιβατών που θα παρουσιάσουν πανικό, το μοντέλο τους επιλέγει τυχαία μέσα στο κατασκευασμένο δείγμα. Σε κάθε έναν από αυτούς τους επιβάτες προστίθεται παράγοντας προσαύξησης ταχύτητας κατά 20% λόγω του πανικού.

Μετά την έναρξη της προσομοίωσης και σε κάθε χρονικό βήμα το μοντέλο επικαιροποιεί τις περιβαλλοντικές συνθήκες με βάση τα στοιχεία της προσομοίωσης πυρκαγιάς από το πρόγραμμα CFAST και υπολογίζει τους αντίστοιχους παράγοντες απομείωσης ταχύτητας και πιθανότητας επιλογής των πορτών. Στη συνέχεια, παίρνει με τη σειρά (δηλαδή το ID number) τους επιβάτες και για τον κάθε έναν ακολουθεί την παρακάτω διαδικασία:

- 1) Ελέγχεται αν ο επιβάτης έχει ήδη διαφύγει (βρίσκεται στον χώρο συγκέντρωσης ή σε εξωτερικό χώρο). Αν αυτό ισχύει, το μοντέλο προχωρά στον επόμενο επιβάτη.
- 2) Υπολογίζεται η fractional effective dose λόγω της παρουσίας τοξικών παραγώγων που θα λάβει ο επιβάτης στο συγκεκριμένο χρονικό βήμα και ελέγχεται αν αυτή είναι μικρότερη από τη μονάδα. Σε διαφορετική περίπτωση, ο επιβάτης θεωρείται casualty και σταματά να λαμβάνει μέρος στην προσομοίωση.

- 3) Ελέγχεται αν ο επιβάτης έχει εκκινήσει ή αν εκκινεί το συγκεκριμένο χρονικό βήμα. Στην δεύτερη περίπτωση το μοντέλο τον θέτει σε κατάσταση εκκένωσης και ορίζει την αρχική διαδρομή του (αρχική ακμή). Αν δεν έχει εκκινήσει, ούτε εκκινεί στο συγκεκριμένο χρονικό βήμα, το μοντέλο προχωρεί στον επόμενο επιβάτη.
- 4) Επικαιροποιούνται οι πυκνότητες επιβατών σε κάθε χώρο και υπολογίζονται οι αντίστοιχοι συντελεστές απομείωσης των ταχυτήτων των επιβατών.
- 5) Ελέγχεται αν στον χώρο που βρίσκεται ο επιβάτης υπάρχει άτομο που να βρίσκεται σε πανικό. Αν αυτό ισχύει, προστίθεται παράγοντας απομείωσης της ταχύτητας ίσος με 5%.
- 6) Υπολογίζεται η ταχύτητα κίνησης του επιβάτη.
- 7) Ελέγχεται αν ο επιβάτης βρίσκεται σε κατάσταση queuing (η απόσταση εως την επιλεγμένη πόρτα είναι ίση ή μικρότερη του μηδενός) και ορίζεται αν θα περάσει σε αυτό το χρονικό βήμα με βάση τον counter της πόρτας. Αν ο επιβάτης περάσει, του δίνεται καινούργια διαδρομή (νέα ακμή), εκτός αν ο χώρος στον οποίο εισέρχεται είναι είτε ο χώρος συγκέντρωσης, είτε ο εξωτερικός χώρος του πλοίου: σε αυτή την περίπτωση, το μοντέλο θεωρεί ότι ο επιβάτης διέφυγε και σταματά να τον λαμβάνει υπόψη στην προσομοίωση.
- 8) Αν ο επιβάτης δεν βρίσκεται σε κατάσταση queuing, υπολογίζεται η απόσταση που θα διανύσει στο συγκεκριμένο χρονικό βήμα και αφαιρείται από την απομένουσα απόσταση μέχρι την πόρτα που επέλεξε.

Μετά το πέρας της προσομοίωσης για τον κάθε επιβάτη, το μοντέλο ελέγχει αν υπάρχουν ακόμα επιβάτες σε κατάσταση διαφυγής. Αν αυτό ισχύει, επαναλαμβάνει την παραπάνω διαδικασία για το επόμενο χρονικό βήμα, ενώ σε διαφορετική περίπτωση η προσομοίωση τερματίζεται και το μοντέλο προχωρά στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Στην επόμενη σελίδα, παρουσιάζεται το γενικό διάγραμμα ροής του μοντέλου.



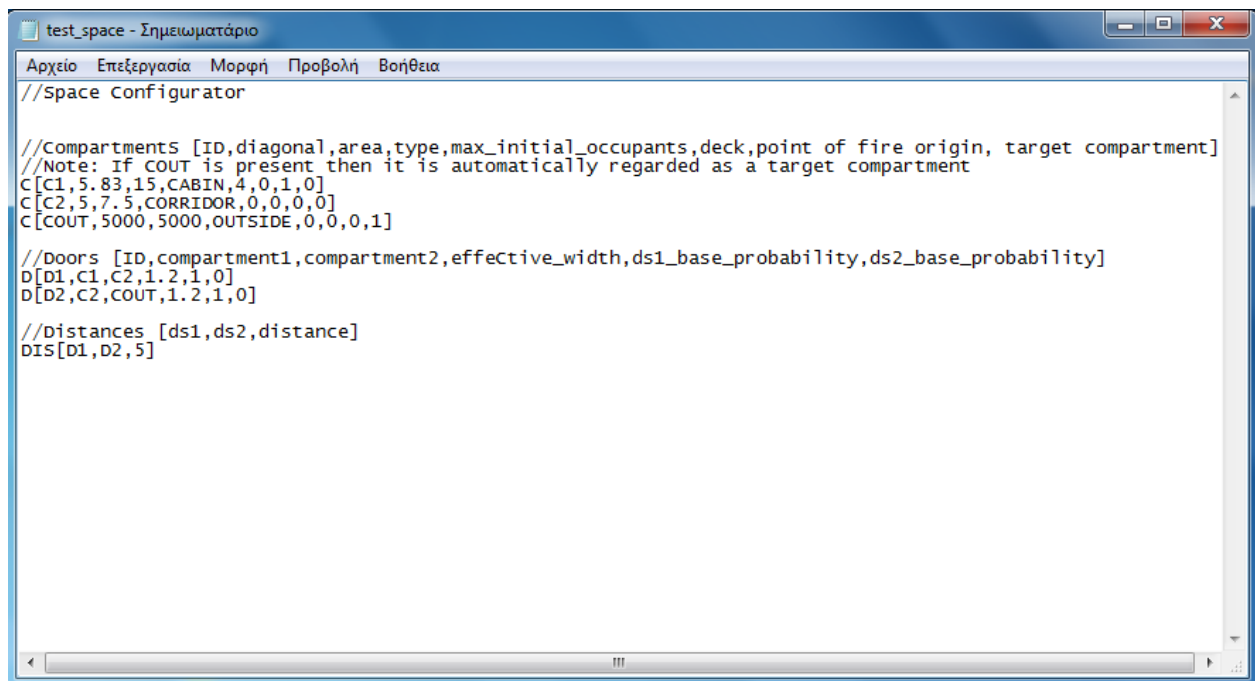
Εικόνα 5.4.11.1: γενικό διάγραμμα ροής μοντέλου

5.4.12 Εισαγωγή δεδομένων

Τα δεδομένα που χρειάζονται ώστε να τρέξει η προσομοίωση είναι τα εξής:

- Η γεωμετρία του χώρου
- Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης πυρκαγιάς από το μοντέλο CFAST
- Το είδος του σεναρίου (ημέρας ή νύχτας)
- Ο τύπος του πλοίου (RO-PAX ή κρουαζιερόπλοιο)
- Ο συνολικός χρόνος της προσομοίωσης σε sec (και άρα ο αριθμός των χρονικών βημάτων)
- Το πλήθος επιβατών και πληρώματος.
- Το ποσοστό των ατόμων που θα βρίσκονται υπό καθεστώς πανικού.

Η γεωμετρία του χώρου εισάγεται μέσω ενός ειδικά διαμορφωμένου αρχείου .txt, το οποίο κατασκευάζει ο χρήστης. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η δομή του αρχείου αυτού για έναν χώρο που αποτελείται από μια καμπίνα C1 διαστάσεων 3x5 m, η οποία ενώνεται μέσω της πόρτας D1, καθαρού πλάτους 1.2 m, με έναν διάδρομο C2 διαστάσεων 5x1.5 m. Ο διάδρομος συνδέεται με τον εξωτερικό χώρο μέσω της πόρτας D2. Σημειώνεται ότι ο εξωτερικός χώρος λογίζεται ως διαμέρισμα (COUT) πολύ μεγάλων διαστάσεων.



```
//Space Configurator

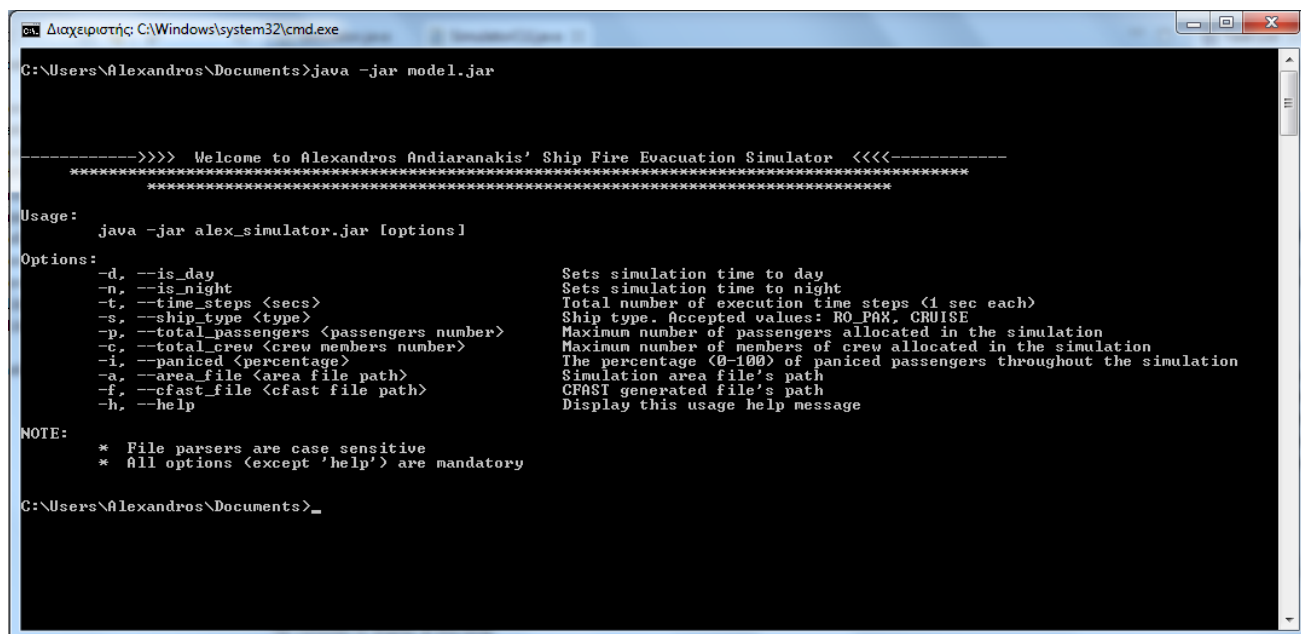
//Compartments [ID,diagonal,area,type,max_initial_occupants,deck,point of fire origin, target compartment]
//Note: If COUT is present then it is automatically regarded as a target compartment
C[C1,5.83,15,CABIN,4,0,1,0]
C[C2,5,7.5,CORRIDOR,0,0,0,0]
C[COUT,5000,5000,OUTSIDE,0,0,0,1]

//Doors [ID,compartment1,compartment2,effective_width,ds1_base_probability,ds2_base_probability]
D[D1,C1,C2,1.2,1,0]
D[D2,C2,COUT,1.2,1,0]

//Distances [ds1,ds2,distance]
DIS[D1,D2,5]
```

Εικόνα 5.4.12.1: δομή αρχείου εισαγωγής χώρου

Τα υπόλοιπα δεδομένα που χρειάζεται το μοντέλο εισάγονται μέσω γραμμής εντολών (command prompt). Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το υπόμνημα του μοντέλου, όπως εμφανίζεται στο παράθυρο της γραμμής εντολών:



```
Διαχειριστής: C:\Windows\system32\cmd.exe
C:\Users\Alexandros\Documents>java -jar model.jar

----->>> Welcome to Alexandros Andiaranakis' Ship Fire Evacuation Simulator <<<-----
*****
*****

Usage:
    java -jar alex_simulator.jar [options]

Options:
  -d, --is_day           Sets simulation time to day
  -n, --is_night        Sets simulation time to night
  -t, --time_steps <secs> Total number of execution time steps (1 sec each)
  -s, --ship_type <type> Ship type. Accepted values: RO_PAX, CRUISE
  -p, --total_passengers <passengers number> Maximum number of passengers allocated in the simulation
  -c, --total_crew <crew members number> Maximum number of members of crew allocated in the simulation
  -i, --paniced <percentage> The percentage (0-100) of paniced passengers throughout the simulation
  -a, --area_file <area file path> Simulation area file's path
  -f, --cfast_file <cfast file path> CFAST generated file's path
  -h, --help            Display this usage help message

NOTE:
  * File parsers are case sensitive
  * All options (except 'help') are mandatory

C:\Users\Alexandros\Documents>_
```

Εικόνα 5.4.12.2: παράθυρο εισαγωγής στοιχείων σεναρίου

Για παράδειγμα, θέλουμε να τρέξουμε ένα σενάριο ημέρας σε πλοίο RO-PAX, στο οποίο υπάρχουν 50 άτομα πλήρωμα και 500 επιβάτες, το 5% των οποίων βρίσκεται σε κατάσταση πανικού. Το σενάριο θα τρέξει για χρόνο μιας ώρας ή 3600 δευτερολέπτων (άρα 3600 χρονικά βήματα). Η εντολή εισαγωγής είναι:

```
java -jar <όνομα εκτελέσιμου αρχείου του μοντέλου> -d -t 3600 -p 500 -c 50 -i 5 -a <όνομα αρχείου εισαγωγής χώρου> -f <όνομα αρχείου αποτελεσμάτων CFAST>
```

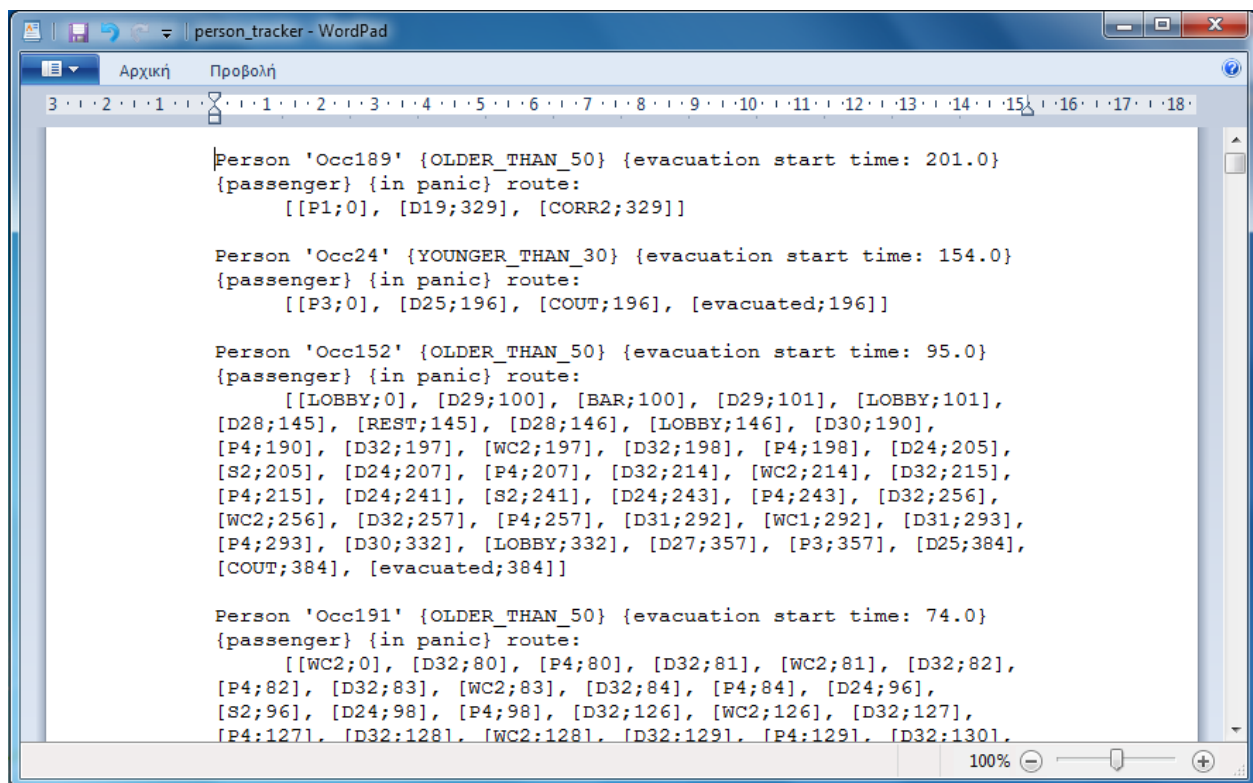
Κατά την εκκίνηση της προσομοίωσης, το πρόγραμμα ελέγχει την σωστή σύνταξη του αρχείου εισαγωγής του χώρου και την αντιστοιχία του με το αρχείο δεδομένων του CFAST καθώς τα παραπάνω εισαγόμενα χαρακτηριστικά του σεναρίου. Σε περίπτωση αναντιστοιχίας, τυπώνει ειδικό μήνυμα που περιγράφει το πρόβλημα και τερματίζει χωρίς να προχωρήσει στην προσομοίωση.

5.4.13 Εξαγωγή αποτελεσμάτων

Μετά την επιτυχή ολοκλήρωση της προσομοίωσης, το μοντέλο εξάγει τα παραγόμενα δεδομένα υπό τη μορφή ενός αρχείου .txt και ενός αρχείου .xlsx. Στο αρχείο txt με την ονομασία person_tracker, περιγράφονται τα άτομα που δημιούργησε το μοντέλο για την προσομοίωση. Τα στοιχεία που περιλαμβάνει είναι:

- Το ID του ατόμου.
- Το φύλο και την ηλικία του.
- Την κατηγορία του (επιβάτης ή πλήρωμα).
- Την αρχική θέση του ατόμου στον χώρο.
- Την χρονική στιγμή εκκίνησής του.
- Την διαδρομή του και τον χρόνο που παρέμεινε σε κάθε διαμέρισμα και σε κάθε πόρτα
- Την χρονική στιγμή ολοκλήρωσης της διαφυγής του.

Το αρχείο αυτό έχει την ακόλουθη μορφή:



```
Person 'Occ189' {OLDER_THAN_50} {evacuation start time: 201.0}
{passenger} {in panic} route:
    [[P1;0], [D19;329], [CORR2;329]]

Person 'Occ24' {YOUNGER_THAN_30} {evacuation start time: 154.0}
{passenger} {in panic} route:
    [[P3;0], [D25;196], [COUT;196], [evacuated;196]]

Person 'Occ152' {OLDER_THAN_50} {evacuation start time: 95.0}
{passenger} {in panic} route:
    [[LOBBY;0], [D29;100], [BAR;100], [D29;101], [LOBBY;101],
    [D28;145], [REST;145], [D28;146], [LOBBY;146], [D30;190],
    [P4;190], [D32;197], [WC2;197], [D32;198], [P4;198], [D24;205],
    [S2;205], [D24;207], [P4;207], [D32;214], [WC2;214], [D32;215],
    [P4;215], [D24;241], [S2;241], [D24;243], [P4;243], [D32;256],
    [WC2;256], [D32;257], [P4;257], [D31;292], [WC1;292], [D31;293],
    [P4;293], [D30;332], [LOBBY;332], [D27;357], [P3;357], [D25;384],
    [COUT;384], [evacuated;384]]

Person 'Occ191' {OLDER_THAN_50} {evacuation start time: 74.0}
{passenger} {in panic} route:
    [[WC2;0], [D32;80], [P4;80], [D32;81], [WC2;81], [D32;82],
    [P4;82], [D32;83], [WC2;83], [D32;84], [P4;84], [D24;96],
    [S2;96], [D24;98], [P4;98], [D32;126], [WC2;126], [D32;127],
    [P4;127], [D32;128], [WC2;128], [D32;129], [P4;129], [D32;130].
```

Εικόνα 5.4.13.1: δομή αρχείου των δεδομένων κίνησης των επιβατών

Το αρχείο .xlsx με την ονομασία simulation_results παρουσιάζει για κάθε χρονικό βήμα τις εξής πληροφορίες:

- Ο αριθμός των ατόμων που έχουν διαφύγει.
- Ο αριθμός των ατόμων που έχουν χαρακτηριστεί ως casualties.
- Η πυκνότητα επιβατών σε κάθε χώρο.
- Ο αριθμός των ατόμων που διέρχονται από κάθε πόρτα.

Το είδος και η μορφή των εξαγόμενων στοιχείων είναι τέτοια ώστε να πληρούνται οι οδηγίες του IMO σχετικά με τους στόχους της ανάλυσης της διαδικασίας διαφυγής, δηλαδή η καταγραφή των διαδρομών των επιβατών και του χρόνου διαφυγής τους, καθώς και ο εντοπισμός των σημείων εκείνων στα οποία παρατηρείται συμφόρηση και μεγάλοι χρόνοι αναμονής.

5.5 Επιβεβαίωση (validation) του μοντέλου διαφυγής σύμφωνα με την οδηγία MSC.1/Circ.1238

Η οδηγία *MSC.1/Circ.1238* του IMO, πέραν των δυο μεθοδολογιών για την διενέργεια της ανάλυσης διαφυγής στα επιβατηγά πλοία, περιλαμβάνει και ένα σετ δοκιμών τις οποίες θα πρέπει να περάσουν επιτυχώς τα προτεινόμενα μοντέλα διαφυγής. Οι δοκιμές αυτές εξασφαλίζουν ότι το μοντέλο μπορεί να προσομοιώσει ρεαλιστικά κάποιες τυπικές συμπεριφορές σχετικά με τη διαφυγή, καθώς και να εξάγει ορθά αποτελέσματα. Τα είδη των δοκιμών είναι τέσσερα:

- Δοκιμές των διαφόρων μερών του μοντέλου (component testing)
- Επιβεβαίωση της λειτουργίας του (functional verification)
- Ποιοτική επιβεβαίωση (qualitative verification)
- Ποσοτική επιβεβαίωση (quantitative verification)

Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι τα διάφορα προτεινόμενα τεστ ακολουθούν την ίδια λογική με τις προτεινόμενες μεθοδολογίες, που είδαμε προηγουμένως. Δηλαδή, οι διάφορες επιδράσεις του περιβάλλοντος (κίνηση του πλοίου, θερμοκρασία, καπνός, τοξικές εκλύσεις κλπ.) δεν λαμβάνονται υπόψη.

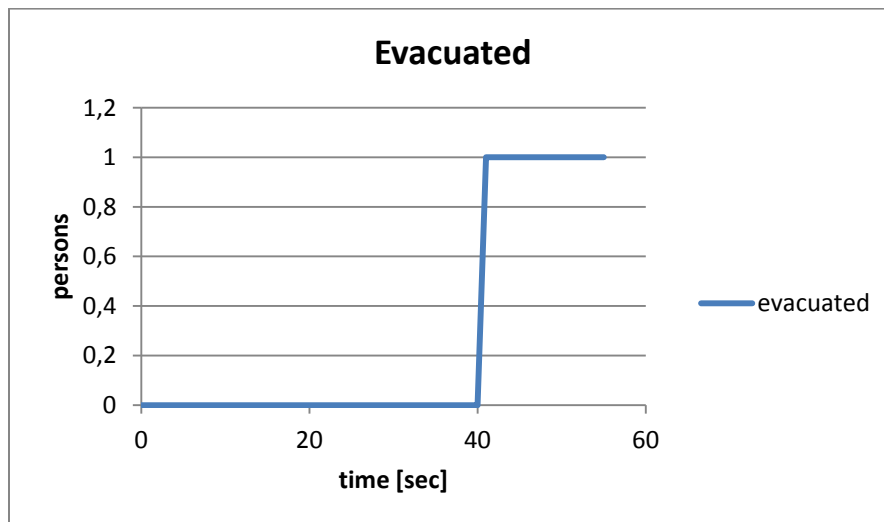
5.5.1 Δοκιμές συστατικών μερών (component testing)

Σκοπός των δοκιμών αυτών είναι να επιβεβαιώσουν ότι τα διάφορα υπο-μοντέλα (sub-models) που περιλαμβάνει το προτεινόμενο μοντέλο λειτουργούν σύμφωνα με τις προδιαγραφές. Αυτή η κατηγορία δοκιμών περιλαμβάνει 7 τεστ.

1^ο τεστ

Το τεστ αυτό αφορά την ταχύτητα στο επίπεδο (π.χ. σε διάδρομο). Εδώ, έχουμε ένα άτομο που καλείται να περάσει έναν διάδρομο με πλάτος 2 m και μήκος 40 m, με ταχύτητα σταθερή στο 1 m/s. Η απόσταση αυτή θα πρέπει να διανυθεί σε 40 s.

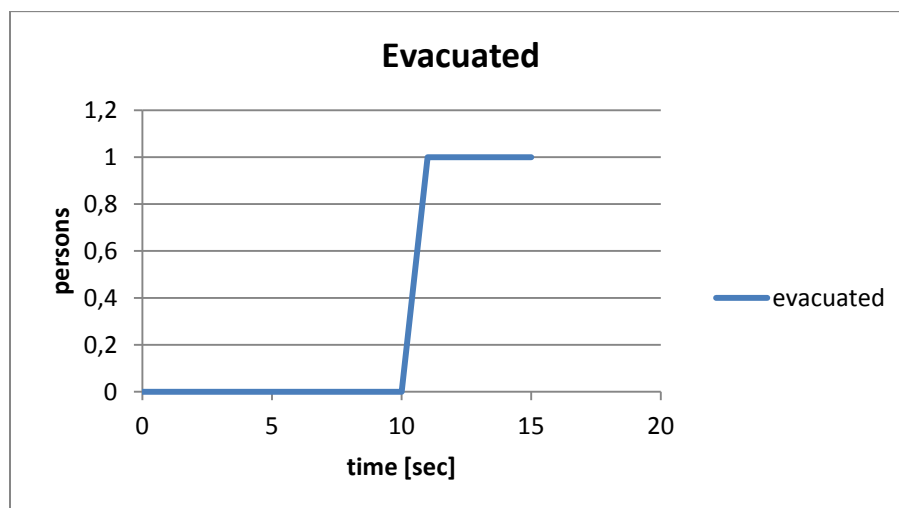
Ο χώρος που κατασκευάσαμε αποτελείται από ένα μικρό δωμάτιο C1 από το οποίο εκκινεί το άτομο, έναν διάδρομο CORR1 διαστάσεων 40x2 m και τον εξωτερικό χώρο COUT. Το άτομο εκκινεί την χρονική στιγμή 0. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης ήταν 41 sec, με το 1 sec να είναι ο χρόνος που χρειάστηκε ώστε να κινηθεί από το αρχικό διαμέρισμα στον διάδρομο.



Εικόνα 5.5.1.1: χρόνος ολοκλήρωσης 1^{ου} τεστ

2^ο τεστ

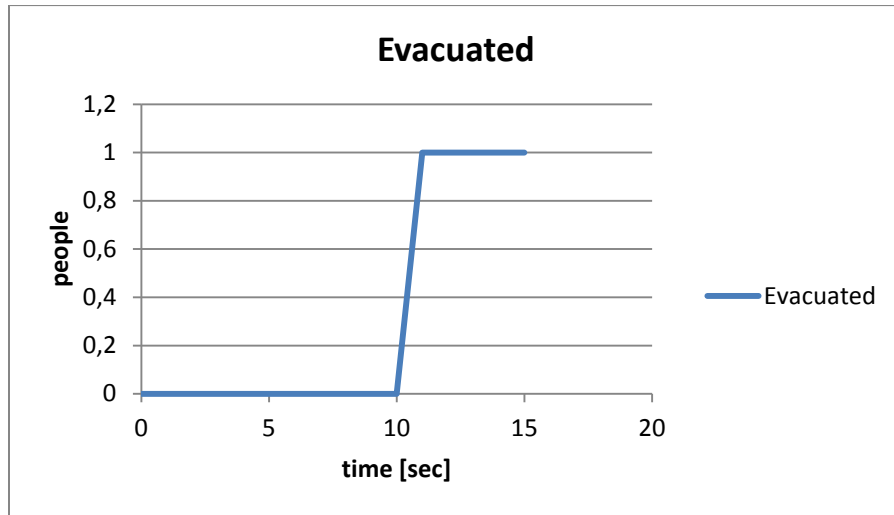
Το 2^ο τεστ αφορά την ταχύτητα σε σκάλες. Εδώ, ένα άτομο θα πρέπει να ανέβει μια σκάλα μήκους 10 m και πλάτους 2 m με ταχύτητα 1 m/s. Η διαδικασία θα πρέπει να ολοκληρωθεί σε 10 sec. Αντιστοίχως με το πρώτο τεστ, ο χώρος αποτελείται από ένα διαμέρισμα C1 όπου και βρίσκεται αρχικά το άτομο, μια σκάλα STAIR1 και τον εξωτερικό χώρο. Η διαδικασία ολοκληρώθηκε σε 11 sec για τον ίδιο λόγο όπως και στο προηγούμενο τεστ.



Εικόνα 5.5.1.2: χρόνος ολοκλήρωσης 2^{ου} τεστ

3^ο τεστ

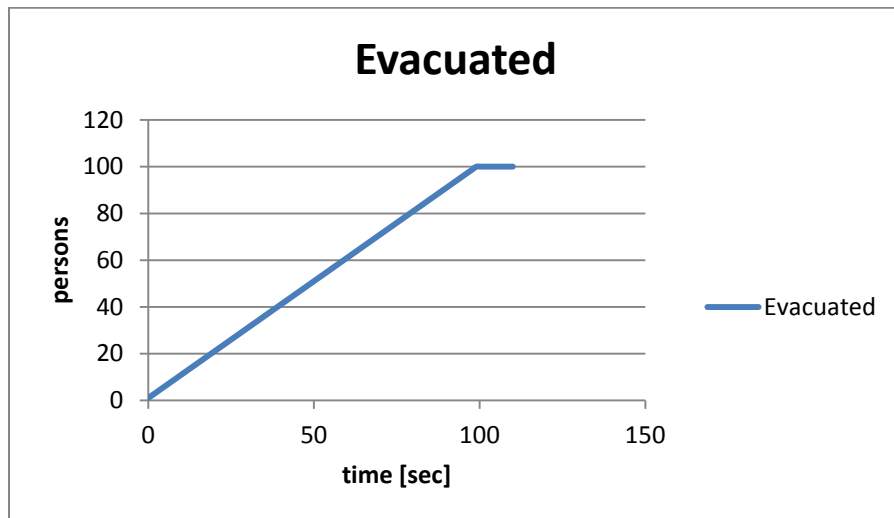
Το 3ο τεστ είναι ίδιο με το 2^ο, μόνο που εδώ το άτομο κατεβαίνει τη σκάλα. Η διαδικασία ολοκληρώθηκε και εδώ σε 11 sec.



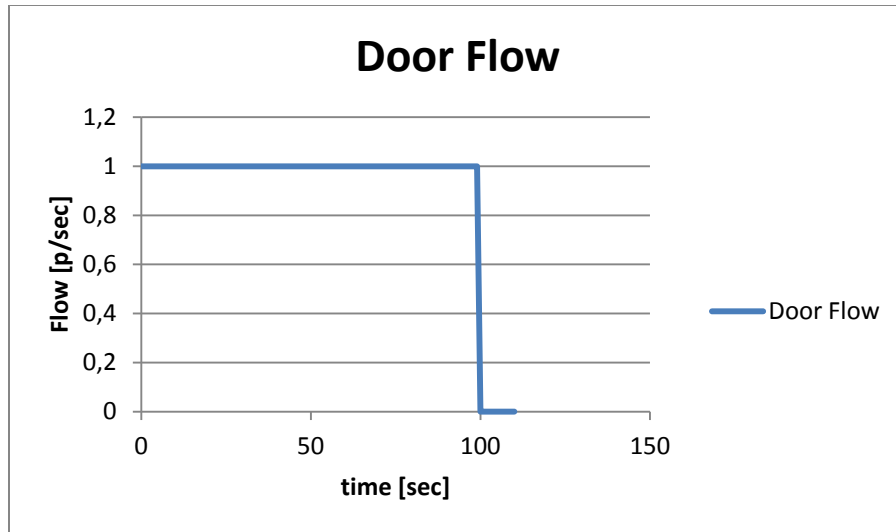
Εικόνα 5.5.1.3: χρόνος ολοκλήρωσης 3^{ου} τεστ

4^ο τεστ

Το 4^ο τεστ αφορά την μέγιστη ροή των πορτών. Η διάταξη εδώ είναι ένα δωμάτιο 8x5 m, με μια έξοδο πλάτους 1 m. Μέσα στον χώρο βρίσκονται 100 άτομα, τα οποία εκκινούν την χρονική στιγμή 0. Θα πρέπει να δείξουμε ότι η ροή επιβατών στην έξοδο δεν ξεπερνά την τιμή 1.33 p/s. Τα αποτελέσματα είναι τα ακόλουθα:



Εικόνα 5.5.1.4: χρόνος ολοκλήρωσης 4^{ου} τεστ



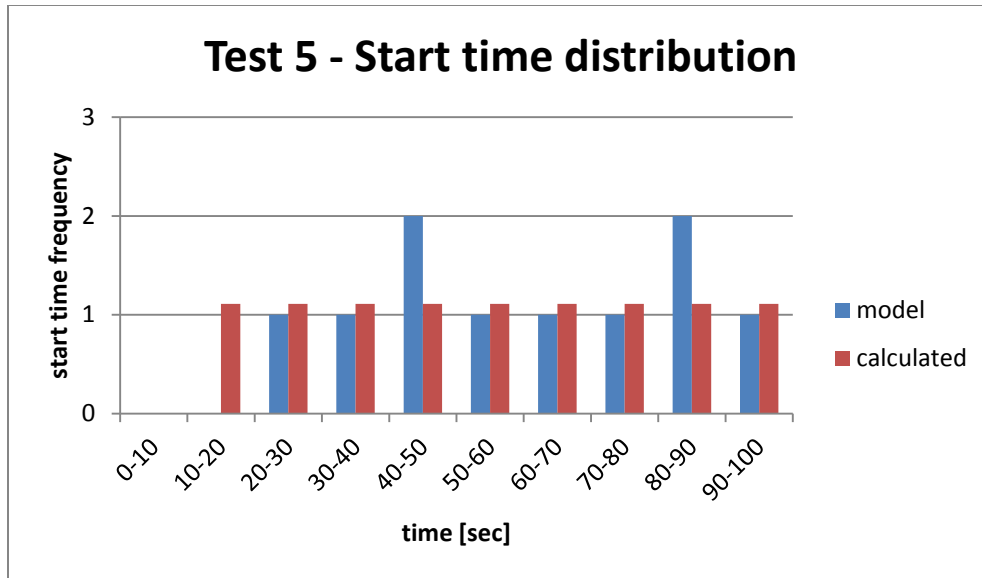
Εικόνα 5.5.1.5: ροή εξόδου στο 4^ο τεστ

Όπως βλέπουμε, η ροή στην έξοδο του χώρου είναι 1 p/sec καθ'όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αυτό συμβαίνει διότι, όπως αναλύσαμε και στην αντίστοιχη παράγραφο, η δομή του μοντέλου είναι τέτοια που επιτρέπει να περάσει ακέραιος αριθμός ατόμων από την κάθε έξοδο κατά την διάρκεια ενός χρονικού βήματος. Επομένως, η τιμή 1.33 p/sec στρογγυλοποιείται στον πλησιέστερο ακέραιο αριθμό, δηλαδή 1 p/sec.

5^ο τεστ

Το 5^ο τεστ αφορά τον ορθό ορισμό των χρόνων εκκίνησης των ατόμων με βάση τις χρησιμοποιούμενες κατανομές. Η διάταξη αποτελείται από ένα δωμάτιο 8x5 m, με μια έξοδο πλάτους 1 m. Στην οδηγία αναφέρεται ότι θα πρέπει να δοθούν χρόνοι εκκίνησης με βάση ομοιόμορφη κατανομή μεταξύ των τιμών 10 και 100 sec σε ένα δείγμα 10 ατόμων.

Το επόμενο διάγραμμα παρουσιάζει την συχνότητα των χρόνων εκκίνησης για διαστήματα 10 sec, όπως αυτή κατανέμεται από το μοντέλο καθώς και όπως θα πρέπει να είναι με βάση την ομοιόμορφη κατανομή. Όπως θα παρατηρήσουμε, το μοντέλο κατανέμει ικανοποιητικά τους χρόνους εκκίνησης με βάση την κατανομή που του δίνεται, δεδομένου του μικρού μεγέθους του δείγματος. Για την κατανομή των χρόνων, το μοντέλο χρησιμοποιεί μέθοδο Monte Carlo, σημαντικό χαρακτηριστικό της οποίας είναι η ακριβέστερη επιλογή τιμών όσο αυξάνεται το μέγεθος του δείγματος (και άρα το πλήθος των τιμών που θα πρέπει να εξάγει).



Εικόνα 5.5.1.6: σύγκριση κατασκευαζόμενης και ομοιόμορφης κατανομής χρόνων εκκίνησης για το δείγμα του 5^{ου} τεστ

6^ο τεστ

Το 6^ο τεστ αφορά την ορθή αλληλεπίδραση του προσομοιούμενου ατόμου με τα όρια του υπό εξέταση χώρου. Ο χώρος εδώ αποτελείται από έναν διάδρομο πλάτους 2 μέτρων, στο μέσον του οποίου υπάρχει γωνία 90 μοιρών. Το δείγμα συνίσταται από 20 άτομα, τα οποία βρίσκονται στην μια άκρη του διαδρόμου, όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα. Τα άτομα αυτά θα πρέπει να διασχίσουν τον διάδρομο, παραμένοντας καθόλη τη διάρκεια της προσομοίωσης εντός των ορίων του.

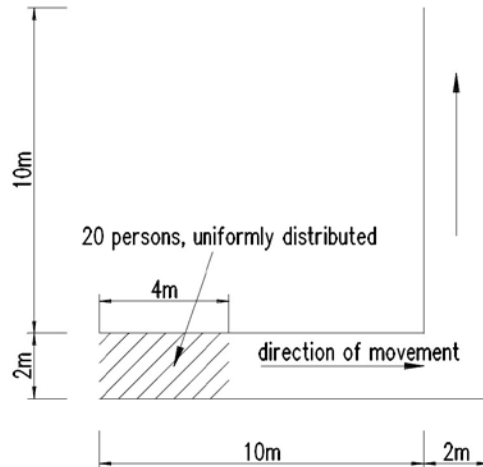


Figure 1: Transverse corridor

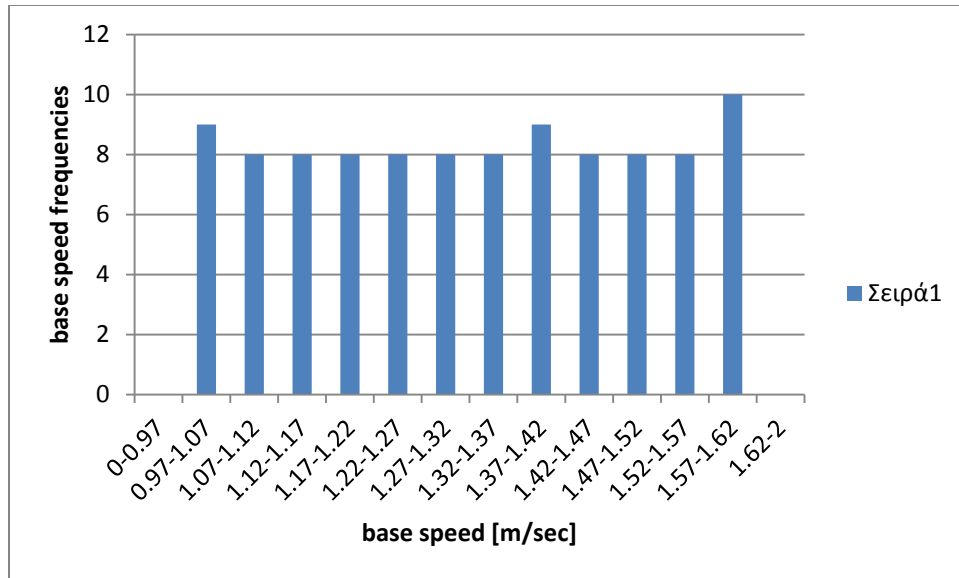
Εικόνα 5.5.1.10: ο χώρος στο 6^ο τεστ

Το συγκεκριμένο τεστ αφορά μοντέλα που περιγράφουν αναλυτικά τον χώρο, όπως τα fine network ή τα continuous network μοντέλα που είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Έτσι, δεν έχει νόημα να το τρέξουμε στο δικό μας μοντέλο από τη στιγμή που ο τρόπος περιγραφής του χώρου (με βάση τις αποστάσεις μεταξύ εξόδων), δεν επιτρέπει στα άτομα να «ξεφύγουν» από τα όριά του.

7^ο τεστ

Το 7^ο τεστ αφορά την ορθή κατανομή των ταχυτήτων στο κατασκευαζόμενο δείγμα ατόμων. Εδώ θα πρέπει να κατασκευάσουμε ένα δείγμα με 50 άνδρες ηλικίας 30 έως 50 ετών και να δείξουμε ότι οι ταχύτητες κίνησής τους είναι σύμφωνες με τις τιμές που μας δίνει η οδηγία MSC.1/Circ.1238.

Για να υπολογίσουμε τις ταχύτητες κίνησης, κατασκευάζουμε έναν χώρο που αποτελείται από ένα δωμάτιο εκκίνησης C1, έναν διάδρομο CORR μήκους 100 m και τον εξωτερικό χώρο COUT. Όλοι οι επιμέρους χώροι είναι μεγάλων διαστάσεων, ώστε να μην επηρεάζονται οι ταχύτητες κίνησης από το πλάτος των πορτών και την πυκνότητα επιβατών. Τα άτομα εκκινούν όλα την χρονική στιγμή 0. Μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, συγκεντρώνουμε τους χρόνους κίνησης των ατόμων μεταξύ της εισόδου στον διάδρομο και της προσέγγισης της εξόδου από αυτόν και τους διαιρούμε με το μήκος του διαδρόμου (100 m). Τα αποτελέσματα ήταν τα ακόλουθα:



Εικόνα 5.5.1.11: κατανομή ταχυτήτων στο 7^ο τεστ

Οι τιμές που δίνονται από την οδηγία MSC.1/Circ.1238 για κάθε κατηγορία επιβατών είναι οι ελάχιστες και οι μέγιστες μιας κανονικής κατανομής. Για την κατηγορία ανδρών μεταξύ 30 και 50 ετών, οι τιμές αυτές είναι 0.97 και 1.62 m/sec. Παρατηρούμε από το παραπάνω διάγραμμα ότι το μοντέλο κατασκευάζει μια σχεδόν ακριβή κανονική κατανομή μεταξύ των προαναφερόμενων τιμών. Οι μικρές διαφορές που παρατηρούνται οφείλονται στην ακρίβεια του αλγόριθμου κατασκευής ψευδοτυχαίων αριθμών που χρησιμοποιεί η γλώσσα προγραμματισμού Java.

5.5.2 Ποιοτική επιβεβαίωση (Qualitative verification)

Η ποιοτική επιβεβαίωση έχει σκοπό να αποδείξει ότι το μοντέλο περιγράφει ρεαλιστικά την ανθρώπινη συμπεριφορά σε καταστάσεις κινδύνου. Η οδηγία προτείνει τέσσερα σχετικά τεστ.

8ο τεστ

Στο 8^ο τεστ θα πρέπει να δείξουμε ότι η ταυτόχρονη ροή και προς τις δυο κατευθύνσεις (counter flow) επηρεάζει τον μέγιστο αριθμό ατόμων που περνάνε την πόρτα προς την κάθε

κατεύθυνση. Εδώ έχουμε δυο πανομοιότυπα δωμάτια 10x10 m, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με έναν διάδρομο μήκους 10 m και πλάτους 2 m (εικόνα)

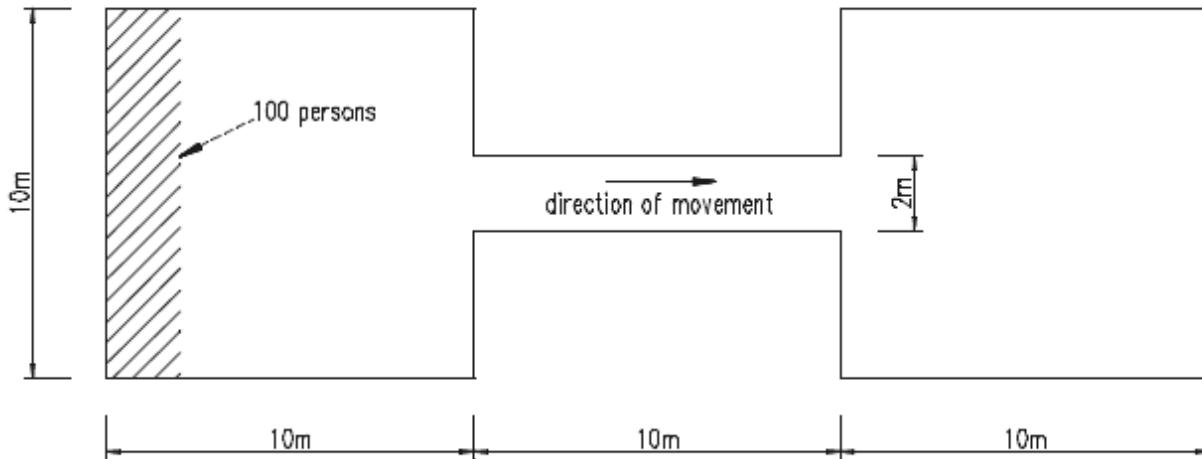


Figure 2: Two rooms connected via a corridor

Εικόνα 5.5.2.1: ο χώρος στο 8^ο τεστ

Αρχικά, γίνεται μια προσομοίωση όπου 100 άτομα εβρισκόμενα πλησίον του αριστερού τοίχου του δωματίου 1 μεταβαίνουν στο δωμάτιο 2 και καταγράφεται ο χρόνος κατά τον οποίο εισήλθε το τελευταίο άτομο στο δωμάτιο αυτό. Ακολούθως, γίνονται προσομοιώσεις όπου, εκτός των αρχικών ατόμων, τοποθετούνται 10, 50 και 100 άτομα στο δωμάτιο 2 και τα οποία κινούνται στην αντίθετη κατεύθυνση. Στις προσομοιώσεις αυτές ο καταγραφόμενος χώρος θα πρέπει να αυξάνεται (λόγω της αντίθετης ροής στον διάδρομο).

Από το αρχείο person_tracker εξάγουμε τα ακόλουθα αποτελέσματα σχετικά με τον χρόνο κατά τον οποίο περνά το τελευταίο άτομο στο δωμάτιο 2.

ΠΛΗΘΥΣΜΟΣ		ΧΡΟΝΟΣ [sec]
Δωμάτιο 1	Δωμάτιο 2	
100	0	65
100	10	70
100	50	132
100	100	205

Πίνακας 5.5.2.1: αποτελέσματα 8^{ου} τεστ

9^ο τεστ

Στο τεστ αυτό έχουμε ένα δωμάτιο διαστάσεων 20x30 m, το οποίο έχει 4 εξόδους πλάτους 1 m η κάθε μια. Στο δωμάτιο αυτό κατανέμεται ομοιόμορφα ένας πληθυσμός 1000 ανδρών ηλικίας 30-50 ετών. Αρχικά, γίνεται μια προσομοίωση και καταγράφεται ο χρόνος ολοκλήρωσης. Ακολούθως, γίνεται δεύτερη προσομοίωση με κλειστές τις πόρτες 1 και 2. Ο χρόνος που προκύπτει θα πρέπει να είναι σχεδόν διπλάσιος του αρχικού.

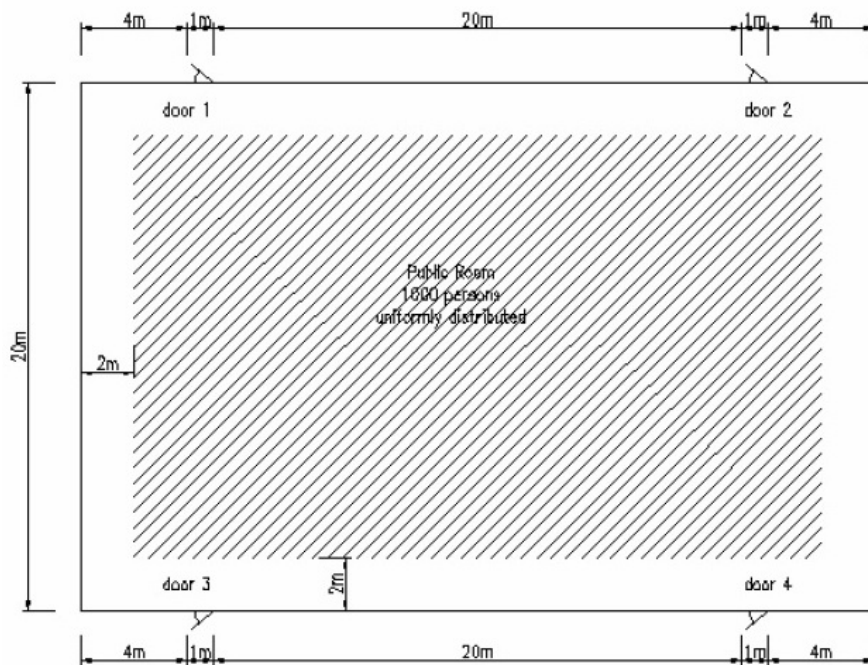
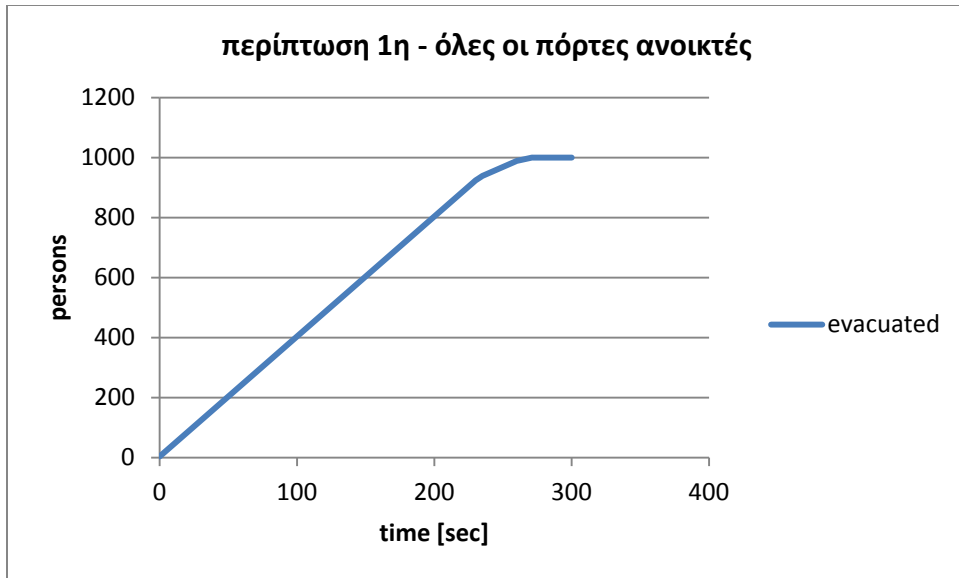


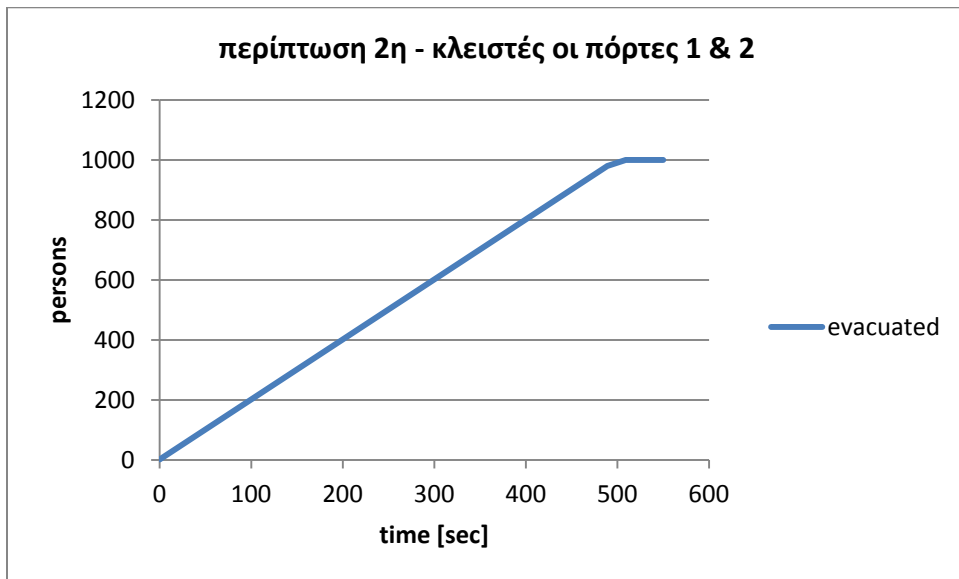
Figure 3: Exit flow from a large public room

Εικόνα 5.5.2.2: ο χώρος στο 9^ο τεστ

Όπως φαίνεται και στα παρακάτω διαγράμματα, ο χρόνος ολοκλήρωσης της διαδικασίας όταν και οι 4 πόρτες είναι ανοιχτές είναι 271 sec, ενώ με κλειστές τις πόρτες 1 και 2 είναι 509 sec. Επομένως, το τεστ είναι επιτυχές καθώς ο χρόνος στη 2^η περίπτωση είναι σχεδόν διπλάσιος.



Εικόνα 5.5.2.3: διάγραμμα διαφυγόντων ατόμων κατά το 1^ο τρέξιμο



Εικόνα 5.5.2.4: διάγραμμα διαφυγόντων ατόμων κατά το 2^ο τρέξιμο

10^ο τεστ

Εδώ έχουμε έναν χώρο με 12 καμπίνες και δυο εξόδους, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Το δείγμα των ατόμων αποτελείται από 23 άνδρες 30-50 ετών. Για να είναι επιτυχές το τεστ, οι επιβάτες στις καμπίνες 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9 και 10 θα πρέπει να εξέλθουν από την κύρια είσοδο, ενώ οι επιβάτες στις καμπίνες 5, 6, 11 και 12 από την δευτερεύουσα είσοδο.

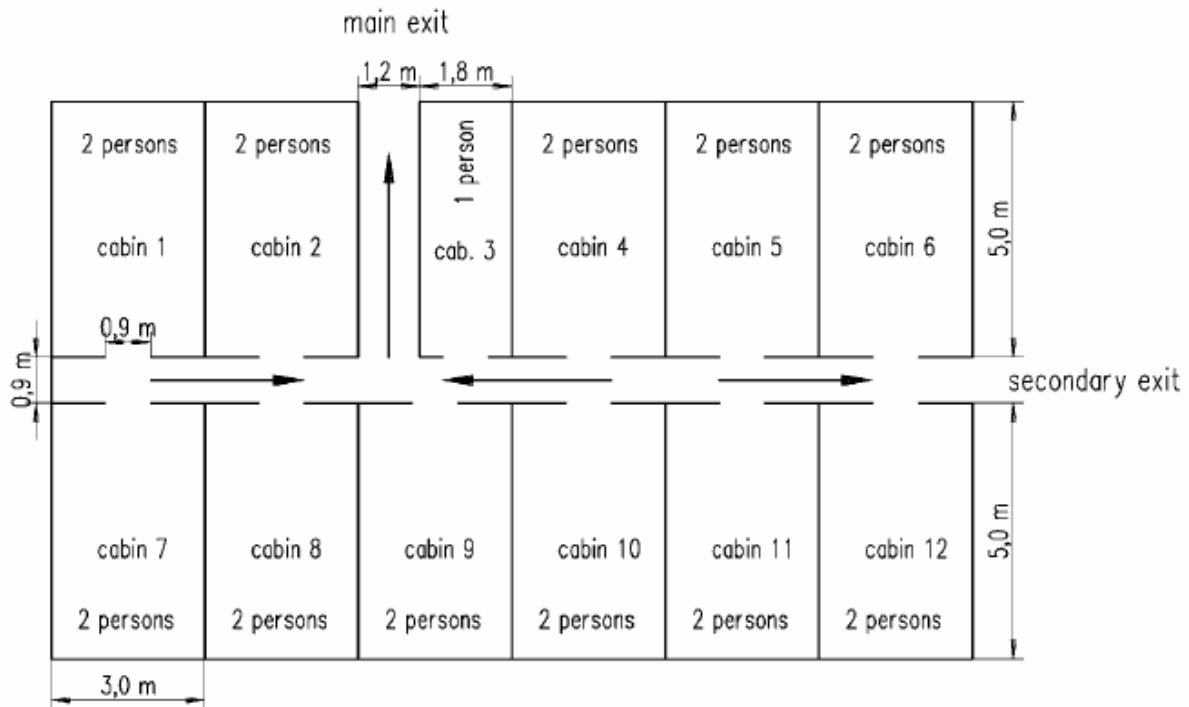
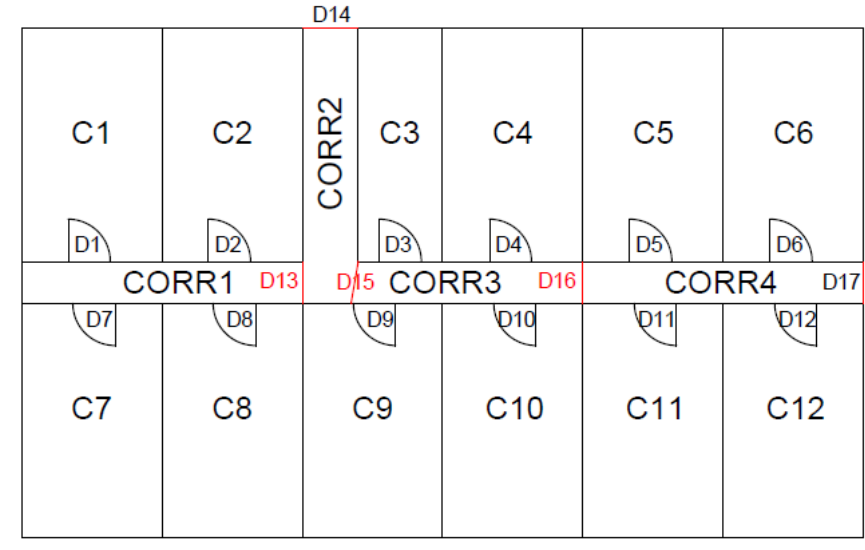


Figure 4: Cabin area

Εικόνα 5.5.2.5: ο χώρος στο 10^ο τεστ

Στην επόμενη εικόνα βλέπουμε τον χώρο όπως εισάγεται στο μοντέλο. Ακολουθως παραθέτουμε τις καταγραφές της κίνησης των επιβατών από το αρχείο `person_tracker`, όπου φαίνεται πως αυτοί εξέρχονται από τις σωστές εξόδους.



Εικόνα 5.5.2.6: ο χώρος του 10^{ου} τεστ όπως εισάγεται στο μοντέλο

```
Person 'Occ8' {BETWEEN_30_TO_50} {evacuation start time: 0} {passenger}
route:
  [[C3;0], [D3;3], [CORR3;3], [D15;5], [CORR2;5], [D14;12], [COUT;12],
  [evacuated;12]]
```

```
Person 'Occ19' {BETWEEN_30_TO_50} {evacuation start time: 0} {passenger}
route:
  [[C5;0], [D5;0], [CORR4;0], [D17;4], [COUT;4], [evacuated;4]]
```

```
Person 'Occ20' {BETWEEN_30_TO_50} {evacuation start time: 0} {passenger}
route:
  [[C11;0], [D11;3], [CORR4;3], [D17;5], [COUT;5], [evacuated;5]]
```

```
Person 'Occ17' {BETWEEN_30_TO_50} {evacuation start time: 0} {passenger}
route:
  [[C10;0], [D10;1], [CORR3;1], [D15;4], [CORR2;4], [D14;9], [COUT;9],
  [evacuated;9]]
```

```
Person 'Occ21' {BETWEEN_30_TO_50} {evacuation start time: 0} {passenger}
route:
  [[C1;0], [D1;3], [CORR1;3], [D13;8], [CORR2;8], [D14;14], [COUT;14],
  [evacuated;14]]
```

```
Person 'Occ5' {BETWEEN_30_TO_50} {evacuation start time: 0} {passenger}
route:
  [[C4;0], [D4;0], [CORR3;0], [D15;3], [CORR2;3], [D14;8], [COUT;8],
  [evacuated;8]]
```

```
Person 'Occ11' {BETWEEN_30_TO_50} {evacuation start time: 0} {passenger}
route:
  [[C6;0], [D6;1], [CORR4;1], [D17;3], [COUT;3], [evacuated;3]]
```

Person 'Occ12' {BETWEEN_30_TO_50} {evacuation start time: 0} {passenger}
route:
[[C9;0], [D9;4], [CORR3;4], [D15;5], [CORR2;5], [D14;11], [COUT;11],
[evacuated;11]]

Person 'Occ14' {BETWEEN_30_TO_50} {evacuation start time: 0} {passenger}
route:
[[C2;0], [D2;1], [CORR1;1], [D13;3], [CORR2;3], [D14;9], [COUT;9],
[evacuated;9]]

Person 'Occ18' {BETWEEN_30_TO_50} {evacuation start time: 0} {passenger}
route:
[[C8;0], [D8;1], [CORR1;1], [D13;3], [CORR2;3], [D14;10], [COUT;10],
[evacuated;10]]

Person 'Occ22' {BETWEEN_30_TO_50} {evacuation start time: 0} {passenger}
route:
[[C12;0], [D12;2], [CORR4;2], [D17;4], [COUT;4], [evacuated;4]]

Person 'Occ6' {BETWEEN_30_TO_50} {evacuation start time: 0} {passenger}
route:
[[C7;0], [D7;2], [CORR1;2], [D13;6], [CORR2;6], [D14;11], [COUT;11],
[evacuated;11]]

Person 'Occ1' {BETWEEN_30_TO_50} {evacuation start time: 0} {passenger}
route:
[[C5;0], [D5;2], [CORR4;2], [D17;7], [COUT;7], [evacuated;7]]

Person 'Occ4' {BETWEEN_30_TO_50} {evacuation start time: 0} {passenger}
route:
[[C11;0], [D11;5], [CORR4;5], [D17;7], [COUT;7], [evacuated;7]]

Person 'Occ9' {BETWEEN_30_TO_50} {evacuation start time: 0} {passenger}
route:
[[C10;0], [D10;0], [CORR3;0], [D15;4], [CORR2;4], [D14;11], [D14;12],
[COUT;12], [evacuated;12]]

Person 'Occ2' {BETWEEN_30_TO_50} {evacuation start time: 0} {passenger}
route:
[[C1;0], [D1;3], [CORR1;3], [D13;7], [CORR2;7], [D14;12], [D14;13],
[COUT;13], [evacuated;13]]

Person 'Occ13' {BETWEEN_30_TO_50} {evacuation start time: 0} {passenger}
route:
[[C4;0], [D4;3], [CORR3;3], [D15;6], [CORR2;6], [D14;11], [D14;12],
[D14;13], [COUT;13], [evacuated;13]]

Person 'Occ16' {BETWEEN_30_TO_50} {evacuation start time: 0} {passenger}
route:
[[C6;0], [D6;5], [CORR4;5], [D17;7], [D17;8], [COUT;8], [evacuated;8]]

Person 'Occ3' {BETWEEN_30_TO_50} {evacuation start time: 0} {passenger}
route:
[[C9;0], [D9;2], [CORR3;2], [D15;3], [CORR2;3], [D14;10], [COUT;10],
[evacuated;10]]

```

Person 'Occ7' {BETWEEN_30_TO_50} {evacuation start time: 0} {passenger}
route:
  [[C2;0], [D2;2], [CORR1;2], [D13;4], [CORR2;4], [D14;9], [D14;10],
  [D14;11], [D14;12], [D14;13], [D14;14], [COUT;14], [evacuated;14]]

Person 'Occ15' {BETWEEN_30_TO_50} {evacuation start time: 0} {passenger}
route:
  [[C8;0], [D8;0], [CORR1;0], [D13;2], [CORR2;2], [D14;9], [D14;10],
  [D14;11], [D14;12], [D14;13], [D14;14], [D14;15], [COUT;15], [evacuated;15]]

Person 'Occ0' {BETWEEN_30_TO_50} {evacuation start time: 0} {passenger}
route:
  [[C12;0], [D12;0], [CORR4;0], [D17;2], [COUT;2], [evacuated;2]]

Person 'Occ10' {BETWEEN_30_TO_50} {evacuation start time: 0} {passenger}
route:
  [[C7;0], [D7;1], [CORR1;1], [D13;5], [CORR2;5], [D14;11], [D14;12],
  [D14;13], [D14;14], [D14;15], [COUT;15], [evacuated;15]]

```

11^ο τεστ

Ο χώρος εδώ αποτελείται από ένα δωμάτιο 8x5 m, από το οποίο ξεκινά ένας διάδρομος μήκους 12 m και πλάτους 2 m και ο οποίος καταλήγει σε μια σκάλα. Το δείγμα επιβατών συνίσταται από 150 άνδρες ηλικίας 30-50 ετών, οι οποίοι είναι ομοιόμορφα κατανομημένοι μέσα στο δωμάτιο. Τα άτομα εκκινούν τη χρονική στιγμή 0 με κατεύθυνση την σκάλα. Το αποτέλεσμα του τεστ θα πρέπει να είναι μια σταθερή ροή στον διάδρομο και δυο σημεία συμφόρησης: το πρώτο στην είσοδο του δωματίου και το δεύτερο στην βάση της σκάλας.

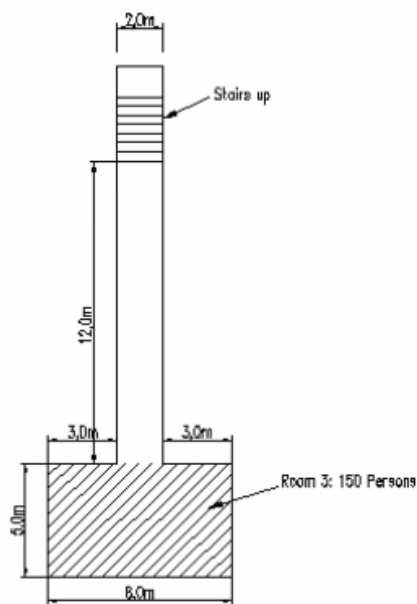


Figure 5: Escape route via stairs

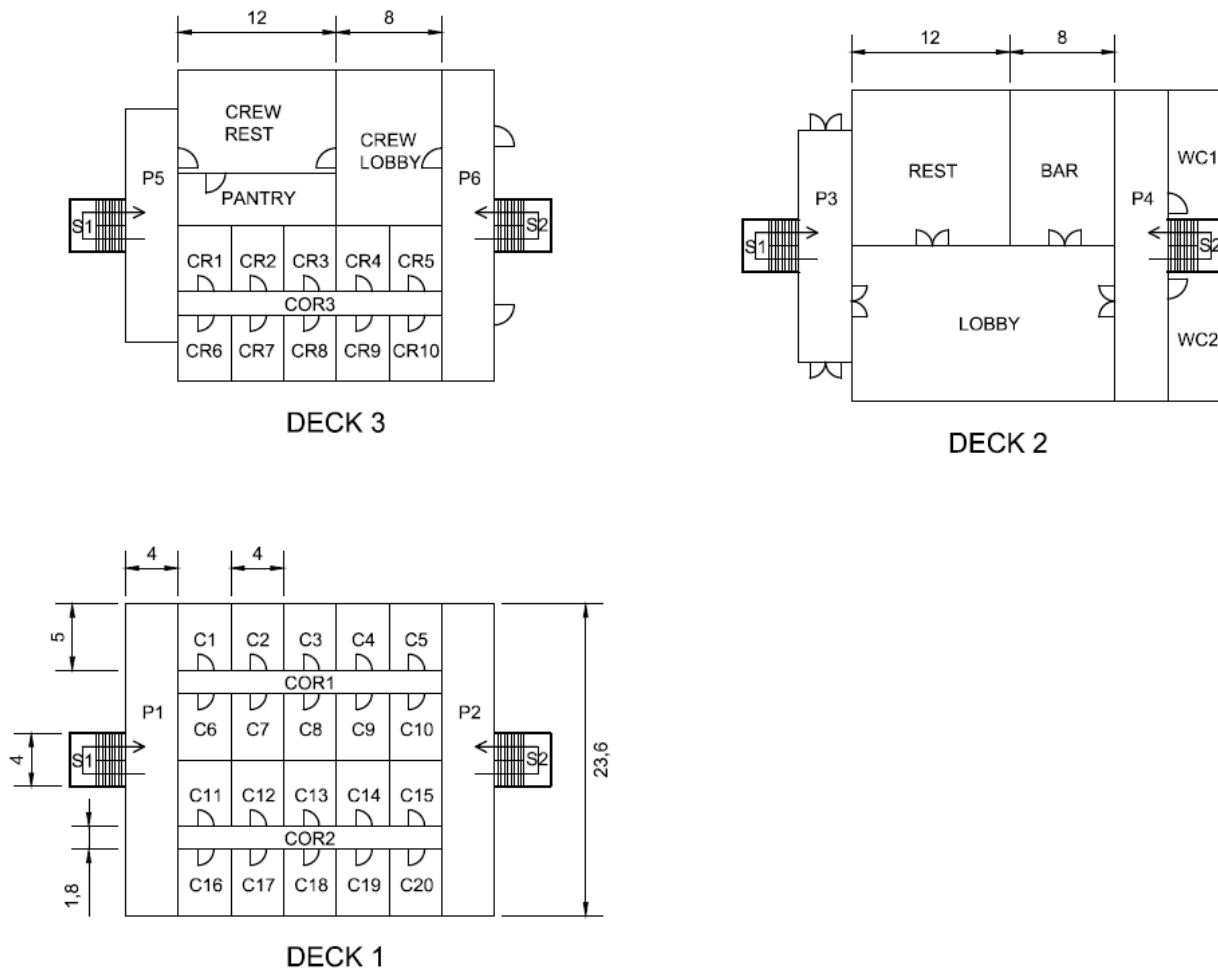
Εικόνα 5.5.2.7: ο χώρος του 11^{ου} τεστ

Από την ανάλυση του αρχείου `person_tracker` προκύπτει ότι παρατηρούνται μεγάλες ουρές (και άρα συμφόρηση) στα δυο προαναφερόμενα σημεία και ιδιαίτερα στην είσοδο του διαδρόμου. Πιο συγκεκριμένα, ο μέγιστος χρόνος αναμονής στην είσοδο του διαδρόμου ήταν 46 δευτερόλεπτα, ενώ στην βάση της σκάλας 14 δευτερόλεπτα.

5.6 Σενάρια επίδειξης

5.6.1 Περιγραφή σεναρίων

Στις επόμενες σελίδες θα δούμε μια σειρά σεναρίων που έχουμε φτιάξει, προκειμένου να δείξουμε τις δυνατότητες του μοντέλου. Στα σενάκια αυτά έχουμε κατασκευάσει έναν χώρο που αποτελείται από τρία καταστρώματα (εικόνα 5.5.6.1).



Εικόνα 5.6.1: ο χώρος των σεναρίων

Στο Deck 1 βρίσκονται καμπίνες επιβατών (C1-C20), δυο διάδρομοι (COR1, COR2) οι οποίοι ενώνουν τις καμπίνες με τους χώρους P1 και P2.

Στο Deck 2 βρίσκονται ένα σαλόνι επιβατών (LOBBY), το εστιατόριο (REST), ένα μπαρ (BAR), δυο τουαλέτες επιβατών (WC1, WC2) και οι κοινόχρηστοι χώροι P3 και P4.

Στο Deck 3 βρίσκονται καμπίνες πληρώματος (CR1-CR10), το εστιατόριο (CREW_REST) και το σαλόνι του πληρώματος (CREW_LOBBY), η κουζίνα (PANTRY) και οι δυο κοινόχρηστοι χώροι P5 και P6.

Ο χώρος συγκέντρωσης του πλοίου τοποθετείται στον εξωτερικό χώρο, η πρόσβαση στον οποίο γίνεται από δυο εξόδους στο Deck 2 και δυο εξόδους στο Deck 3.

Στους επόμενους δυο πίνακες παρουσιάζονται τα στοιχεία των χώρων και των πορτών που τους συνδέουν:

Κατάλογος διαμερισμάτων (compartments)					
ID	Κατάστρωμα	Τύπος	Διαγώνιος	Εμβαδόν	Μέγιστος αριθμός επιβ.
			[m]	[m ²]	
C1	1	CABIN	6.4	20	4
C2	1	CABIN	6.4	20	4
C3	1	CABIN	6.4	20	4
C4	1	CABIN	6.4	20	4
C5	1	CABIN	6.4	20	4
C6	1	CABIN	6.4	20	4
C7	1	CABIN	6.4	20	4
C8	1	CABIN	6.4	20	4
C9	1	CABIN	6.4	20	4
C10	1	CABIN	6.4	20	4
C11	1	CABIN	6.4	20	4
C12	1	CABIN	6.4	20	4
C13	1	CABIN	6.4	20	4
C14	1	CABIN	6.4	20	4
C15	1	CABIN	6.4	20	4
C16	1	CABIN	6.4	20	4
C17	1	CABIN	6.4	20	4
C18	1	CABIN	6.4	20	4
C19	1	CABIN	6.4	20	4
C20	1	CABIN	6.4	20	4
COR1	1	CORRIDOR	20	36	36
COR2	1	CORRIDOR	20	36	36
P1	1	PUBLIC	23.94	94.4	94
P2	1	PUBLIC	23.94	94.4	94
S1	1	STAIRS	16	32	32
S2	1	STAIRS	16	32	32

P3	2	PUBLIC	18.05	70.4	70
P4	2	PUBLIC	23.94	94.4	70
REST	2	PUBLIC	16.83	141.6	141
BAR	2	PUBLIC	14.26	94.4	94
LOBBY	2	PUBLIC	23.22	236	236
P5	3	CREW_ACCOM	18.05	70.4	0
P6	3	CREW_ACCOM	23.94	94.4	0
COR3	3	CORRIDOR	20	36	0
CR1	3	CREW_ACCOM	6.4	20	4
CR2	3	CREW_ACCOM	6.4	20	4
CR3	3	CREW_ACCOM	6.4	20	4
CR4	3	CREW_ACCOM	6.4	20	4
CR5	3	CREW_ACCOM	6.4	20	4
CR6	3	CREW_ACCOM	6.4	20	4
CR7	3	CREW_ACCOM	6.4	20	4
CR8	3	CREW_ACCOM	6.4	20	4
CR9	3	CREW_ACCOM	6.4	20	4
CR10	3	CREW_ACCOM	6.4	20	4
CREW_REST	3	CREW_ACCOM	14.31	93.6	93
CREW_LOBBY	3	CREW_ACCOM	14.26	94.4	94
PANTRY	3	SERVICE	12.65	48	48

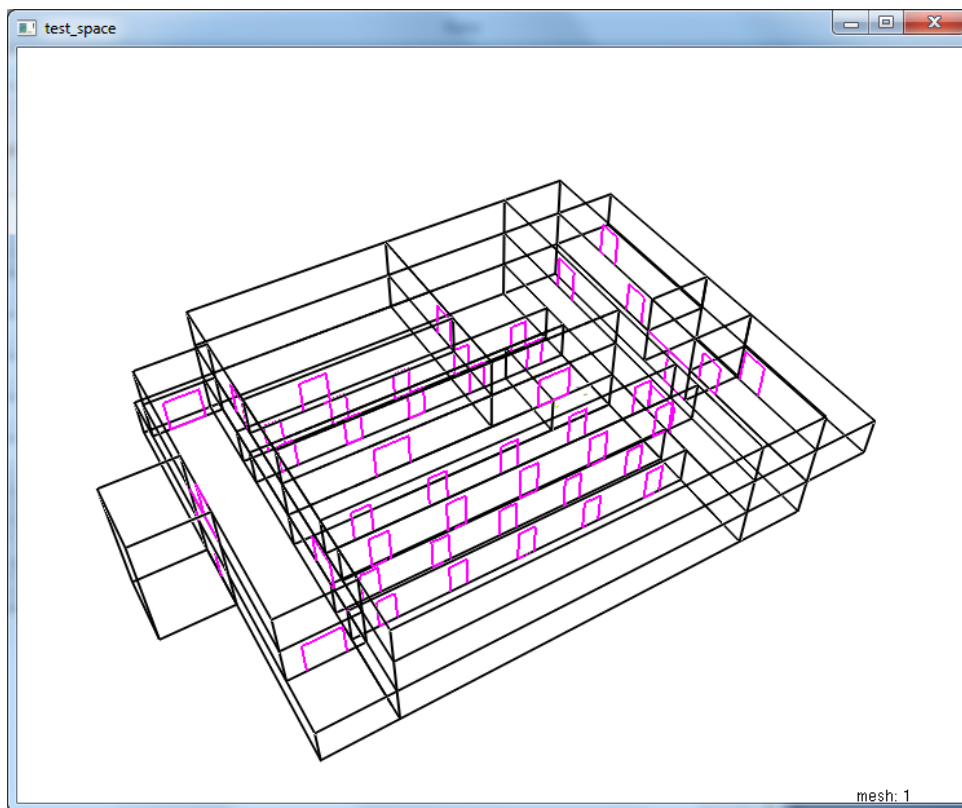
Κατάλογος πορτών			
ID	Διαμέρισμα 1	Διαμέρισμα 2	Πλάτος
			[m]
D1	C1	COR1	1
D2	C2	COR1	1
D3	C3	COR1	1
D4	C4	COR1	1
D5	C5	COR1	1
D6	C6	COR1	1
D7	C7	COR1	1
D8	C8	COR1	1
D9	C9	COR1	1
D10	C10	COR1	1
D11	C11	COR2	1
D12	C12	COR2	1
D13	C13	COR2	1
D14	C14	COR2	1

D15	C15	COR2	1
D16	C16	COR2	1
D17	C17	COR2	1
D18	C18	COR2	1
D19	C19	COR2	1
D20	C20	COR2	1
D21	COR1	P1	1.8
D22	COR1	P2	1.8
D23	COR2	P1	1.8
D24	COR2	P2	1.8
D25	P1	S1	2
D26	P2	S2	2
D27	S1	P3	4
D28	S2	P4	4
D29	P3	OUTSIDE	2
D30	P3	OUTSIDE	2
D31	P3	LOBBY	2
D32	LOBBY	REST	2
D33	LOBBY	BAR	2
D34	LOBBY	P4	2
D35	P4	WC1	1.5
D36	P4	WC2	1.5
D37	S1	P5	2
D38	S2	P6	2
D39	P5	COR3	1.8
D40	P5	CREW_REST	1.5
D41	CR1	COR3	1
D42	CR2	COR3	1
D43	CR3	COR3	1
D44	CR4	COR3	1
D45	CR5	COR3	1
D46	CR6	COR3	1
D47	CR7	COR3	1
D48	CR8	COR3	1
D49	CR9	COR3	1
D50	CR10	COR3	1
D51	COR3	P6	1.8
D52	P6	OUTSIDE	1.5
D53	P6	OUTSIDE	1.5
D54	CREW_REST	PANTRY	1.5
D55	CREW_REST	CREW_LOBBY	1.5
D56	CREW_LOBBY	P6	1.5

Τον χώρο αυτό τον έχουμε περάσει στο πρόγραμμα CFAST, όπου και κατασκευάσαμε την πυρκαγιά. Στα διάφορα διαμερίσματα τοποθετήθηκαν sprinklers με θερμοκρασία ενεργοποίησης τους 75 °C. Όπως είπαμε στην παράγραφο 5.2, το CFAST μας περιορίζει στα 30 διαμερίσματα (compartments), ο χώρος μας όμως αποτελείται από 47 διαμερίσματα. Προκειμένου λοιπόν να ξεπεράσουμε τον περιορισμό αυτό, προχωρήσαμε σε κάποιες απλοποιήσεις:

- Οι καμπίνες C1-C5, C6-C8, C11-C14, C16-C20, CR1-CR5 και CR6-CR10 περάστηκαν ως ενιαίοι χώροι.
- Η καμπίνα C10 όπου βρίσκεται η εστία της πυρκαγιάς καθώς και οι γειτνιάζουσες σε αυτή C9 και C15 περάστηκαν αυτούσιες.

Λόγω της φύσης του μοντέλου CFAST, οι απλοποιήσεις αυτές δεν επηρεάζουν την διασπορά καπνού και τοξικών αερίων που κυρίως μας ενδιαφέρει. Όσον αφορά τις θερμοκρασίες, σε test runs που κάναμε με λιγότερα διαμερίσματα είδαμε ότι οι διαφορές στις καταγεγραμμένες τιμές είναι πολύ μικρές και δεν επηρεάζουν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, καθώς η παρουσία των sprinklers κρατά ούτως ή άλλως την θερμοκρασία σε επίπεδα αρκετά χαμηλότερα των ορίων που ορίζει ο Purser (παράγραφος 5.3). Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται ο χώρος όπως φαίνεται στο CFAST:



Εικόνα 5.6.2: ο χώρος των σεναρίων όπως φαίνεται στο CFAST

Όπως είπαμε προηγουμένως, η πυρκαγιά εντοπίζεται στην καμπίνα C10. Η καμπίνα αυτή περιέχει δυο διπλά κρεβάτια (bunkbeds), μια ντουλάπα (wardrobe), μια τηλεόραση (tv set) και δυο καρέκλες (upholstered chairs). Για χάριν της προσομοίωσης, τα παραπάνω αντικείμενα αναφλέγονται ταυτόχρονα τη χρονική στιγμή 0.

Η πόρτα της καμπίνας C10 καθώς και οι πόρτες των κοινόχρηστων χώρων είναι ανοικτές καθόλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Οι πόρτες των υπόλοιπων καμπινών ανοίγουν με καθυστέρηση που ορίζεται από τα χαρακτηριστικά του σεναρίου και τις αντίστοιχες κατανομές του χρόνου απόκρισης των επιβατών που είδαμε στην παράγραφο 5.4.4. Έτσι, οι πόρτες των καμπινών ανοίγουν σε 1 sec για την περίπτωση ημέρας και 400 sec για την περίπτωση νύχτας.

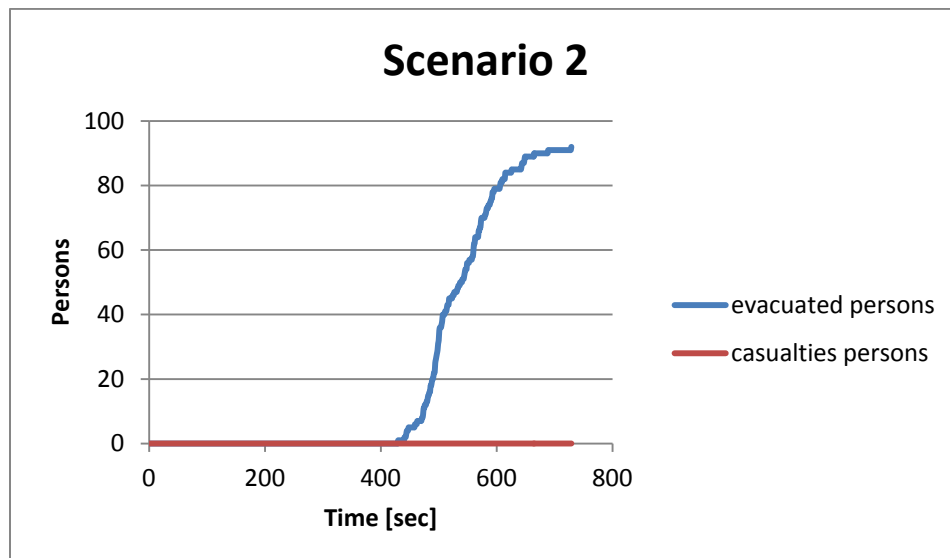
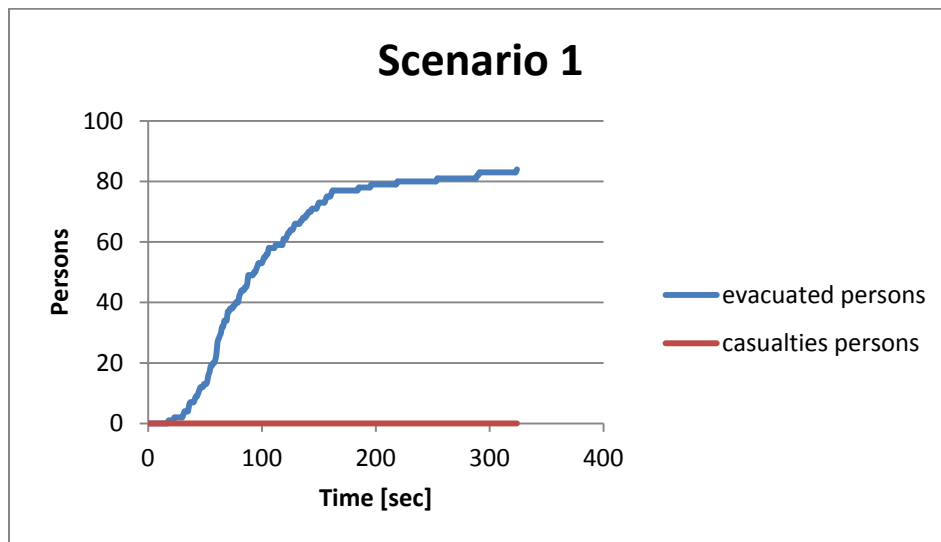
Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά των σεναρίων που κατασκευάστηκαν, αυτά συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα

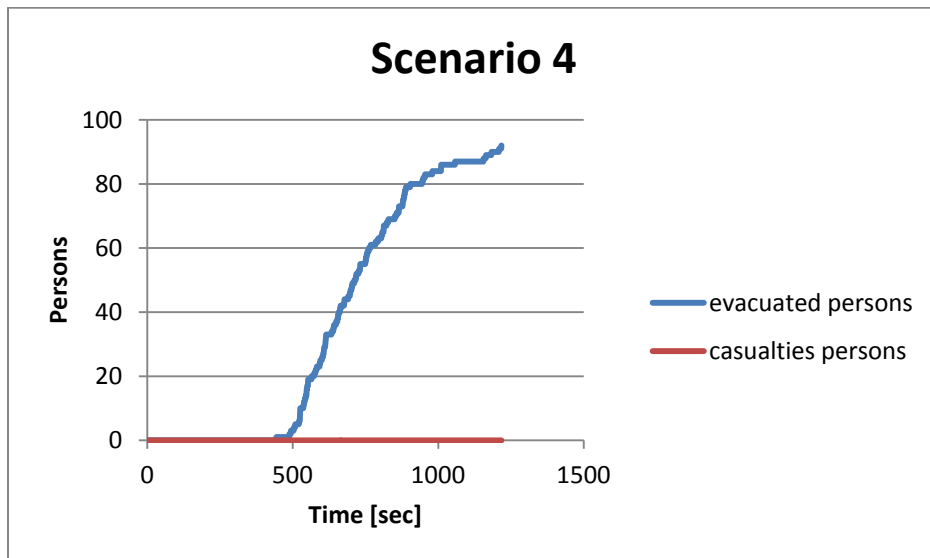
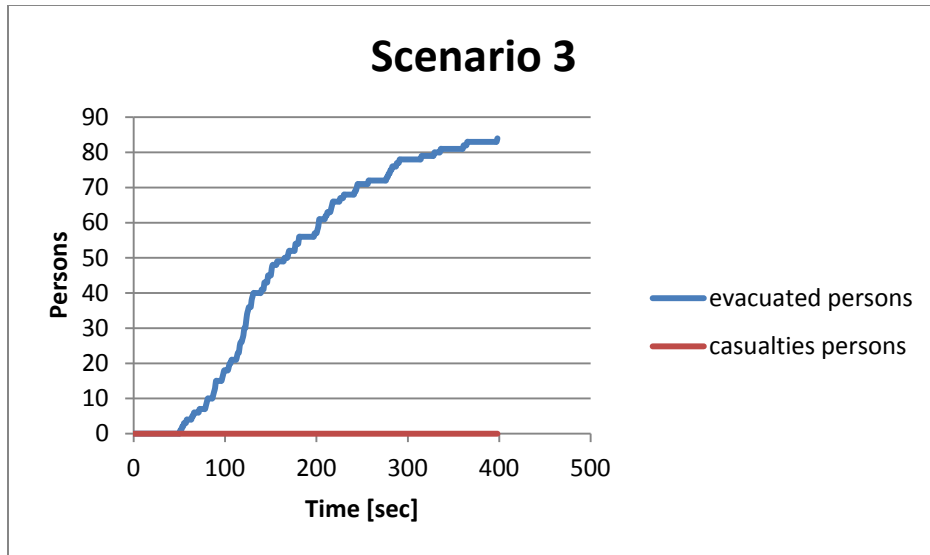
Κατάλογος σεναρίων								
Σενάριο	Πυρκ.	Τύπος πλοίου	Ωρα της ημέρας	Επιβάτες	Πλήρωμα	Κατανομή ατόμων	Πανικός [%]	Άλλα στοιχεία
1	ΟΧΙ	RO_PAX	ΗΜΕΡΑ	72	12	κανονική	0	-
2	ΟΧΙ	RO_PAX	ΝΥΧΤΑ	72	20	κανονική	0	-
3	ΟΧΙ	CRUISE	ΗΜΕΡΑ	72	12	κανονική	0	-
4	ΟΧΙ	CRUISE	ΝΥΧΤΑ	72	20	κανονική	0	-
5	ΝΑΙ	RO_PAX	ΗΜΕΡΑ	72	12	κανονική	0	-
6	ΝΑΙ	RO_PAX	ΝΥΧΤΑ	72	20	κανονική	0	-
7	ΝΑΙ	CRUISE	ΗΜΕΡΑ	72	12	κανονική	0	-
8	ΝΑΙ	CRUISE	ΝΥΧΤΑ	72	20	κανονική	0	-
9	ΝΑΙ	RO_PAX	ΝΥΧΤΑ	72	20	κανονική	5	-
10	ΝΑΙ	RO_PAX	ΝΥΧΤΑ	72	20	κανονική	10	-
11	ΝΑΙ	CRUISE	ΝΥΧΤΑ	72	20	κανονική	5	-
12	ΝΑΙ	CRUISE	ΝΥΧΤΑ	72	20	κανονική	10	-
13	ΝΑΙ	RO_PAX	ΗΜΕΡΑ	72	12	>50	0	-
14	ΝΑΙ	RO_PAX	ΝΥΧΤΑ	72	20	>50	0	-
15	ΝΑΙ	CRUISE	ΗΜΕΡΑ	72	12	>50	0	-
16	ΝΑΙ	CRUISE	ΝΥΧΤΑ	72	20	>50	0	-
17	ΝΑΙ	RO_PAX	ΗΜΕΡΑ	72	12	κανονική	0	S1 μπλοκ.
18	ΝΑΙ	RO_PAX	ΝΥΧΤΑ	72	20	κανονική	0	S1 μπλοκ.
19	ΝΑΙ	CRUISE	ΗΜΕΡΑ	72	12	κανονική	0	S1 μπλοκ.
20	ΝΑΙ	CRUISE	ΝΥΧΤΑ	72	20	κανονική	0	S1 μπλοκ.
21	ΝΑΙ	CRUISE	ΗΜΕΡΑ	72	12	κανονική	0	Sprinkler εκτός λειτουργίας
22	ΝΑΙ	RO-PAX	ΝΥΧΤΑ	72	20	κανονική	0	Heel 10 μοιρών
23	ΝΑΙ	RO-PAX	ΝΥΧΤΑ	72	20	Κανονική	0	Roll 10 sec

5.6.2 Αποτελέσματα - σχολιασμός

Σενάρια 1-4

Τα σενάρια 1 έως 4 είναι σενάρια χωρίς πυρκαγιά που θα χρησιμεύσουν στη σύγκριση με τα υπόλοιπα σενάρια. Τα πρώτα δυο σενάρια είναι για πλοίο RO_PAX (ημέρα και νύχτα) ενώ τα άλλα δυο για κρουαζιερόπλοιο. Παρακάτω φαίνονται οι καμπύλες διαφυγής-χρόνου και απωλειών-χρόνου που εξάγονται από το μοντέλο, οι οποίες και θα χρησιμεύσουν για την σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των υπόλοιπων σεναρίων.



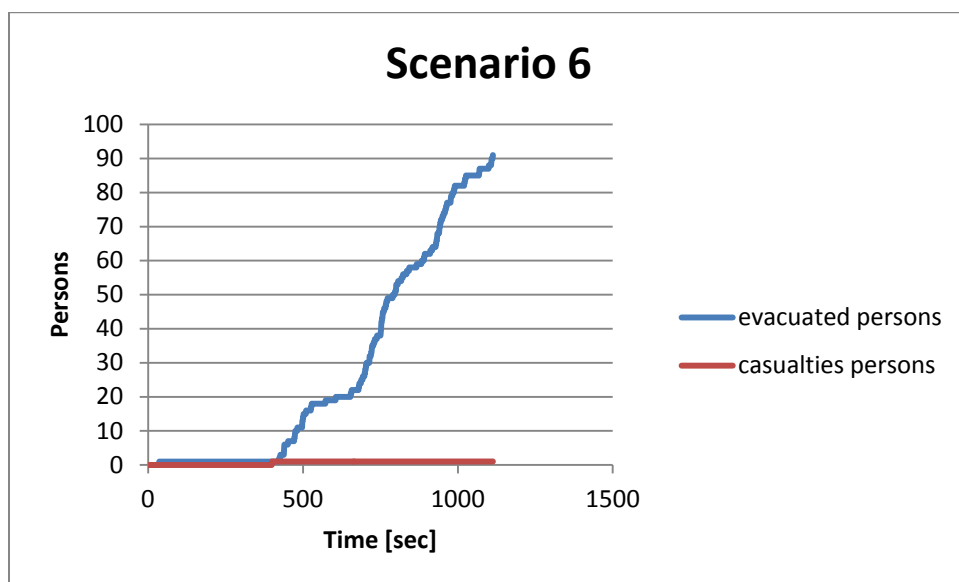
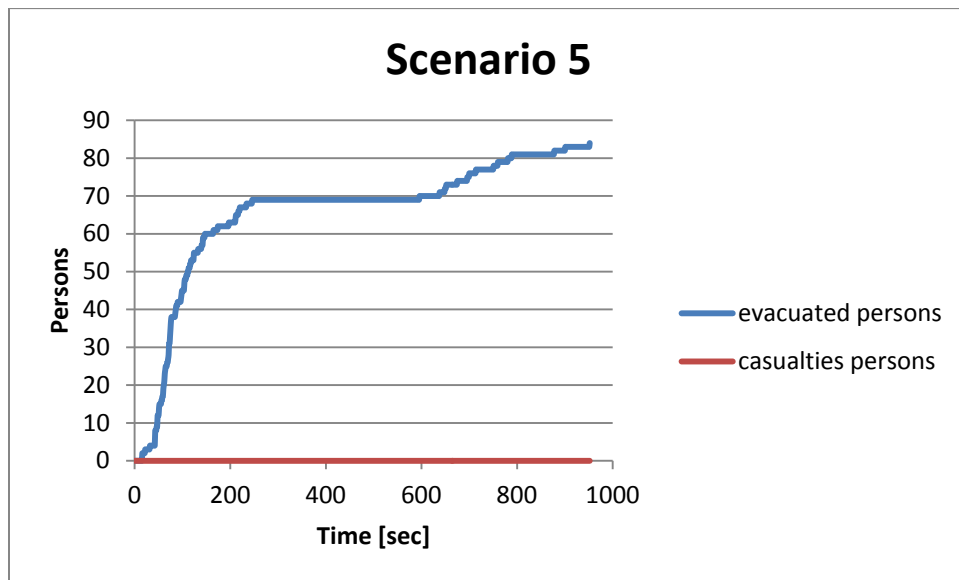


Βλέπουμε αρχικά ότι στα δυο σενάρια ημέρας (1 και 3), οι πρώτες καταγραφές για διαφυγόντες επιβάτες ξεκινούν στα 18 και 42 δευτερόλεπτα αντίστοιχα, ενώ στα σενάρια νύχτας (2 και 4) ξεκινούν στα 430 και 444 δευτερόλεπτα αντίστοιχα. Οι διαφορές αυτές οφείλονται στις διαφορετικές κατανομές των χρόνων απόκρισης (στα σενάρια ημέρας οι επιβάτες αρχίζουν να κινούνται από τη στιγμή 0, ενώ στα σενάρια νύχτας από τη στιγμή 400). Επίσης, όπως είδαμε στο σχέδιο του υπό ανάλυση χώρου, οι κύριες έξοδοι βρίσκονται στο κατάστρωμα 2, όπου βρίσκεται και η πλειοψηφία των κοινόχρηστων χώρων. Έτσι, στα σενάρια νύχτας (οπότε και οι επιβάτες βρίσκονται στις καμπίνες) η απόσταση που θα πρέπει να

διανυθεί έως τις εξόδους είναι κατά κανόνα αρκετά μεγαλύτερη απ'ότι στα σενάρια ημέρας. Όσον αφορά τους χρόνους ολοκλήρωσης της διαδικασίας, αυτοί ήταν 324, 729, 398 και 1217 δευτερόλεπτα.

Σενάρια 5-6

Στα σενάρια αυτά (ημέρας και νύκτας αντίστοιχα) έχουμε πλοίο RO-PAX και πυρκαγιά στην καμπίνα C10.

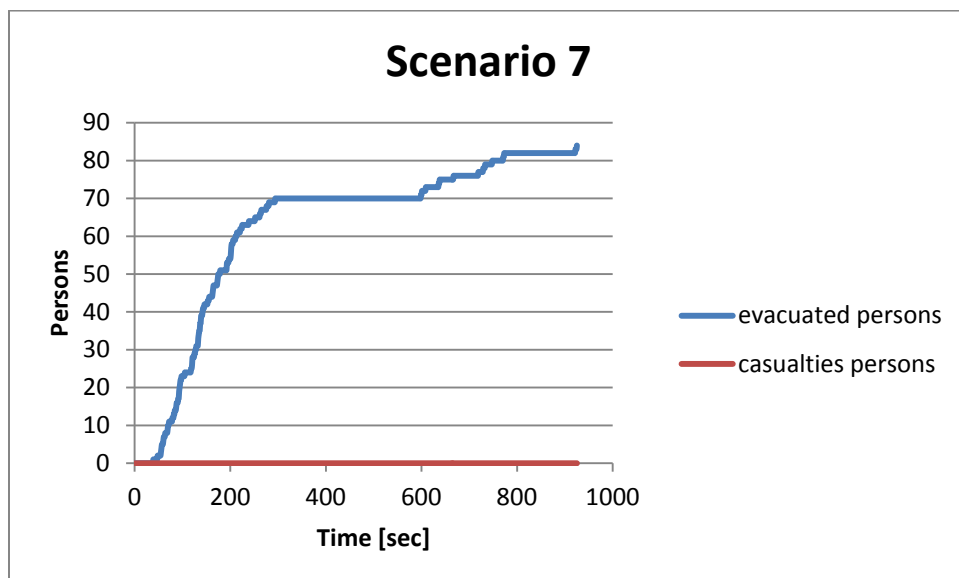


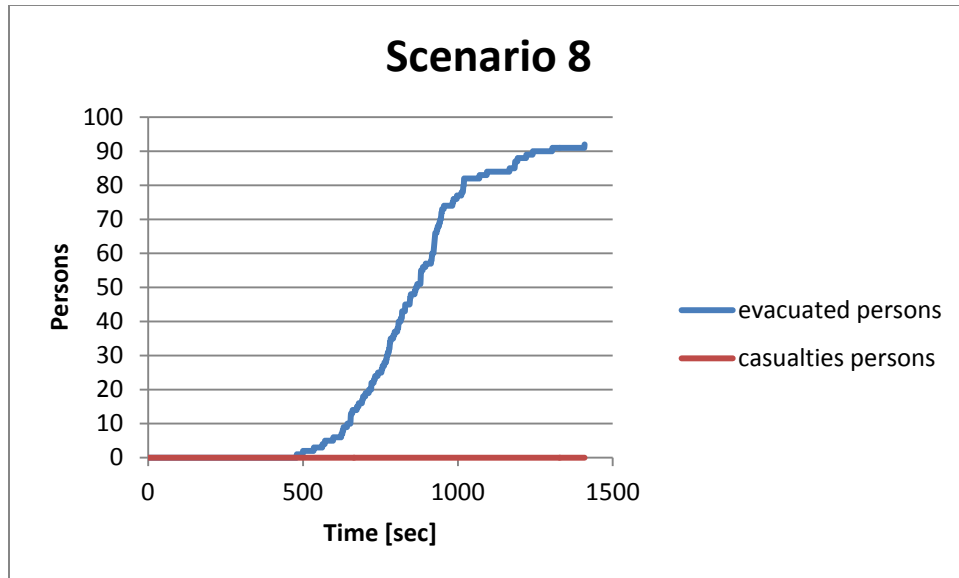
Συγκρίνοντας τα δυο αυτά σενάρια με τα σενάρια 1 και 2, παρατηρούμε ότι υπάρχει μια σαφής καθυστέρηση ολοκλήρωσης της διαδικασίας λόγω της πυρκαγιάς. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση ημέρας (σενάριο 5) ο χρόνος ολοκλήρωσης ήταν 952 sec ήτοι 294% μεγαλύτερος από τον χρόνο χωρίς πυρκαγιά (σενάριο 1). Αντίστοιχα είναι και τα αποτελέσματα για την περίπτωση νύχτας (σενάριο 6), με χρόνο ολοκλήρωσης ίσο με 1113 sec (153% μεγαλύτερος από το σενάριο 2). Στο σενάριο 6 είχαμε επίσης μια απώλεια, καθώς ένας επιβάτης που εκκίνησε από την καμπίνα C10, όπου βρίσκεται και η εστία της πυρκαγιάς, χάνει τις αισθήσεις του σε 400 sec από την έναρξη της πυρκαγιάς.

Παρατηρώντας καλύτερα την καμπύλη του σεναρίου 5, θα δούμε ότι για ένα διάστημα περίπου 4 λεπτών δεν διαφεύγει κανένας επιβάτης. Ελέγχοντας το παραγόμενο δεδομένα από το πρόγραμμα παρατηρούμε ότι τα εναπομείναντα 13 άτομα βρίσκονται καθόλο αυτό το διάστημα στους χώρους P1, P2, WC1, WC2 και P4. Αντιπαραβάλλοντας τα δεδομένα αυτά με τα στοιχεία της πυρκαγιάς που έχουν παραχθεί από το CFAST βλέπουμε ότι η οπτική πυκνότητα του καπνού σε όλους τους γειτνιάζοντες με τα παραπάνω διαμερίσματα χώρους είναι μεγαλύτερη από 1 1/m καθόλο αυτό το διάστημα. Έτσι, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι τα άτομα αυτά έχουν εγκλωβιστεί εκεί καθώς δεν έχουν επιλογή εξόδου λόγω επιπέδων καπνού. Μετά την πτώση των επιπέδων αυτών, επιλέγουν έξοδο και αρχίζουν να κινούνται προς αυτήν. Έτσι εξηγείται και η μικρότερη διαφορά του ζεύγους σεναρίων 2 και 6 έναντι του ζεύγους 1 και 5.

Σενάρια 7-8

Τα σενάρια αυτά είναι ίδια με τα σενάρια 5 και 6, αλλά αφορούν την περίπτωση κρουαζιεροπολοίου.

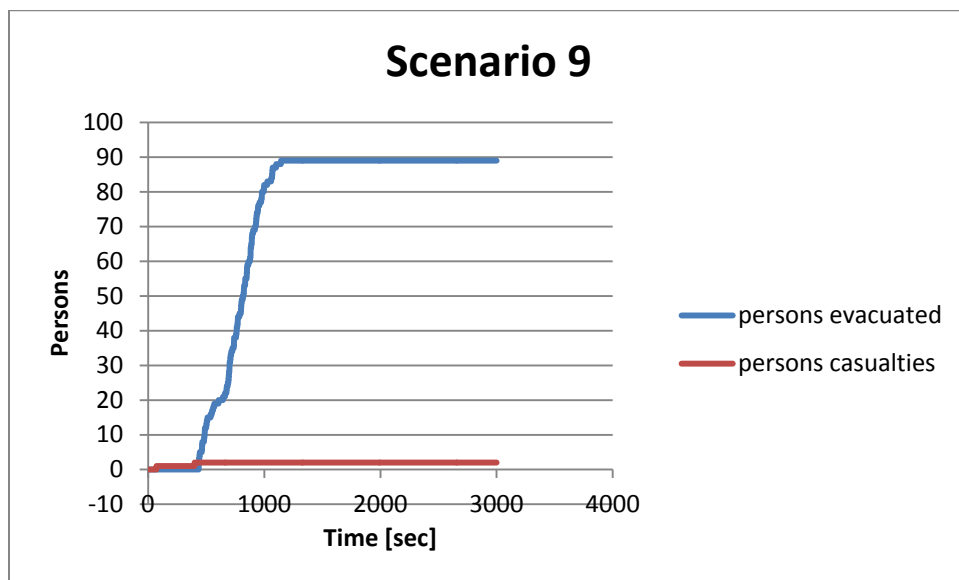


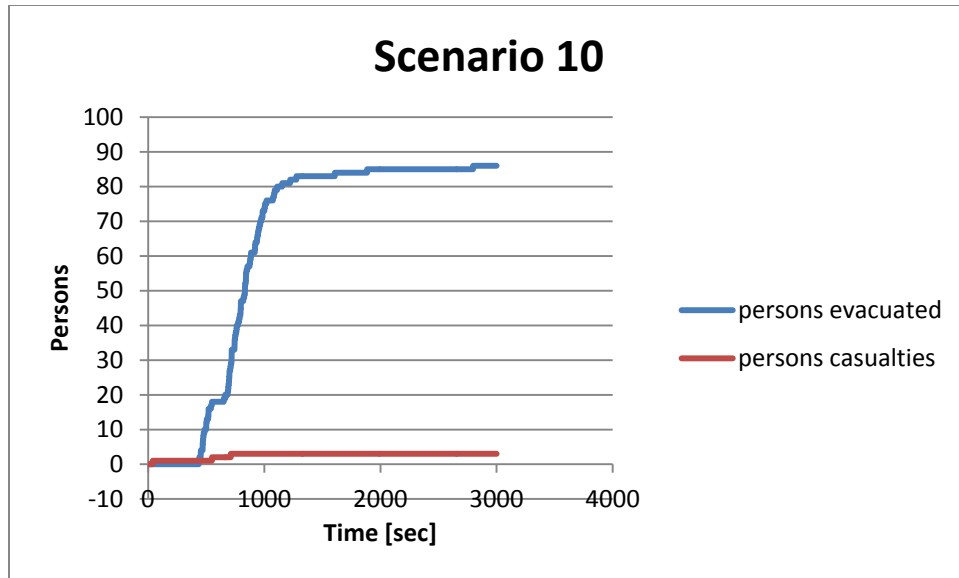


Παρόμοια εικόνα με τα σενάρια 5 και 6 έχουμε και εδώ. Οι χρόνοι ολοκλήρωσης της διαδικασίας ήταν 925 sec για το σενάριο 7 (232% μεγαλύτερος από το σενάριο 3) και 1409 sec για το σενάριο 8 (115% μεγαλύτερος από το σενάριο 4).

Σενάρια 9-12

Στα δύο αυτά σενάρια έχουμε περίπτωση νύχτας σε πλοίο RO-PAX. Στο σενάριο 9, το 5% των επιβατών βρίσκεται σε κατάσταση πανικού ενώ στο σενάριο 10 το 10%.

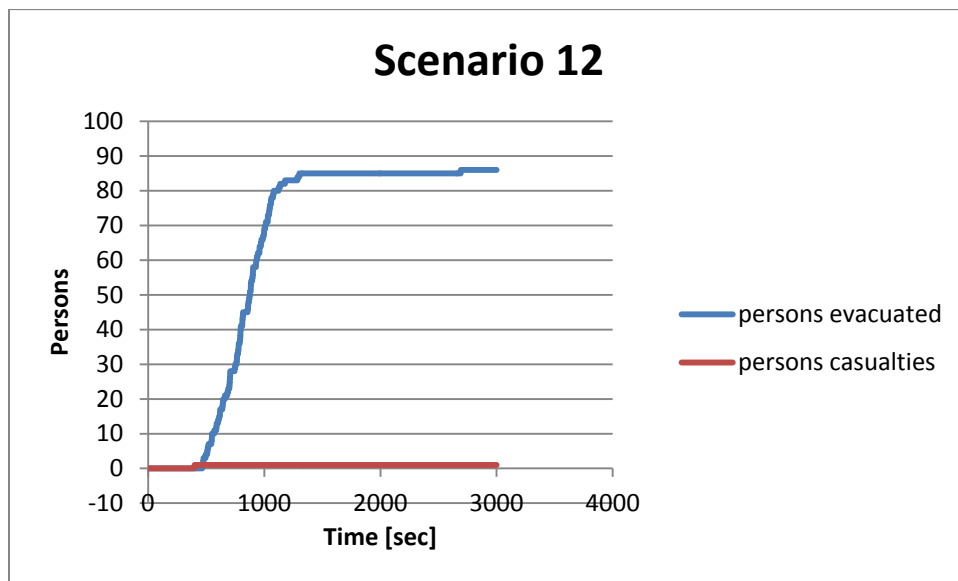
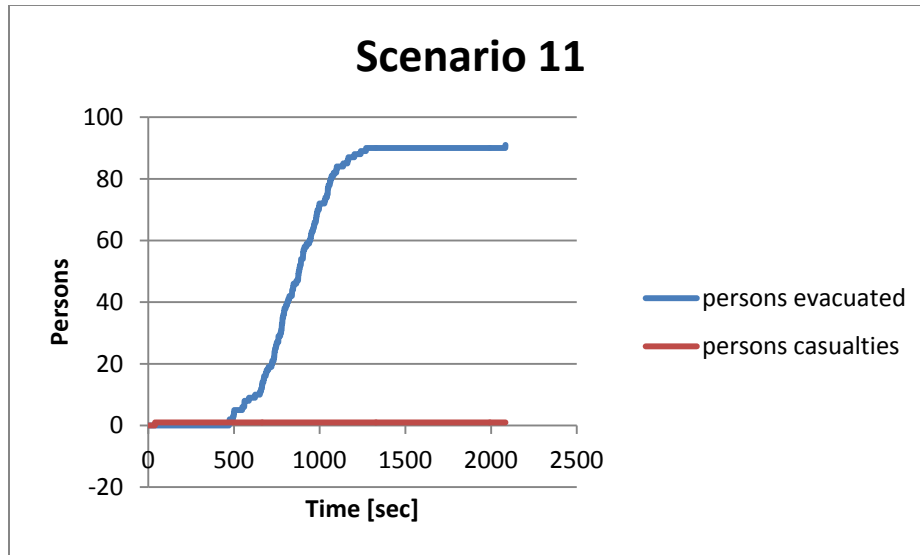




Η διαφυγή ολοκληρώθηκε σε 3000 sec (χρονικό όριο που είχαμε θέσει) και στα δυο σενάρια. Επίσης, στο σενάριο 9 είχαμε τρεις απώλειες (δυο από αέρια, ένας λόγω παρέλευσης χρόνου), ενώ στο σενάριο 10 είχαμε 6 απώλειες (πέντε από αέρια, ένας λόγω παρέλευσης χρόνου).

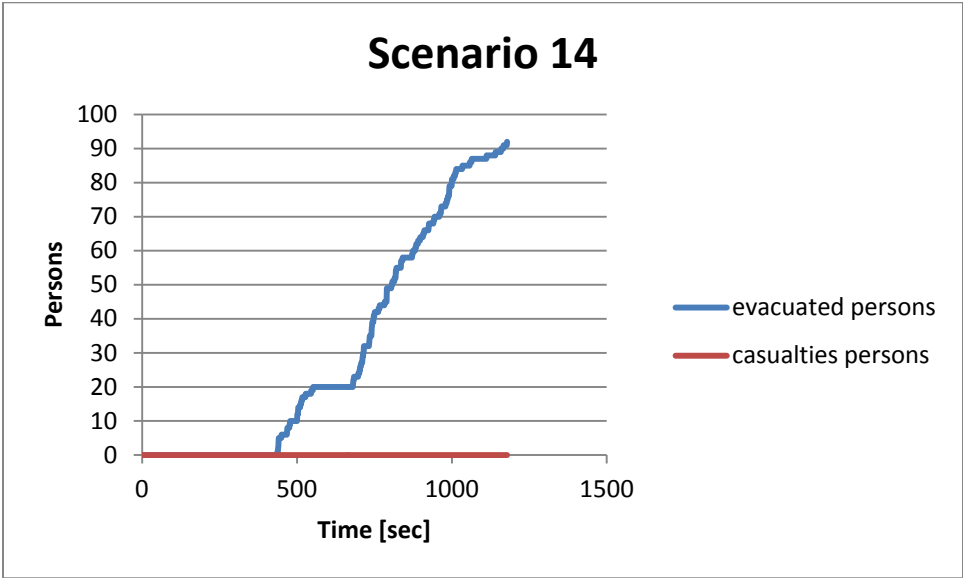
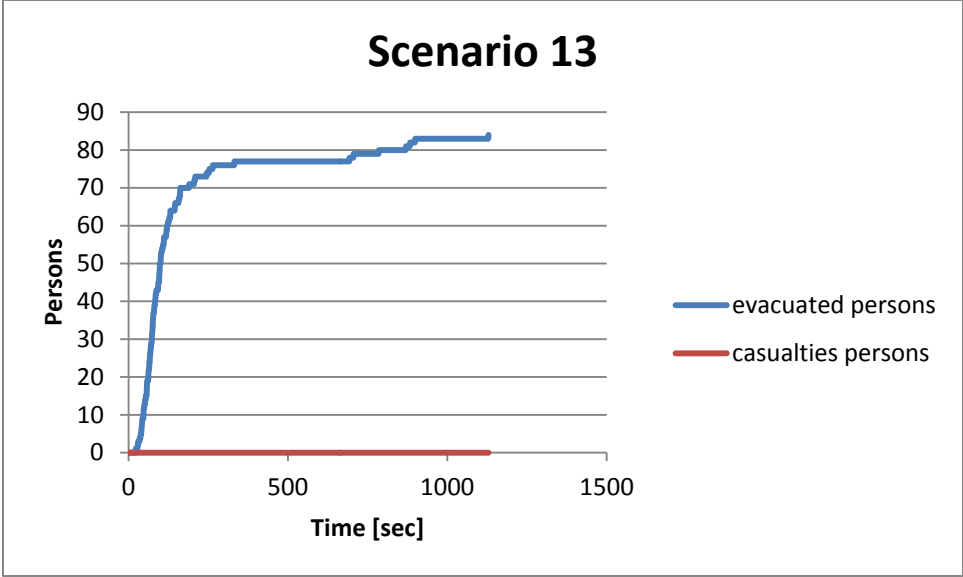
Συγκρινόμενα τα παραπάνω αποτελέσματα με το αντίστοιχα σενάρια χωρίς πανικό (σενάρια 5 & 6), παρατηρούμε ότι υπάρχει σημαντική καθυστέρηση λόγω της παρουσίας ατόμων σε πανικό, καθώς επίσης και αυξημένες απώλειες. Ελέγχοντας τις καταγραφές των αρχείων person_tracker παρατηρούμε ότι τόσο οι καθυστερήσεις όσο και οι απώλειες οφείλονται σε άτομα που βρίσκονται σε πανικό και τα οποία δεν μπορούν να λάβουν λογικές αποφάσεις. Έτσι, εγκλωβίζονται για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα εντός του χώρου και εισπνέουν μεγάλες ποσότητες καπνού και αερίων.

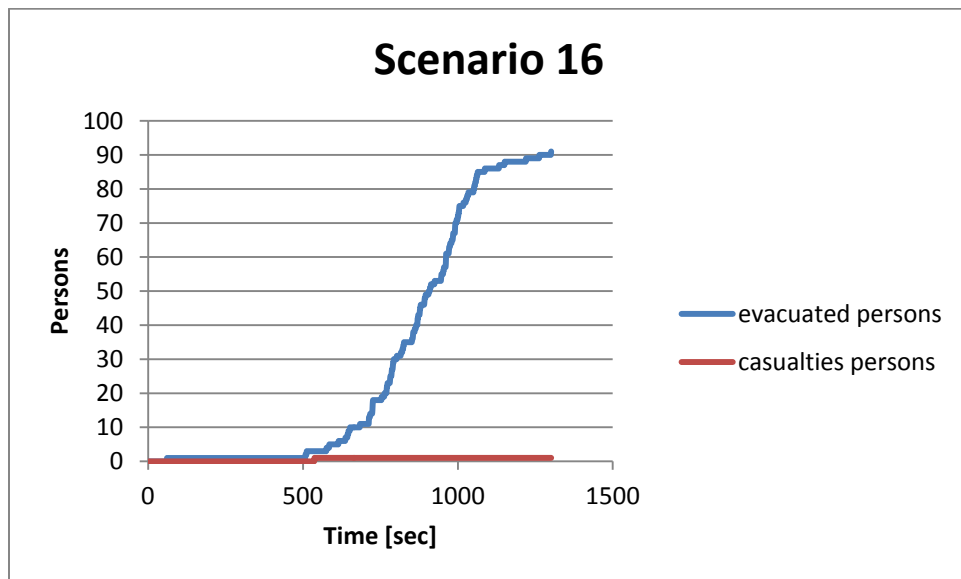
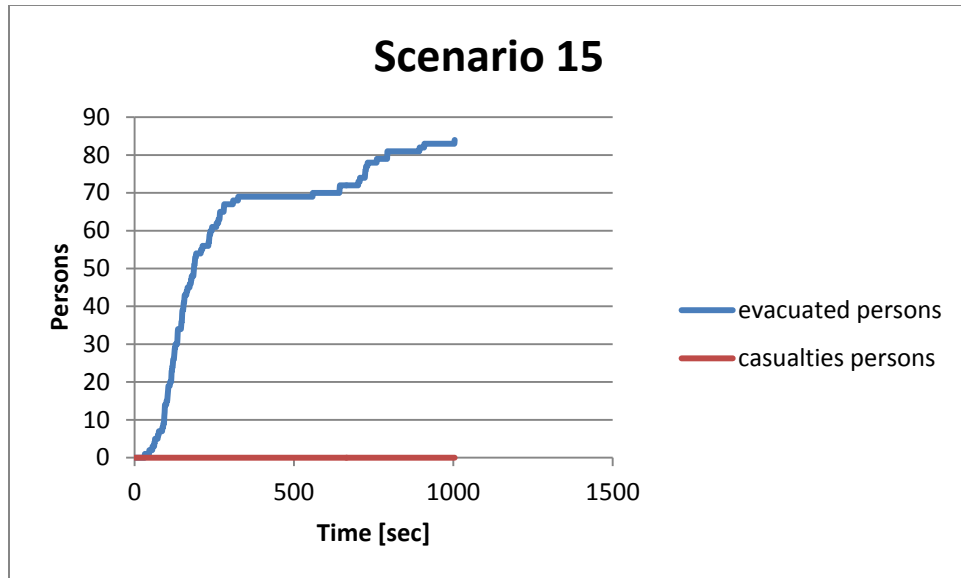
Παρόμοια αποτελέσματα βλέπουμε και στα αντίστοιχα σενάρια για κρουαζιερόπλοιο, με την διαφυγή να ολοκληρώνεται σε 2084 sec για το σενάριο 11 και σε 3000 sec για το σενάριο 12. Επίσης, στο σενάριο 11 είχαμε μια απώλεια και στο σενάριο 2, είχαμε έξι. Όλες οι απώλειες αφορούσαν άτομα που βρίσκονταν σε πανικό.



Σενάρια 13-16

Στα σενάρια 13 έως 16 θα δούμε τέσσερις περιπτώσεις με πυρκαγιά (δύο για πλοίο RO-PAX και δυο για κρουαζιερόπλοιο), όπου το δημογραφικό δείγμα των επιβατών αποτελείται μόνο από άτομα άνω των 50 ετών.

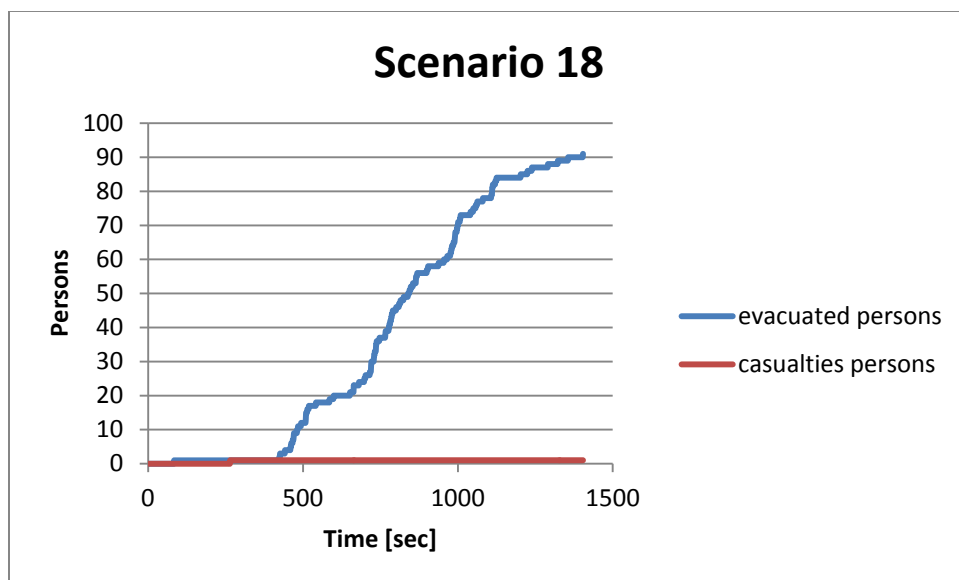
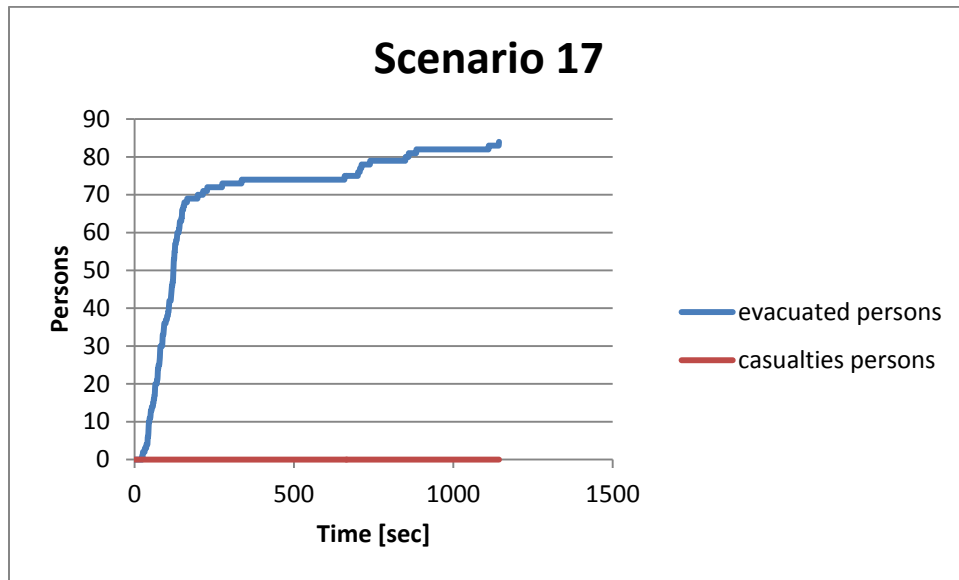




Συγκρινόμενα τα σενάρια 13 και 14 (πλοίο RO-PAX) με τα σενάρια 5 και 6 προκύπτουν πολύ μικρές διαφορές, οι οποίες ωστόσο εξηγούνται από την ελαφρώς μικρότερη ταχύτητα και την μικρότερη μνήμη της συγκεκριμένης ηλικιακής ομάδας έναντι των υπολοίπων. Αντίστοιχα στοιχεία προκύπτουν και από τη σύγκριση των σεναρίων 15 και 16 (κρουαζιερόπλοιο) με τα σενάρια 7 και 8.

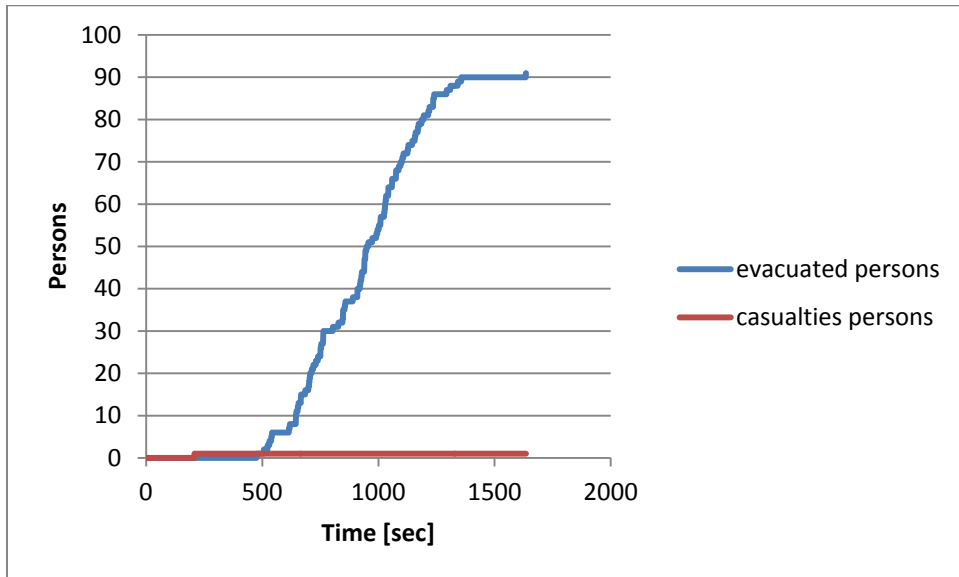
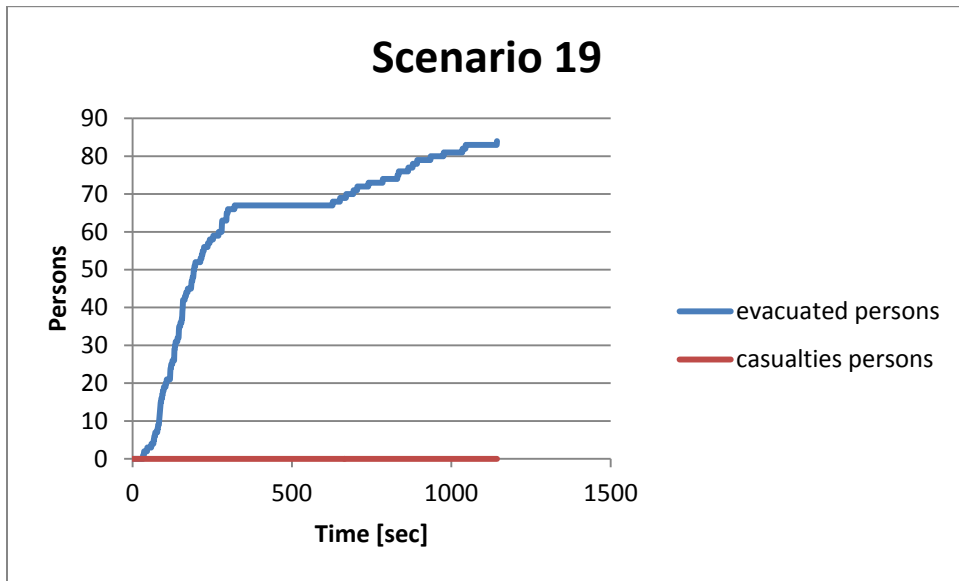
Σενάρια 17-20

Εδώ επιστρέφουμε στην κανονική κατανομή των διαφόρων ομάδων των επιβατών. Η μεγάλη διαφορά είναι ότι το κλιμακοστάσιο S1 είναι μη προσβάσιμο, επομένως ο μόνος τρόπος διαφυγής των επιβατών από το κατάστρωμα 1 όπου βρίσκονται οι καμπίνες είναι το κλιμακοστάσιο S2. Θα τρέξουμε και πάλι 4 σενάρια , δυο για κάθε τύπο πλοίου. Τα αποτελέσματα είναι τα ακόλουθα:



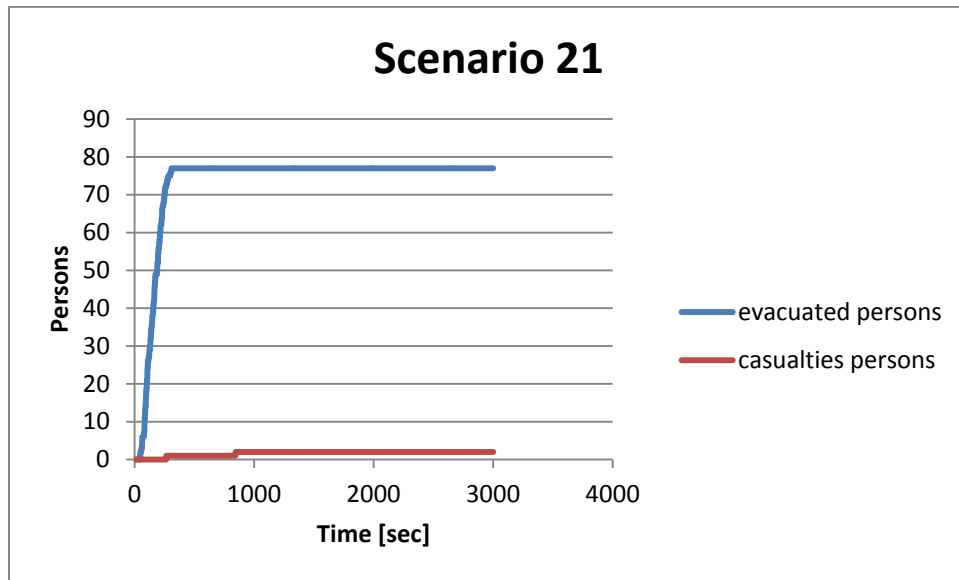
Μια πρώτη παρατήρηση είναι ότι στην περίπτωση νύχτας (σενάριο 18) ο χρόνος ολοκλήρωσης έχει σημαντική διαφορά έναντι του σεναρίου 6 (1404 και 1113 sec αντίστοιχα). Αντιθέτως, τα αποτελέσματα του σεναρίου 17 (περίπτωση ημέρας) είναι παραπλήσια με τα αποτελέσματα

του σεναρίου 5. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι στο σενάριο ημέρας η πλειοψηφία των επιβατών βρίσκεται στους κοινόχρηστους χώρους, οι οποίοι εντοπίζονται κυρίως στο κατάστρωμα 2 όπου και οι κύριες έξοδοι προς το εξωτερικό κατάστρωμα. Επομένως, οι περισσότεροι επιβάτες δεν χρειάζεται να χρησιμοποιήσουν κάποιο κλιμακοστάσιο και συνεπώς η διαδικασία δεν επιβραδύνεται παρά ελάχιστα. Παρόμοια είναι τα αποτελέσματα και για την περίπτωση του κρουαζιερόπλοιου:



Σενάριο 21

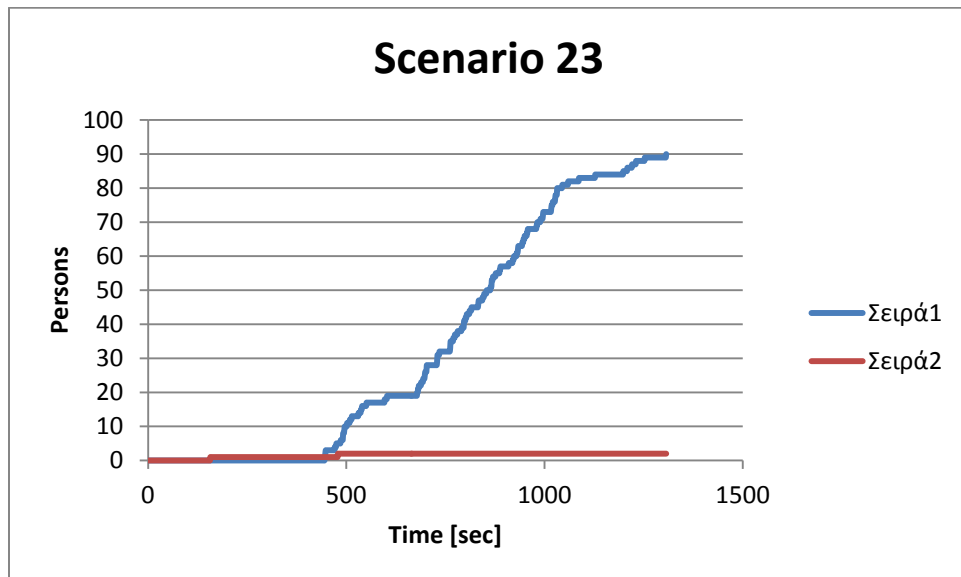
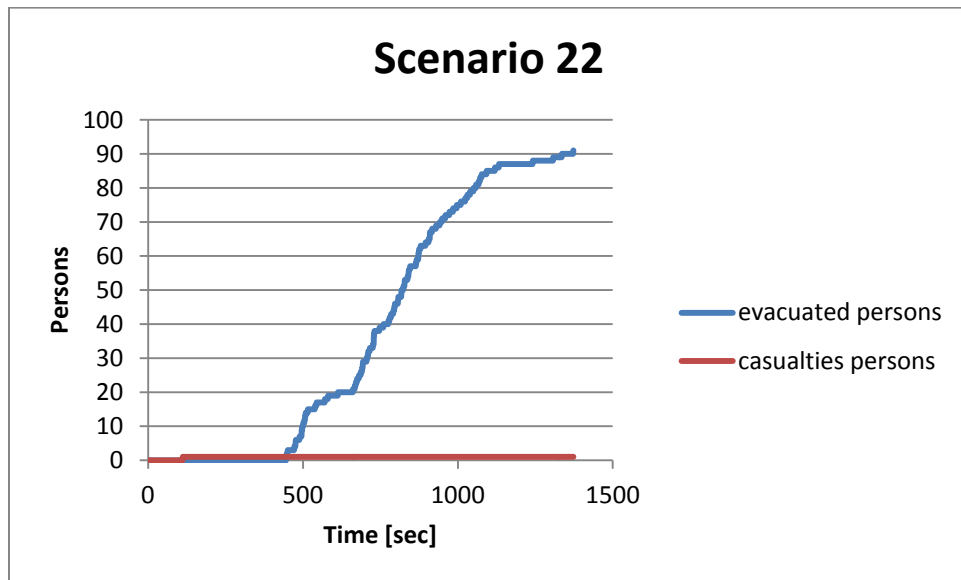
Στο σενάριο 21 διερευνούμε την ακραία περίπτωση του να βρίσκονται εκτός λειτουργίας τα συστήματα αυτόματης κατάσβεσης (sprinkler) του πλοίου. Η εστία της πυρκαγιάς βρίσκεται στον ίδιο χώρο και είναι του ίδιου μεγέθους με τα προηγούμενα σενάρια. Το πλοίο είναι τύπου CRUISE και το συμβάν γίνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Τα αποτελέσματα είναι τα ακόλουθα:



Τα αποτελέσματα του σεναρίου ήταν: 77 άτομα που διέφυγαν και 7 απώλειες. Από το αρχείο person_tracker βλέπουμε ότι τα 77 άτομα που διέφυγαν, βρίσκονταν σχεδόν στο σύνολό τους στο Deck 2 όπου βρίσκονται οι κοινόχρηστοι χώροι και στο Deck 3, όπου βρίσκονται οι χώροι ενδιαίτησης του πληρώματος. Επίσης, τέσσερις από τους διαφυγόντες επιβάτες βρίσκονταν αρχικά στους χώρους P1 και P2 του Deck 1, οι οποίοι οδηγούν στα αντίστοιχα κλιμακοστάσια. Όπως βλέπουμε και στο παραπάνω διάγραμμα, οι επιβάτες αυτοί διαφεύγουν σχετικά σύντομα (308 sec). Οι επιβάτες που χαρακτηρίστηκαν ως απώλειες βρίσκονταν αρχικά στο Deck 1, όπου και η εστία της πυρκαγιάς. Οι περισσότερες απώλειες εντοπίζονται στους χώρους P1, P2, S3, P4 και LOBBY, αφού οι επιβάτες εγκλωβίζονται σε αυτούς λόγω των υψηλών επιπέδων καπνού.

Σενάρια 22 & 23

Στα σενάρια αυτά έχουμε περίπτωση νύκτας σε κρουαζιερόπλοιο, με πυρκαγιά στην καμπίνα C10. Στο σενάριο 22 το πλοίο βρίσκεται υπο κλίση εγκάρσια κλίση (heel) 10 μοιρών, ενώ στο σενάριο 23 υπόκειται σε διατοιχισμό 10 μοιρών με περίοδο 5 sec.



Συνοπτικά, τα αποτελέσματα όλων των σεναρίων παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα:

Αποτελέσματα			
Σενάριο	Διαφυγόντες	Απώλειες	Χρόνος ολοκλήρωσης προσομοίωσης
1	84	0	324
2	92	0	729
3	84	0	398
4	92	0	1217
5	84	0	952
6	91	1	1113
7	84	0	925
8	92	0	1409
9	89	3	3000
10	86	6	3000
11	91	1	3000
12	86	6	3000
13	84	0	1129
14	92	0	1178
15	84	0	1004
16	91	1	1301
17	92	0	1404
18	91	1	1113
19	84	0	1143
20	91	1	1635
21	77	7	3000
22	91	1	1373
23	90	2	1307

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Στην παρούσα εργασία αναπτύξαμε ένα μοντέλο διαφυγής για την περίπτωση πυρκαγιάς στα επιβατηγά πλοία, έναν παράγοντα κινδύνου τον οποίο παραβλέπουν τα περισσότερα από τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί. Για την ανάπτυξή του βασιστήκαμε σε ένα ήδη υπάρχον μοντέλο, το οποίο αναπτύχθηκε για κτίρια, το οποίο προσπαθήσαμε να εμπλουτίσουμε και να προσαρμόσουμε στην περίπτωση του πλοίου.

Ο λόγος που επιλέξαμε το συγκεκριμένο μοντέλο ήταν ότι λόγω του τύπου του (coarse network) είναι πιο εύκολο να παραμετροποιηθεί και να υλοποιηθεί. Όπως είδαμε και στο κεφάλαιο 2, τα coarse network μοντέλα έχουν το μειονέκτημα ότι δεν μπορούν να περιγράψουν με μεγάλη λεπτομέρεια τον χώρο και τα αντικείμενα ή εμπόδια που υπάρχουν εντός αυτού. Ωστόσο, η απλότητα και η ευκολία στη χρήση τους τα κάνει ενδεδειγμένα για τον στόχο που είχαμε θέσει, την ανάπτυξη δηλαδή ενός μοντέλου που θα βοηθά τον μελετητή ναυπηγό κατά τα πρώτα στάδια της μελέτης ώστε να ελέγχει την εναρμόνιση των χώρων που σχεδιάζει με τους ισχύοντες κανονισμούς της σύμβασης SOLAS σχετικά με την διαφυγή, πριν προχωρήσει στην τελική ανάλυση της επάρκειας των μέσων διαφυγής με κάποια πιο εξελιγμένα μοντέλα. Ο δεύτερος και εξίσου σημαντικός λόγος για την επιλογή του συγκεκριμένου μοντέλου ήταν ο τρόπος με τον οποίο επιλέγει την διαδρομή των επιβατών: ο αλγόριθμος επιλογής στον οποίο βασίζεται επιτρέπει τον εντοπισμό και τη χρήση εναλλακτικών διαδρομών διαφυγής σε περίπτωση που η κύρια διαδρομή είναι μπλοκαρισμένη είτε λόγω του καπνού, είτε λόγω της συμφόρησης από από την παρουσία μεγάλου αριθμού επιβατών. Ο αλγόριθμος αυτός να αναπτύχθηκε με βάση στοιχεία ερευνών από διάφορους τομείς (κτίρια, τραίνα, αεροπλάνα κλπ.) και μας δίνει τη δυνατότητα να τον παραμετροποιήσουμε κατά τέτοιο τρόπο ώστε η συμπεριφορά των επιβατών να είναι συμβατή με τα στοιχεία της σχετικής βιβλιογραφίας που παραθέσαμε στο κεφάλαιο 4.

Οι κύριες αλλαγές/συνεισφορές στις οποίες προχωρήσαμε ήταν οι ακόλουθες:

- Υπολογισμός του χρόνου απόκρισης επιβατών (response ή awareness time) με βάση τις κατανομές που έχουν εξαχθεί από το ερευνητικό πρόγραμμα SAFEGUARD μετά από ασκήσεις εγκατάλειψης με πραγματικούς επιβάτες σε επιβατηγά πλοία και κρουαζιερόπλοια.
- Κατηγοριοποίηση επιβατών σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά που μας δίνει η οδηγία MSC.1/Circ.1238
- Εισαγωγή του πληρώματος και των χαρακτηριστικών του.
- Ορισμός της ταχύτητας ανεμπόδιστης κίνησης επιβατών και πληρώματος με βάση τις κατανομές της οδηγίας MSC.1/Circ.1238

- Αρχική κατανομή επιβατών στο χώρο σύμφωνα με τα βασικά σενάρια του κώδικα FSS για την διεξαγωγή ανάλυσης της διαδικασίας διαφυγής.
- Αλλαγή στον τρόπο υπολογισμού της απόστασης που πρέπει να διανύσει ο επιβάτης προκειμένου να διασχίσει έναν χώρο, λαμβάνοντας υπόψη την απόσταση μεταξύ της πόρτας εισόδου και της πόρτας εξόδου.
- Εισαγωγή μοντέλου τοξικότητας (toxicity model) βασισμένου στη θεωρία του D. Purser, το οποίο μας επιτρέπει να εκτιμήσουμε τις τυχόν απώλειες (casualties) λόγω της υψηλής θερμοκρασίας και των συγκεντρώσεων καπνού και τοξικών παραγώγων της πυρκαγιάς.
- Εισαγωγή του πανικού σύμφωνα με τις καταγραφόμενες συμπεριφορές (behavioral patterns) που εντοπίστηκαν στην βιβλιογραφία. Ο πανικός εισάγεται ως ποσοστό επί του συνόλου των επιβατών και το μοντέλο κατανέμει τυχαία τα πανικοβλημένα άτομα στον χώρο.

Οι συγγραφείς του αρχικού μοντέλου στο οποίο βασιστήκαμε δεν μας έδιναν πληροφορίες για το πρόγραμμα και τις λεπτομέρειες των αλγορίθμων που αναπτύχθηκαν προκειμένου να εκτελεστούν οι προσομοιώσεις. Έτσι, προχωρήσαμε στην ανάπτυξη κώδικα σε γλώσσα προγραμματισμού Java προκειμένου να μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο, ενσωματώνοντας φυσικά τις παραπάνω αλλαγές. Ο κώδικας αναπτύχθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι εύκολη η αλλαγή και του δημογραφικού δείγματος (εικόνα 5.4.2.1, σελ. 110) και των κατανομών των ταχυτήτων των επιβατών και του πληρώματος (εικόνες 5.4.5.2-3, σελ. 116).

Για την εξαγωγή των δεδομένων πυρκαγιάς χρησιμοποιήσαμε το μοντέλο CFAST του ερευνητικού ιδρύματος NIST. Οι βασικοί λόγοι της χρησιμοποίησης του συγκεκριμένου μοντέλου ήταν η απλότητα στην χρήση του, η εξαγωγή όλων των στοιχείων σχετικά με τις συγκεντρώσεις τοξικών παραγώγων τις πυρκαγιάς που χρειαζόμασταν για το μοντέλο τοξικότητας και τέλος το γεγονός ότι είναι το μοναδικό ελεύθερα διαθέσιμο σχετικό μοντέλο. Το μοντέλο CFAST δίνει, κατά τη βιβλιογραφία, αξιόπιστα αποτελέσματα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στην περίπτωση του πλοίου. Ωστόσο, η χρήση του μας δημιούργησε δυο βασικά προβλήματα:

- Η δυνατότητά του να αναλύσει μέχρι 30 ξεχωριστά διαμερίσματα (compartments) είναι ένας σημαντικός περιοριστικός παράγοντας για την περίπτωση ενός μεγάλου επιβατηγού πλοίου, όπου τα διαμερίσματα είναι αρκετά περισσότερα. Για να ξεπεράσουμε αυτό το πρόβλημα αναγκαστήκαμε να προχωρήσουμε σε απλοποιήσεις, οι οποίες ωστόσο δεν επηρέασαν σε σημαντικό βαθμό τα παραγόμενα αποτελέσματα.
- Ο τρόπος εξαγωγής των αποτελεσμάτων και ο μεγάλος όγκος των δεδομένων (υπολογιστικά φύλλα Excel με καταγραφή ανά 1 sec των διάφορων δεδομένων για κάθε χώρο) δημιουργεί προβλήματα αυξημένης απαίτησης μνήμης όσο αυξάνονται τα

compartments εντός του αναλυόμενου χώρου. Επομένως απαιτείται η χρήση υπολογιστή με σχετικά μεγάλη φυσική μνήμη (τουλάχιστον 4GB RAM) όταν θέλουμε να τρέξουμε την προσομοίωση για μεγάλο αριθμό διαμερισμάτων (άνω των 30). Το πρόβλημα αυτό θα μπορούσε ενδεχομένως να επιλυθεί με βελτιστοποίηση του κώδικα του μοντέλου ώστε να κάνει καλύτερη διαχείριση της διαθέσιμης μνήμης. Αυτό όμως απαιτεί ιδιαίτερο κόπο που ξεπερνά τα πλαίσια μιας διπλωματικής εργασίας.

Ένα σημαντικό κομμάτι της διαδικασίας ανάπτυξης ενός μοντέλου είναι η εξακρίβωση (validation) αφενός της σωστής λειτουργίας όλων των διαδικασιών που περιλαμβάνει και αφετέρου της ορθότητας των αποτελεσμάτων που αυτό εξάγει με βάση τις τυπικές συμπεριφορές που είδαμε στο κεφάλαιο 4. Για την διαδικασία αυτή χρησιμοποιήσαμε τα τεστ που προτείνει ο IMO στην οδηγία MSC.1/Circ.1238. Όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, το μοντέλο πέρασε επιτυχώς όλα τα τεστ που μπορούσαν να εφαρμοστούν σε αυτό (δηλαδή όλα τα τεστ της οδηγίας, πλην του τεστ 6 που αφορά continuous ή fine network/grid μοντέλα). Επίσης, προχωρήσαμε στην κατασκευή χώρου τριών καταστρωμάτων, που αποτυπώνει την τυπική διαρρύθμιση ενός τμήματος της ενδιάμεσης επιβατών και πληρώματος ενός επιβατηγού πλοίου, και τρέξαμε ένα σετ σεναρίων ώστε να δούμε αν το μοντέλο εξάγει ρεαλιστικά αποτελέσματα με βάση τα στοιχεία που του δίνουμε. Ιδανικά θα θέλαμε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα του μοντέλου με στοιχεία από πραγματικά περιστατικά, ωστόσο δεν κατέστη δυνατόν να βρεθούν αυτά τα στοιχεία και αυτό για δυο λόγους:

- Σε αντίθεση με τα κτίρια, στην περίπτωση των πλοίων δεν υπάρχουν προς το παρόν σεναρία αναφοράς (benchmark scenarios) ώστε να γίνεται σύγκριση των παραγόμενων αποτελεσμάτων των μοντέλων διαφυγής, ειδικά για την περίπτωση πυρκαγιάς όπου χρειαζόμαστε και αναλυτικά στοιχεία σχετικά με τις συνθήκες εντός του χώρου (θερμοκρασίες, επίπεδα καπνού, διαφόρων αερίων κλπ.)
- Σχετικά στοιχεία από διερευνήσεις ναυτικών ατυχημάτων είναι εξαιρετικά δύσκολο να βρεθούν, καθώς η πρόσβαση σε αυτά δεν είναι εφικτή για το ευρύ κοινό και συνήθως ούτε για τους επιστήμονες. Για το λόγο αυτό, οι σχετικές αναφορές στη βιβλιογραφία είναι ελάχιστες και μη εκμεταλλεύσιμες.

Με βάση τα παραπάνω, θεωρούμε ότι η περαιτέρω ανάπτυξη του μοντέλου θα πρέπει να κινηθεί στους ακόλουθους άξονες:

- Εύρεση και χρήση ενός μοντέλου πυρκαγιάς που να άρει τον περιορισμό των 30 διαμερισμάτων του CFAST, αλλά να εξάγει τα απαιτούμενα δεδομένα σχετικά με τις θερμοκρασίες, τον καπνό και τις συγκεντρώσεις παραγόμενων αερίων. Σύζευξη του μοντέλου αυτού με τον προσομοιωτή του μοντέλου διαφυγής, ώστε να παράγονται

ταυτόχρονα τα αποτελέσματα και των δυο μοντέλων και να μειώνεται τόσο η ταχύτητα εξαγωγής τελικών αποτελεσμάτων όσο και η χρήση φυσικής μνήμης του υπολογιστή.

- Βελτιστοποίηση του κώδικα του μοντέλου ώστε αφενός να κάνει καλύτερη χρήση των δυνατοτήτων του υπολογιστή αλλά και να επιτρέπει την πιο εύκολη εισαγωγή τόσο των δεδομένων που χρειάζεται (μέσω γραφικού περιβάλλοντος) όσο και του υπό διερεύνηση χώρου μέσω π.χ. αρχείου CAD.
- Αλλαγή στον τρόπο μοντελοποίησης του χώρου από coarse network σε grid ή continuous network, ώστε να μπορεί να προσομοιωθεί καλύτερα η αλληλεπίδραση μεταξύ των επιβατών, η επίδραση των κινήσεων του πλοίου αλλά και η παρουσία εμποδίων εντός του χώρου.
- Εισαγωγή δυνατότητας γραφικής αναπαράστασης της εξέλιξης της διαφυγής και των σημείων συμφόρησης εντός του χώρου.
- Κατασκευή μοντέλου απόκρισης επιβατών και πληρώματος που να λαμβάνει υπόψη τις συνθήκες που διαμορφώνονται εντός του χώρου λόγω της πυρκαγιάς και τις αντιδράσεις των επιβατών στα στοιχεία (clues) που αυτές δίνουν.

Βιβλιογραφία

- Ando K. et al. (1988). Forecasting the flow of people. *Railway Research Review* , 45 (8), 8-14.
- Andrews, D., Casarosa, L., Pawling, R., Galea, E. R., Deere, S., & Lawrence, S. (2008). Integrating personnel movement simulation into preliminary ship design. *International Journal of Maritime Engineering* , 150 (1), 19-34.
- Ashcraft, N., & Scheflen, A. (1976). *People Space: The Making and Breaking of Human Boundaries*. New York: Anchor Press.
- Benzur, H., & Breznitz, S. J. (1981). The effect of time pressure on risky choice behavior. *Acta Psychologica* , 47, 89-104.
- Bles, W., Nooy, S., & Boer, L. C. (2001). Influence of ship listing and ship motion on walking speed. In *Proceedings of Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics*. Duisburg: Springer.
- Boulougouris, E. K., & Papanikolaou, A. (2002). Modeling and simulation of the evacuation process of passenger ships. In *Proceedings of the 10th International Congress of International Maritime Association of the Mediterranean*. Crete 2002.
- Boyce, K. E., Shields, T. J., & Silcock, G. W. (1999). Toward the characterization of building occupancies: capabilities of disabled people moving horizontally and on an incline. *Fire Technology* , 35 (1), 51-67.
- Brown, R., Galea, E. R., Deere, S., & Filippidis, L. (2012). Passenger response time data-sets for large passenger ferries and cruise ships derived from sea trials and recommendations to IMO to update MSC Circ. 1238. In *SAFEGUARD Passenger Evacuation Seminar, 30 November 2012*. London: The Royal Institution of Naval Architects.
- Brumpley, A. T., & Koss, L. L. (2000). The influence of human factors on the motor ability of passengers during the evacuation of ferries and ships. In *Proceedings of Conference on Human Factors in Ship Design and Operations*. London: The Royal Institution of Naval Architects.
- Canter, D. (1985). *Studies of Human Behaviour in Fire: Empirical Results and their Implications for Education and Design*. London: Building Research Establishment, Department of the Environment.
- Davidson, G. C., Blankstein, K. R., Flett, G. L., & Neale, J. M. (2014). *Study Guide to Accompany Abnormal Psychology* (5th ed.). New York: John Wiley & Sons Inc.
- De Silva, F. N., Pidd, M., & Eglese, R. W. (1996). A simulation model for emergency evacuation. *European Journal of Operational Research* , 90, 413-419.
- Deree, S. J., Galea, E. R., & Lawrence, P. J. (2009). A systematic methodology to assess the impact of human factors in ship design. *Applied Mathematical Modeling* , 33, 867-883.

- Englander, T., & Tyszka, T. (1980). Information seeking in open decision situations. *Acta Psychologica*, 45 (3), 167-176.
- Floyd, E. J. (2002). *Comparison of CFAST and FDS for fire simulation with the HDR T51 and T52 tests*. Gaithersburg MD: National Institute of Standards and Technology.
- Fowler, T. G., & Sorgard, E. (2000). Modeling ship transportation risk. *Risk Analysis*, 20 (2), 225-244.
- Ginnis, A. I., Kostas, K. V., Politis, G. C., & Kaklis, P. D. (2010). VELOS: a VR platform for ship-evacuation analysis. *Computer-Aided Design*, 42 (11), 1045-1058.
- Glenn, I. F., Galea, E. R., & Kiefer, K. C. (2001). *Ship evacuation simulation: Challenges and solutions. Discussion. Author's Closure. Vol. 109*. New York: Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- Glenn, I. F., Igloliorte, G., Galea, E. R., & Gautier, C. (2003). Experimental determination of passenger ship behaviour in ship evacuations in support of advanced evacuation simulation. In *International Conference on Passenger Ship Safety, London 25-26 March 2003*. London: Royal Institution of Naval Architects.
- Groner, R., Groner, M., & Bischof, F. W. (1983). The role of heuristics in models of decision. In R. W. Scholz (Ed.), *Decision-making Under Uncertainty* (pp. 87-108). North-Holland: Elsevier Science.
- Gruchy, D. F. (2004). *Modeling occupant evacuation during fire emergencies in buildings. Master of Applied Sciences Thesis*. Ottawa: Carleton University.
- Gwynne, S., & Galea, E. R. (1997). Escape as a social behaviour (Paper No. 97/IM/26). CMS Press.
- Gwynne, S., Galea, E. R., Owen, M., Lawrence, P. J., & Filippidis, L. (1999). A review of the methodologies used in evacuation modelling. *Fire and Materials*, 23, 383-388.
- Helbing, D., & Johansson, A. (2014). Pedestrian, crowd and evacuation dynamics. In R. A. Meyers (Ed.), *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*. New York: Springer Science + Business Media.
- Helbing, D., Farkas, I., Molnar, P., & Vicsek, T. (2002). Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations. In M. Schreckenberg, & S. D. Sharma (Eds.), *Pedestrian and Evacuation Dynamics* (pp. 21-58). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Henein, C. M., & White, T. (2010). The microscopic model and the panicking ball-bearing. In W. Klingsch, A. Schadschneider, C. Rogsch, & M. Schreckenberg (Eds.), *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Heskestad, G. (1984). Engineering relations for fire plumes. *Fire Safety Journal*, 7, 25-32.
- Illera, C., Fink, M., Hinneberg, H., Kath, K., Waldau, N., Rosic, A., et al. (2010). NO_PANIC. Escape and panic in buildings. In W. Klingsch, A. Schadschneider, C. Rogsch, & M. Schreckenberg (Eds.), *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*. Heidelberg: Springer-Verlag.

- IMO. (2012). *International Convention for Safety of Life at Sea (SOLAS 74/78) (2012 Consolidated ed.)*. London: International Maritime Organization.
- IMO. (2000). *MSC 73/21/Add.2, International Code for Fire Safety Systems (FSS Code)*. London: International Maritime Organization.
- IMO. (2008). *MSC 85/INF.2, FSA - Cruise ships: Details of the Formal Safety Assessment*. London: International Maritime Organization.
- IMO. (2007). *MSC.1/Circ.1238, Guidelines for evacuation analysis of new and existing passenger ships*. London: International Maritime Organization.
- IMO. (2001). *MSC/Circ.1002, Guidelines on alternative design and arrangements for fire safety*. London: International Maritime Organization.
- IMO. (1999). *MSC/Circ.909, Interim guidelines for a simplified evacuation analysis of new and existing passenger ships*. London: International Maritime Organization.
- Janis, I., & Mann, L. (1977). *Decision-making*. New York: The Free Press.
- Kahneman, D., & Tversky, A. (1982). Variants of uncertainty. In D. Kahneman, P. Slovic, & A. Tversky (Eds.), *Judgement under Uncertainty; Heuristics and Biases* (pp. 509-520). Cambridge: Cambridge University Press.
- Katuhara et al. (1997). Simulation of human escape on board-I. *Journal of Japan Institute of Navigation*, 96, 283-293.
- Katuhara et al. (1998). Simulation of human escape on board-II. *Journal of Japan Institute of Navigation*, 98, 141-150.
- Klüpfel, H., & Povel, D. (2008). *Simulating ship evacuation*. Retrieved July 24, 2013, from <http://www.traffgo-ht.com>
- Klüpfel, H., Meyer-König, T., & Wahle, J. (2001). Microscopic simulation of evacuation processes on passenger ships. In S. Bandini, & T. Worsch (Eds.), *Theory and practical issues on cellular automata: Proceedings of the 4th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry, Karlsruhe 4-6 October 2000*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Klüpfel, H., Schreckenberg, M., & Meyer-König, T. (2005). Models for crowd movement and egress simulation. In S. P. Hoogendoorn, S. Luding, B. H. Bovy, M. Schreckenberg, & D. E. Wolf (Eds.), *Proceedings of the 5th International Workshop on Traffic and Granular Flow, Delft 2003*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Koss, L. L., Moore, A., & Porteous, B. (1997). Human mobility data for movement on ships. In *Proceedings of International Conference on Fire at Sea*. London: Royal Institution of Naval Architects.
- Lazarus, R. S., & Folkman, S. (1984). *Psychological stress and the coping process*. New York: McGraw-Hill.

- Lee, D., Kim, H., Park, J. H., & Park, B. J. (2003). The current status and future issues in human evacuation from ships. *Safety Science* , 41, 861-876.
- Lois, P., Wang, J., Wall, A., & Ruxton, T. (2004). Formal safety assessment of cruise ships. *Tourism Management* , 25, 93-109.
- Lopez Piñeiro, A., Pérez Arribas, F., Donoso, R., & Torres, R. (2005). Simulation of passengers movement on ship emergencies. Tools for IMO regulations fulfillment. *Journal of Maritime Research* , 2 (1), 105-125.
- McCaffrey, B. (1979). *Purely Buoyant Diffusion Flames - Some Experimental Results, NB-SIR 79-1910*. Gaithersburg: National Bureau of Standards.
- Muir, C., Bottobley, D. M., & Marrison, C. (1996). Effects of motivation and cabin configuration on emergency aircraft evacuation behavior and rates of egress. *The International Journal of Aviation Psychology* , 6 (1), 57-77.
- Murayama, M., Itagaki, T., & Yoshida, K. (2000). Study on evaluation of escape route by evacuation simulation. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan* , 188, 441-448.
- Nelson, H. E., & Maclennan, H. A. (1996). Emergency Movement. In P. J. DiNenno, C. L. Beyler, R. L. Custer, W. D. Walton, J. M. Watts, D. Drysdale, et al. (Eds.), *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (2nd ed., pp. 3-286-3-295). Quincy, MA: National Fire Protection Association.
- Nicholls, I., Hifi, Y., Lee, B., Galea, E., Deere, S., Blackshields, D., et al. (2012). *The SAFEGUARD heel scenario evacuation benchmark and recommendations to IMO to update MSC Circ.1238*. London: Royal Institution of Naval Architects.
- Nikolaou, N. G., & Spyrou, K. J. (2009). Numerical fire modeling for passenger ships. *13th Congress of International Maritime Association of Mediterranean (IMAM 2009), Istanbul 12-13 October 2009*, (pp. 679-688).
- Nilsen, O. V. (2004). Risk Analysis for Cruise Ships. *SAFEDOR Deliverable 4.1.2* .
- Pan, X., Han, C., Dauber, K., & Law, K. H. (2006). Human and social behavior in computational modeling and analysis of egress. *Automation in Construction* , 15 (4), 448-461.
- Park, J. H., Lee, D., Kim, H., & Yang, Y. S. (2004). Development of evacuation model for human safety in maritime casualty. *Ocean Engineering* , 31, 1537-1547.
- Park, J.H. et al. (2011). Simulation-Based Evacuation Analysis on a High Speed Coastal Passenger Ship. In *Proceedings of the Seoul International Simulation Conference* (p. 444).
- Passini, R. (1984). *Wayfinding in Architecture*. New York: Van Nostrand Reinhold.

- Peacock, R. D., Reneke, P. A., & Forney, G. P. (2013). *CFAST - Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport User's Guide. 2012 Revision*. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology.
- Proulx, G. (1993). A stress model for people facing a fire. *Journal of Environmental Psychology* , 13, 137-147.
- Purser, D. A. (1989). Modeling toxic and physical hazard in fire. *Fire Safety Science* , 2, 391-400.
- Raboud, D. W., Benichou, N., Kashef, A., Proulx, G., & Hadjisophocleous, G. V. (2002). *FIERAsystem Occupant Responce (OCRM) and Occupant Evacuation (OEVM) Models Theory Report, Research Report No. RR-100*. Ottawa: National Research Council of Canada.
- Rogsch, C., Schreckenberg, M., Tribble, E., Klingsch, W., & Kretz, T. (2010). What is panic? An overview about mass-emergencies and their origins all over the world for recent years. In W. Klingsch, A. Schadschneider, C. Rogsch, & M. Schreckenberg (Eds.), *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Saloma, C., & Perez, G. J. (2007). Herding in real escape panic. In N. Waldau, P. Gatterman, H. Knoflacher, & M. Schreckenberg (Eds.), *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2005*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Sime, J. D., & Kimura, M. (1988). The timing of escape: exit choice behavior in fires and building evacuations. In J. D. Sime, *Safety in the Built Environment* (pp. 48-61). London: E. & F.N. Spon.
- Smith, R. A. (1995). Density, velocity and flow relationships for closely packed crowds. *Safety Science* , 18, 321-327.
- Vanem, E., & Skjong, R. (2006). Designing for safety in passenger ships utilizing advanced evacuation analyses - A risk based approach. *Safety Science* , 44, 111-135.
- Vassalos, D., Christiansen, G., Kim, H. S., Bole, M., & Majumder, J. (2002). Evacuability of passenger ships at sea. In *SASMEX 2002: The 14th Safety at Sea and Marine Electronics Exhibition and Conferences*. London: DMG World Media.
- Vassalos, D., Kim, H. S., Christiansen, G., & Majumder, J. (2002). A mesoscopic model for passenger evacuation. In M. Schreckenberg, & S. D. Sharma (Eds.), *Proceedings of the International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics*. Berlin: Springer.
- Vassalos, D., Spyrou, K., Themelis, N., & Mermiris, G. (2010). Risk-based design for fire safety - A generic framework. *Proceedings of the 4th International Maritime Conference on Design for Safety*. Trieste.
- Ventikos, N. P. (2013). Exploring fire incidents/accidents onboard cruise and passenger ships. *SPOUDAI Journal of Economics and Business* , 63, 146-157.
- Xiaoping, Z., Tingkuan, Z., & Mengting, L. (2009). Modeling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches. *Building and Environment* , 44, 437-445.

Zhang X., Li X., Hadjisophocleous G. (2013). A probabilistic occupant evacuation model for fire emergencies using Monte Carlo methods. *Fire Safety Journal* , 58.

Θηλυκός, Δ. Μ. (2013). *Σημειώσεις στη Θεωρία Γραφημάτων*. Αθήνα: Τμήμα Μαθηματικών, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Οι Ν. Βεντίκος, Μ. Πέτσιου, Γ. Παπαμιχάλης και Π. Αναξαγόρου, στα πλαίσια του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος FIREPROOF, δημιούργησαν μια βάση δεδομένων με στοιχεία ατυχημάτων από επιβατηγά πλοία (κυρίως κρουαζιερόπλοια) για το χρονικό διάστημα από τον Ιούνιο του 2003 έως τον Ιανουάριο του 2010 και η οποία περιλαμβάνει 1521 περιστατικά. Η ανάλυση των στοιχείων αυτών δίνει κάποια πολύ χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την πυρκαγιά και τις συνέπειές της στην επιβατηγό ναυτιλία. Ας δούμε τα σημαντικότερα από αυτά.

Το στατιστικό μέγεθος του στόλου, για τον οποίο αναφέρονται τα περιστατικά αυτά, είναι 463 ship-years. Με βάση τον αριθμό των περιστατικών, προκύπτει ότι καταγράφονται κατά μέσο όρο 125 περιστατικά, ήτοι 3.284 περιστατικά ανά πλοίο το χρόνο. Με βάση το μέγεθος του παγκόσμιου στόλου, εκτιμάται ότι τα περιστατικά πυρκαγιάς φτάνουν τα 410 περίπου τον χρόνο.

Average Frequency / ship-year	3.284
Average fleet size / year	125
Expected number of events / year	410.52

Εικόνα Α-1: συχνότητα συμβάντων

Όσον αφορά την τοποθεσία του συμβάντος, το 71% των περιστατικών συνέβη όταν το πλοίο βρισκόταν εν πλω και το 27% όταν το πλοίο ήταν ελλιμενισμένο. Το 1% των περιστατικών συνέβη όταν το πλοίο προσέγγιζε το λιμάνι και το ίδιο ποσοστό όταν το πλοίο βρισκόταν σε αγκυροβόλιο.

Location of Vessel	n	%	P-value	
In port	410	26.96	At anchor / In port	0.003
At anchor	19	1.25		
At sea	1076	70.74	Port approaches / At sea	0.004
Port approaches	16	1.05		

Εικόνα Α-2: κατανομή συμβάντων με βάση την τοποθεσία

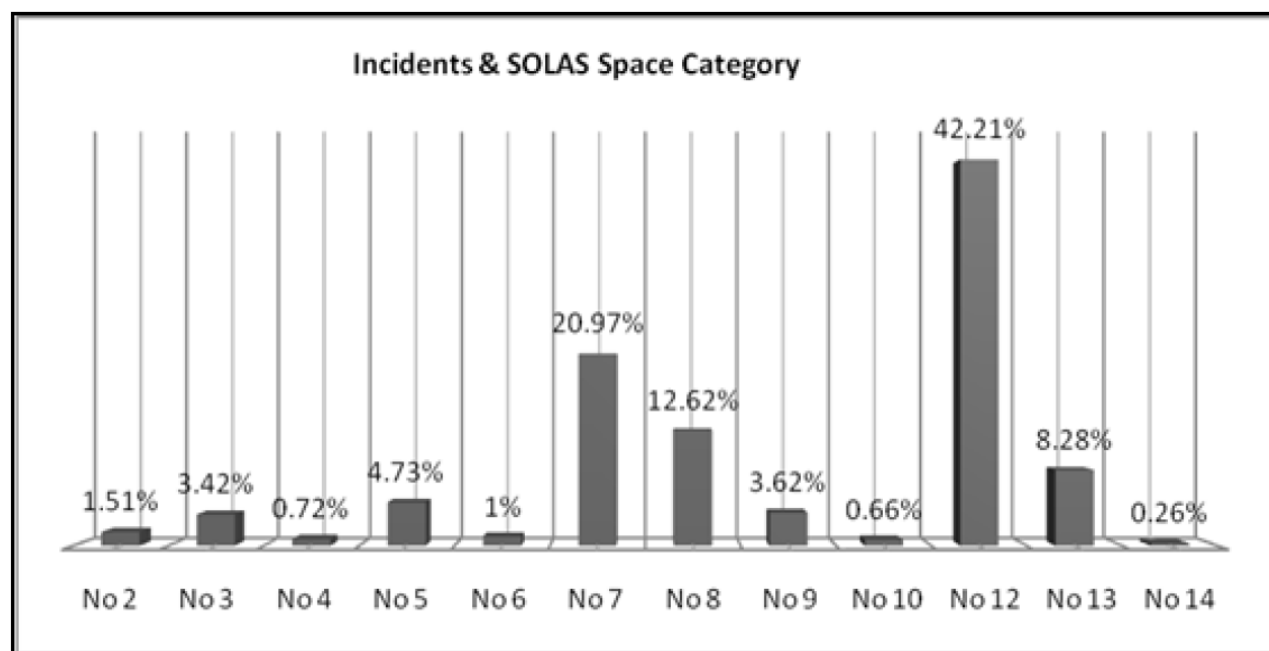
Στο 30% των περιστατικών, οι πηγές έναυσης της πυρκαγιάς ήταν ηλεκτρικής φύσεως (βραχυκύκλωμα) σε ποσοστό 30%, και ακολουθούνται από θερμά αντικείμενα σχετικά με το

κάπνισμα (τσιγάρα, σπύρα) με 22%, θερμές επιφάνειες (κουζίνα) με 12% και αυτανάφλεξη με 14.5%.

Vessel Location	n	%	P-value	
Electrical	458	30.11	Hot surface / Electrical other than static charges	0.039
Cigarettes	339	22.29		
Hot surface	187	12.29	Burning/Welding/ Cutting / Cigarettes, Matches etc	0.007
Spontaneous Combustion	219	14.40		

Εικόνα Α-3: αίτια πυρκαγιών

Οι περιοχές του πλοίου με την μεγαλύτερη συχνότητα έναρξης πυρκαγιάς είναι οι χώροι κατηγορίας 12 (μηχανοστάσιο και χώροι γεννητριών και κλιβάνων, κουζίνες) με 12%, οι χώροι κατηγορίας 7 (χώροι ενδιαίτησης με μέτριο ρίσκο πυρκαγιάς – καμπίνες) με 21%, οι χώροι κατηγορίας 8 (χώροι ενδιαίτησης με μεγάλο ρίσκο πυρκαγιάς – κουζίνες) με 13% και οι χώροι κατηγορίας 13 (γενικοί αποθηκευτικοί χώροι και χώροι αποθήκευσης τροφίμων, εργαστήρια κλπ.) με 8%.



Εικόνα Α-4: κατανομή ατυχημάτων με βάση τους χώρους κατά SOLAS

Με βάση την κατηγοριοποίηση κατά FSA της σοβαρότητας περιστατικών (αμελητέα, ελάσσονα, σημαντικά, σοβαρά και καταστροφικά), το 87% των καταγραφόμενων περιστατικών ανήκει στην πρώτη κατηγορία. Τα σημαντικά περιστατικά αφορούσαν ποσοστό μικρότερο του 1%, ενώ τα σοβαρά και καταστροφικά περιστατικά ήταν μόνο 14 ή 0.9% του συνόλου. Ωστόσο, όπως αναφέρεται ρητά, οι καταγραφές της βάσης δεδομένων αφορούν κατά κύριο λόγο περιστατικά χωρίς καταστρεπτικές συνέπειες, επομένως το ποσοστό των περιστατικών με σοβαρές συνέπειες θα πρέπει να θεωρείται αρκετά μεγαλύτερο.

Από τα παραπάνω στοιχεία εξάγονται δυο πολύ χρήσιμα συμπεράσματα: α) οι πυρκαγιές προκαλούνται κατά κύριο λόγο από ανθρώπινη αμέλεια, και β) οι πιο επικίνδυνοι χώροι για έναρξη πυρκαγιάς σε ένα επιβατηγό πλοίο είναι, σε σχεδόν ίδιο ποσοστό, το μηχανοστάσιο και οι χώροι ενδιαίτησης επιβατών. (Ventikos, 2013)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΟΔΗΓΙΕΣ ΧΡΗΣΗΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Όπως είπαμε και στο κεφάλαιο 5, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αναπτύξαμε κώδικα σε γλώσσα προγραμματισμού Java προκειμένου να μπορέσουμε να εκτελέσουμε τις προσομοιώσεις του μοντέλου. Στις επόμενες σελίδες θα παραθέσουμε αναλυτικές οδηγίες που θα βοηθήσουν τόσο τον μελλοντικό χρήστη όσο και τον επιστήμονα που θα ασχοληθεί με την περαιτέρω ανάπτυξη του μοντέλου.

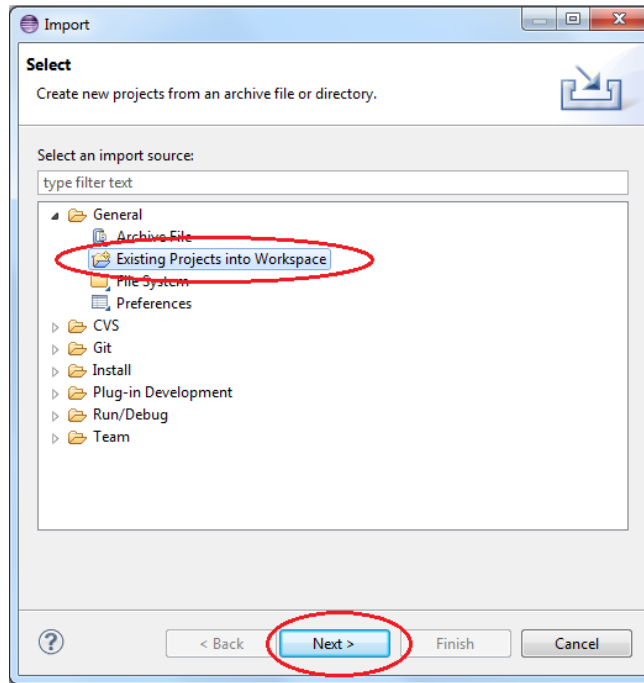
Για την ανάπτυξη του κώδικα χρησιμοποιήθηκε ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (integrated development environment – IDE) με την ονομασία Eclipse. Το Eclipse είναι ένα πρόγραμμα ανοιχτού κώδικα (open source) το οποίο και διατίθεται δωρεάν μέσω της ιστοσελίδας της ομάδας ανάπτυξης, Eclipse Foundation: <https://eclipse.org/>. Για να χρησιμοποιήσουμε το Eclipse για την ανάπτυξη κώδικα Java, χρειαζόμαστε και το αντίστοιχο προγραμματιστικό πακέτο της Java (Java Development Kit – JDK) το οποίο είναι επίσης ελεύθερα διαθέσιμο από την εταιρία Oracle στην ακόλουθη ιστοσελίδα:

<http://www.oracle.com/technetwork/java/javase/downloads/index.html>

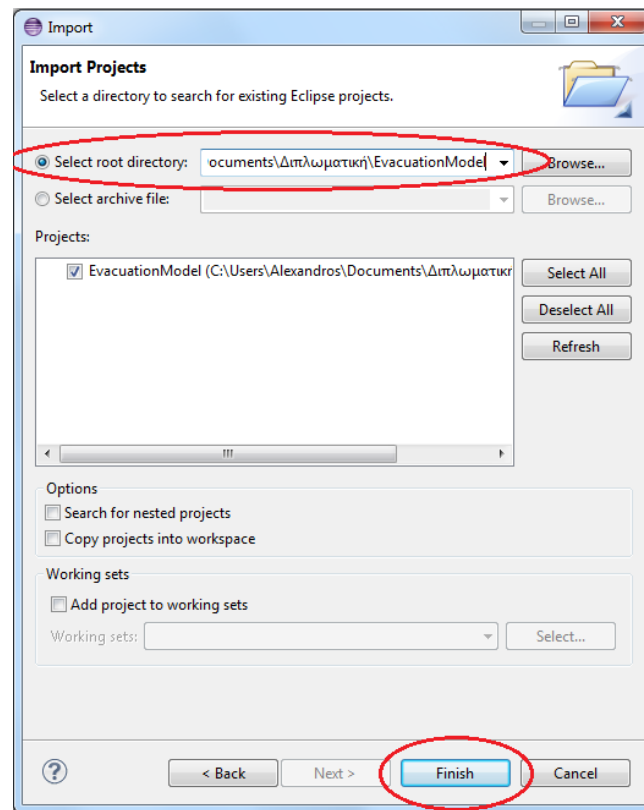
Δημιουργία εκτελέσιμου αρχείου προσομοιωτή

Κάθε πρόγραμμα που έχει αναπτυχθεί με γλώσσα Java, εκτελείται μέσω ενός ειδικά διαμορφωμένου εκτελέσιμου αρχείου μορφής .jar (Java Archive). Προκειμένου να δημιουργήσουμε το εκτελέσιμο αρχείο, θα πρέπει πρώτα να εισάγουμε τον κώδικα του μοντέλου στο Eclipse. Αυτό γίνεται με την ακόλουθη διαδικασία:

- 1) Ανοίγουμε το πρόγραμμα Eclipse.
- 2) Στην άνω μπάρα πατάμε κατά σειρά: File > Import.
- 3) Στον πίνακα που μας εμφανίζει το πρόγραμμα, επιλέγουμε από τον φάκελο General το Existing Projects into Workspace και πατάμε Next (εικόνα B-1).
- 4) Στον νέο πίνακα που μας εμφανίζει το πρόγραμμα, πατάμε την επιλογή Select root directory, εισάγουμε στο διπλανό πεδίο την διαδρομή του φακέλου όπου βρίσκεται ο κώδικας του μοντέλου (εικόνα B-2), πατάμε Next και ακολούθως Finish.
- 5) Το μοντέλο έχει εισαχθεί επιτυχώς στο Eclipse.



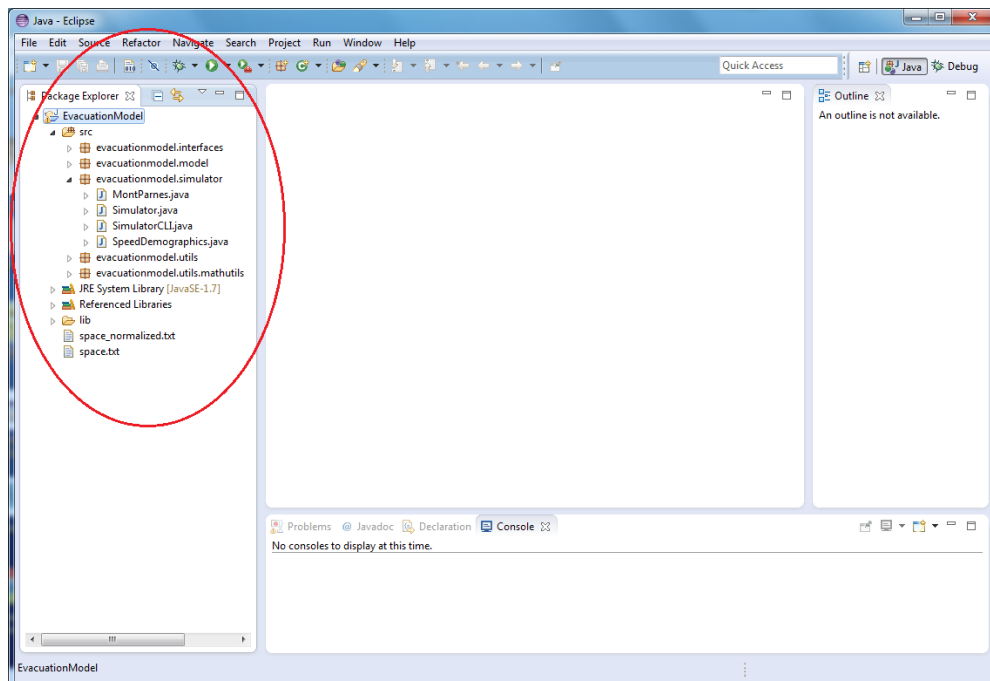
Εικόνα B-1



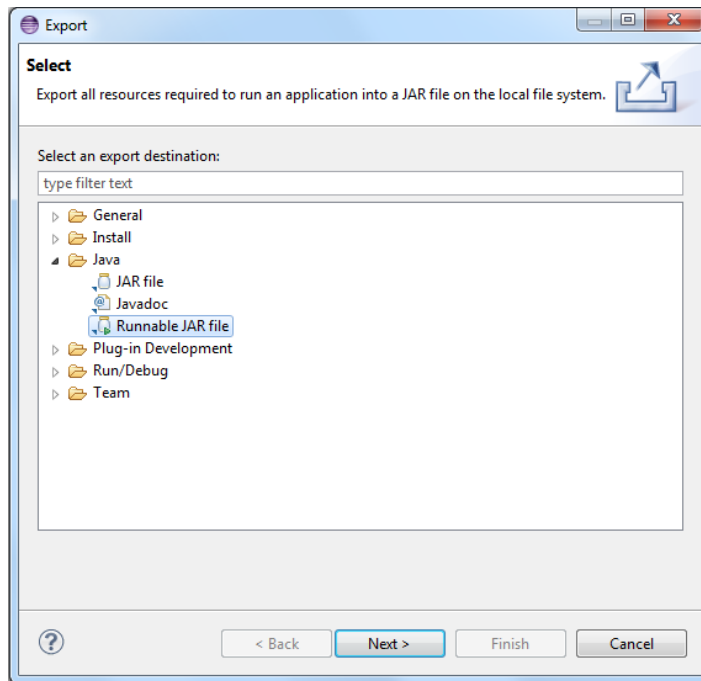
Εικόνα B-2

Αφού έχουμε εισαγάγει τον κώδικα στο Eclipse, προχωρούμε στην δημιουργία του εκτελέσιμου αρχείου:

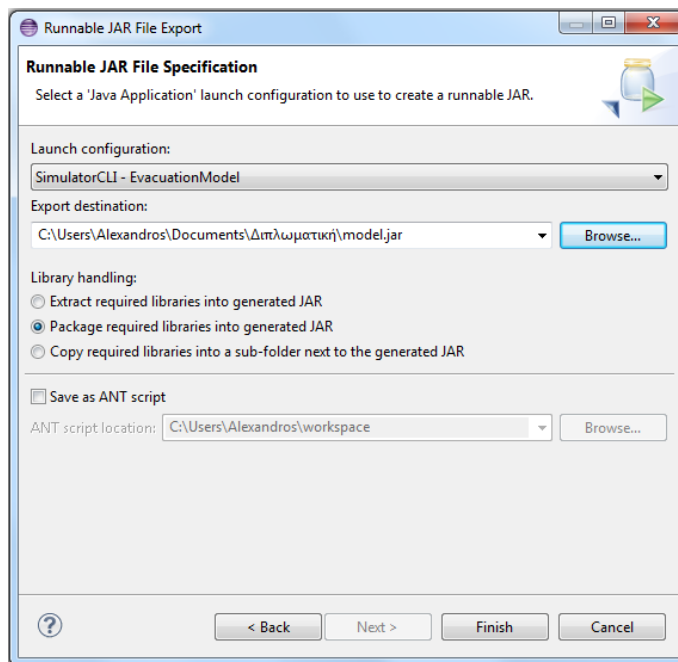
- 1) Στην αριστερή μπάρα με την ονομασία Package Explorer, ανοίγουμε κατά σειρά: EvacuationModel > src > evacuationmodel.simulator (εικόνα B-3).
- 2) Εντοπίζουμε το αρχείο SimulatorCLI.java, πατάμε πάνω του με δεξί κλικ και ακολούθως επιλέγουμε Run As > Java Application. Εδώ είναι πιθανό να μας εμφανίσει ένα μήνυμα λάθους, οπότε πατάμε OK.
- 3) Επιστρέφουμε στον Package Explorer, πατάμε με δεξί κλικ τον φάκελο EvacuationModel και επιλέγουμε Export.
- 4) Στον πίνακα που εμφανίζεται επιλέγουμε το Runnable JAR File και πατάμε Next (εικόνα B-4).
- 5) Στον νέο πίνακα (εικόνα B-5), κάνουμε τις εξής επιλογές:
 - Στο πεδίο Launch configuration επιλέγουμε το Simulator CLI – EvacuationModel
 - Στο πεδίο Export destination βάζουμε την διαδρομή του φακέλου όπου θέλουμε να αποθηκεύσουμε το εκτελέσιμο αρχείο καθώς και το όνομά του – ΠΡΟΣΟΧΗ! το όνομα του εκτελέσιμου αρχείου πρέπει να είναι με λατινικούς χαρακτήρες
 - Κάτω από το Export destination, της δίνει τρεις επιλογές. Εκεί πατάμε δεξί κλικ στην επιλογή Package required libraries into generated JAR
 - Πατάμε Finish και το Eclipse δημιουργεί το εκτελέσιμο αρχείο .jar



Εικόνα B-3



Εικόνα B-4



Εικόνα B-5

Δομή αρχείων εισαγωγής χώρου και στοιχείων πυρκαγιάς

Αφού δημιουργήσουμε το εκτελέσιμο αρχείο JAR, είμαστε έτοιμοι να εκτελέσουμε προσομοιώσεις του μοντέλου. Για την εκτέλεση της σεναρίου χρειαζόμαστε τα ακόλουθα αρχεία:

- Το αρχείο .txt με το οποίο εισάγουμε τον υπο διερεύνηση χώρο.
- Το αρχείο .xlsx με τα δεδομένα πυρκαγιάς που έχουμε εξάγει μέσω του μοντέλου CFAST.

1) Αρχείο εισαγωγής χώρου

Στο αρχείο εισαγωγής περιλαμβάνονται στοιχεία σχετικά με τις διαστάσεις των χώρων (compartments), των πορτών (doors) καθώς και οι αποστάσεις μεταξύ αυτών.

α) Εισαγωγή διαμερισμάτων (compartments)

Τα διαμερίσματα εισάγονται με την εξής δομή:

```
C[ID,diagonal,area,type,max_initial_occupants,deck,point of fire origin, target compartment]
```

ID	: το όνομα που δίνουμε στο συγκεκριμένο διαμέρισμα
diagonal	: αν πρόκειται για απλο διαμέρισμα βάζουμε την διαγώνιό του, αν πρόκειται για διάδρομο βάζουμε το ολικό του μήκος και αν πρόκειται για κλιμακοστάσιο βάζουμε
area	: το εμβαδόν του χώρου σε τετραγωνικά μέτρα
type	: η κατηγορία στην οποία ανήκει το διαμέρισμα
max_initial_occupants	: ο μέγιστος αριθμός ατόμων που βρίσκονται αρχικά στο διαμέρισμα
deck	: το κατάστρωμα όπου βρίσκεται το διαμέρισμα
point of fire origin	: η εστία της πυρκαγιάς βρίσκεται στο διαμέρισμα – η τιμή που βάζουμε είναι 1 – ΝΑΙ, 0 – ΟΧΙ
target compartment	: το διαμέρισμα είναι ο χώρος συγκέντρωσης – η τιμή που βάζουμε είναι 1 – ΝΑΙ, 0 – ΟΧΙ

Όσον αφορά την κατηγορία του διαμερίσματος, έχουμε τις εξής επιλογές:

CABIN	: καμπίνα επιβατών
CORRIDOR	: διάδρομος
STAIRCASE	: κλιμακοστάσιο
CREW_ACCOM	: χώρος ενδιαίτησης πληρώματος
PUBLIC	: κοινόχρηστος χώρος
SERVICE	: χώρος υπηρεσίας πληρώματος
OUTSIDE	: εξωτερικός χώρος

Παράδειγμα: θέλουμε να εισάγουμε ένα διαμέρισμα της ενδιαίτησης πληρώματος με όνομα C1, το οποίο έχει εμβαδόν 10 m, διαγώνιο 7.5 m, βρίσκεται στο κατάστρωμα 3, έχει μέγιστο αρχικό αριθμό ατόμων 20 και βρίσκεται σε αυτό η εστία της πυρκαγιάς. Η γραμμή εισαγωγής του στο αρχείο του χώρου είναι η ακόλουθη:

```
C[C1,7.5,10,CREW_ACCOM,20,3,1,0]
```

Κατά την εισαγωγή των διαμερισμάτων στο αρχείο χώρου, πρέπει να προσέξουμε καταρχήν τα ονόματα των διαμερισμάτων να είναι με λατινικούς χαρακτήρες. Επίσης, ο εξωτερικός χώρος εισάγεται στο μοντέλο ως διαμέρισμα πολύ μεγάλων διαστάσεων και αυτό για να μην έχουμε πρόβλημα με την ροή στις πόρτες που οδηγούν σε αυτόν λόγω της πυκνότητας επιβατών. Τον εξωτερικό χώρο είναι προτιμότερο να του δίνουμε το όνομα COUT, έτσι ώστε το μοντέλο να τον αναγνωρίζει και να τον θεωρεί αυτόματα ως χώρο συγκέντρωσης. Παραδείγματος χάριν:

```
C[COUT,5000,5000,OUTSIDE,0,1,0,0]
```

β) Εισαγωγή πορτών

Οι πόρτες εισάγονται με την ακόλουθη μορφή:

```
D[ID,compartment1,compartment2,effective_width,ds1_base_probability,ds2_base_probability]
```

ID	: το όνομα της πόρτας
compartment1	: το συνδεδεμένο διαμέρισμα 1
compartment2	: το συνδεδεμένο διαμέρισμα 2
effective_width	: το καθαρό πλάτος της πόρτας

ds1_base_probability : η βασική πιθανότητα επιλογής της πόρτας από την πλευρά του διαμερίσματος 1 (doorside1 – ds1)

ds2_base_probability : η βασική πιθανότητα επιλογής της πόρτας από την πλευρά του διαμερίσματος 2 (doorside2 – ds2)

Παράδειγμα: θέλουμε να περάσουμε την πόρτα D1 καθαρού πλάτους 1.5 m που ενώνει τα διαμερίσματα C4 και C5. Οι πιθανότητες εκλογής είναι 0.6 από την πλευρά του διαμερίσματος C4 (ds1) και 0.3 από την πλευρά του διαμερίσματος C5 (ds2). Η γραμμή εισαγωγής στο αρχείο χώρου θα είναι:

```
D[D1,C4,C5,1.5,0.6,0.3]
```

γ) Εισαγωγή αποστάσεων

Οι αποστάσεις εισάγονται με την ακόλουθη μορφή:

```
DIS[door1,door2,distance]
```

door1 : η πόρτα 1

door2 : η πόρτα 2

distance : η απόσταση μεταξύ της πόρτας 1 και της πόρτας 2

Παράδειγμα : στο διαμέρισμα C1 βρίσκονται οι πόρτες D1, D2 και D3. Οι αποστάσεις μεταξύ των πορτών είναι 4 m μεταξύ D1 και D2, 5 m μεταξύ D1 και D3, 3 m μεταξύ D2 και D3. Οι γραμμές εισαγωγής είναι η ακόλουθες:

```
DIS[D1,D2,4]
```

```
DIS[D1,D3,5]
```

```
DIS[D2,D3,3]
```

2) Αρχείο δεδομένων πυρκαγιάς από το πρόγραμμα CFAST

Το πρόγραμμα CFAST που χρησιμοποιούμε για την εξαγωγή δεδομένων σχετικά με την πυρκαγιά, δημιουργεί μια σειρά από αρχεία μορφής .csv (Microsoft Excel Comma Separated Values) στα οποία και περνάει τα δεδομένα αυτά για κάθε διαμέρισμα και σε κάθε χρονικό βήμα. Από τα παράγωγα αρχεία του CFAST εμάς μας ενδιαφέρουν το αρχείο με κατάληξη “s”, που περιλαμβάνει τα στοιχεία σχετικά με τα επίπεδα καπνού και τις συγκεντρώσεις των διαφόρων αερίων, και το αρχείο με κατάληξη “n” που περιλαμβάνει τις θερμοκρασίες.

Για να δημιουργήσουμε το αρχείο .xlsx που θα εισάγουμε στον προσομοιωτή, ακολουθούμε τα εξής βήματα:

- 1) Εισάγουμε τα δεδομένα από το αρχείο των επιπέδων καπνού και αερίων στο πρώτο υπολογιστικό φύλλο.
- 2) Όπως έχουμε ξαναπεί, το μοντέλο αναπαριστά τον εξωτερικό χώρο ως διαμέρισμα. Έτσι, δημιουργούμε στο υπολογιστικό φύλλο καταγραφές για τον εξωτερικό χώρο, με την ονομασία που του έχουμε δώσει στο αρχείο χώρου.
- 3) Μετονομάζουμε το υπολογιστικό φύλλο ως “OD and Gases”, ώστε να το αναγνωρίσει ο προσομοιωτής.
- 4) Εισάγουμε τα δεδομένα από το αρχείο των θερμοκρασιών στο δεύτερο υπολογιστικό φύλλο και ακολουθούμε την ίδια διαδικασία όπως και στο πρώτο υπολογιστικό φύλλο.
- 5) Μετονομάζουμε το υπολογιστικό φύλλο ως “Temperatures”.

Θα πρέπει εδώ να τονίσουμε ότι κατά την κατασκευή του χώρου στο CFAST, τα διάφορα διαμερίσματα (compartments) θα πρέπει να έχουν το ίδιο όνομα (ID) με το αρχείο εισαγωγής του χώρου.

3) Εκτέλεση εξομοιωτή μοντέλου διαφυγής

Αφού δημιουργήσουμε το εκτελέσιμο αρχείο του προσομοιωτή και τα αρχεία εισαγωγής χώρου και δεδομένων πυρκαγιάς, είμαστε έτοιμοι να προχωρήσουμε στην εκτέλεση της προσομοίωσης.

Αρχικά, ανοίγουμε ένα παράθυρο γραμμής εντολών (terminal) και κατευθυνόμαστε στον φάκελο όπου έχουμε αποθηκεύσει το εκτελέσιμο αρχείο JAR του προσομοιωτή, καθώς και τα αρχεία εισαγωγής των δεδομένων. Η γενική εντολή εκτέλεσης του προσομοιωτή είναι της μορφής:

java -jar [όνομα εκτελέσιμου αρχείου].jar

ακολουθούμενο από τις επιλογές σχετικά με το σενάριο που θα δούμε παρακάτω.

Εκτελώντας την παραπάνω εντολή, χωρίς να βάλουμε επιλογές σεναρίου, μας εμφανίζει το υπόμνημα του προσομοιωτή όπου περιλαμβάνεται η λίστα των δυνατών επιλογών και μια μικρή επεξήγηση αυτών. Οι επιλογές συνοψίζονται στον επόμενο πίνακα:

Εντολές εισαγωγής στοιχείων σεναρίου στον προσομοιωτή	
Επιλογή	Επεξήγηση
-d	Σενάριο ημέρας
-n	Σενάριο νύχτας
-s	Τύπος πλοίου. Ακολουθείται από δυο επιλογές: RO_PAX ή CRUISE
-t	Συνολικά χρονικά βήματα της προσομοίωσης. Ακολουθείται από τον χρόνο σε [sec]
-p	Μέγιστο πλήθος επιβατών. Ακολουθείται από τον αριθμό.
-c	Μέγιστο πλήθος μελών πληρώματος. Ακολουθείται από τον αριθμό.
-i	Το επι τις εκατό ποσοστό των επιβατών που βρίσκονται υπο την επήρεια πανικού. Ακολουθείται από το ποσοστό αυτό.
-a	Διαδρομή αρχείου χώρου. Ακολουθείται από τη διαδρομή.
-f	Διαδρομή αρχείου δεδομένων πυρκαγιάς. Ακολουθείται από τη διαδρομή.

Παράδειγμα: Θέλουμε να εκτελέσουμε ένα σενάριο νύκτας σε κρουαζιερόπλοιο. Στο σενάριο αυτό έχουμε 20 άτομα πλήρωμα και 120 επιβάτες, εκ των οποίων το 5% βρίσκεται σε κατάσταση πανικού. Ο προσομοιωτής θα εκτελέσει 3600 χρονικά βήματα (δηλαδή 3600 sec ή μια ώρα) και τα αρχεία εκτέλεσης, χώρου και πυρκαγιάς ονομάζονται model.jar, space.txt και fire.xlsx αντίστοιχα. Η εντολή εκτέλεσης του προσομοιωτή θα είναι:

```
java -jar model.jar -n -s CRUISE -t 3600 -p 120 -c 20 -i 5 -a space.txt -f fire.xlsx
```

Σημείωση: Η μορφή των αποτελεσμάτων του προγράμματος CFAST (αρχείο .xlsx με δεκάδες καταγραφές διαφόρων παραγόντων σε κάθε χρονικό βήμα για κάθε διαμέρισμα) απαιτεί μεγάλη φυσική μνήμη (physical memory – RAM). Σε συστήματα με περιορισμένες δυνατότητες είναι καλό να θέτουμε κατώτερα και ανώτερα όρια σχετικά με την δέσμευση της φυσικής μνήμης από τον προσομοιωτή. Αυτό γίνεται με τις εντολές -Xms και -Xmx αντίστοιχα. Για παράδειγμα, αν θέλουμε να δεσμεύσουμε μνήμη μεταξύ 1500 MB και 2000 MB, η ανωτέρω εντολή γράφεται ως εξής:

```
Java -Xms1500m -Xmx2000m -jar model.jar -n -s CRUISE -t 3600 -p 120 -c 20 -i 5 -a space.txt -f fire.xlsx
```

4) Παραγόμενα αποτελέσματα

Μετά την επιτυχή εκτέλεση του προσομοιωτή, το μοντέλο αποθηκεύει τα αποτελέσματα σε δυο αρχεία: ένα αρχείο μορφής .txt με την ονομασία person_tracker και ένα αρχείο μορφής .xlsx με την ονομασία simulation_results.

Στο αρχείο person_tracker περιλαμβάνονται τα χαρακτηριστικά των επιβατών (ID, κατηγορία, εάν είναι υπο καθεστώς πανικού ή όχι), η αρχική θέση τους στο χώρο και η διαδρομή τους έως ότου σταματήσουν να λαμβάνουν μέρος στην προσομοίωση. Η μορφή των καταγραφών είναι η ακόλουθη:

[ID επιβάτη] [κατηγορία] [χρόνος έναρξης διαφυγής] [διαδρομή με καταγραφές χρησιμοποιούμενων πορτών και χρόνων εισόδου σε κάθε διαμέρισμα] [χρόνος διαφυγής ή απώλειας αισθήσεων]

Το αρχείο .xlsx με την ονομασία simulation_results περιέχει τρία υπολογιστικά φύλλα:

- Στο πρώτο φύλλο που ονομάζεται Evacuation-Casualties Evolution υπάρχουν οι καταγραφές για τον συνολικό αριθμό των ατόμων που είτε έχουν διαφύγει είτε έχουν χαρακτηριστεί ως απώλεια μέχρι και το κάθε time step.
- Στο δεύτερο φύλλο που ονομάζεται Occupant Density Evolution περιλαμβάνονται οι καταγραφές για την πυκνότητα επιβατών σε κάθε διαμέρισμα για κάθε χρονικό βήμα.
- Στο τρίτο φύλλο με την ονομασία Door Flow Evolution βρίσκονται οι καταγραφές για την ροή (flow) επιβατών από κάθε πλευρά πόρτας (doorside) σε κάθε χρονικό βήμα. Σημειώνεται ότι ο προσομοιωτής δημιουργεί τις πλευρές των πορτών με βάση την σειρά που έχουμε βάλει τα συνδεδεμένα διαμερίσματα κατά την δήλωση της πόρτας στο αρχείο χώρου. Για παράδειγμα, αν πούμε ότι η D1 συνδέει τα διαμερίσματα C6 και C4, τότε η D1a είναι από την πλευρά του C6 και η D1b από την πλευρά του C4.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

ΟΔΗΓΙΕΣ ΧΡΗΣΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ CFAST

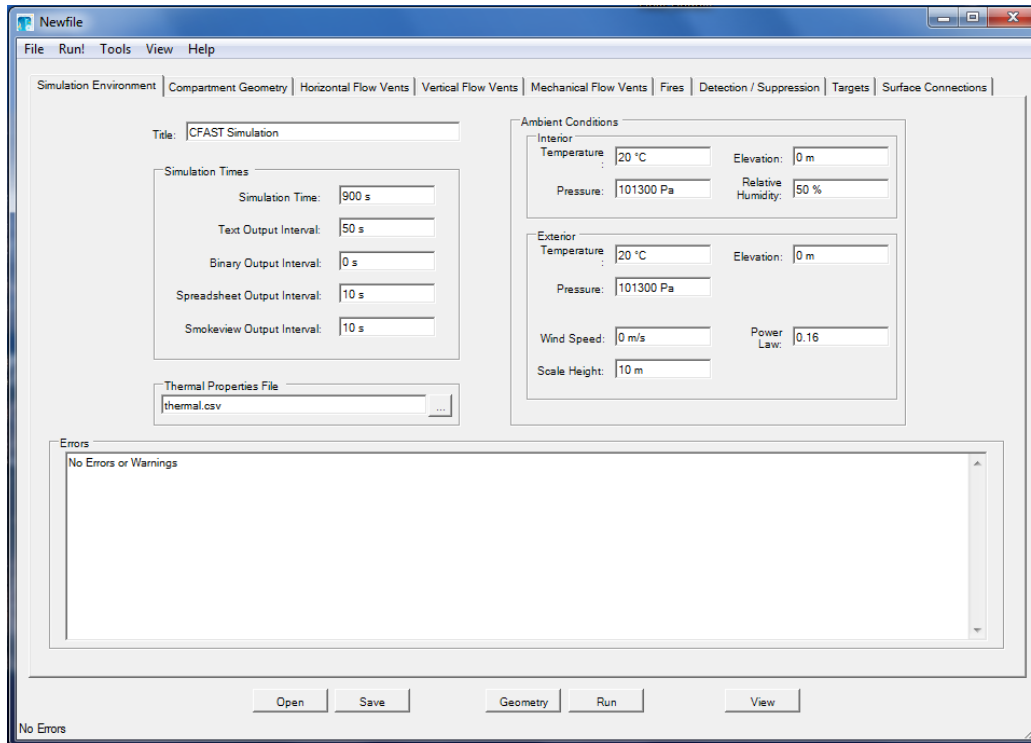
Στο κεφάλαιο 5 αναφέραμε ότι για την εξαγωγή των απαιτούμενων στοιχείων σχετικά με την πυρκαγιά χρησιμοποιήσαμε το μοντέλο CFAST. Το CFAST έχει αναπτυχθεί από το ερευνητικό ίδρυμα NIST (National Institute of Standards and Technology) των Ηνωμένων Πολιτειών και παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1990. Η εξέλιξή του συνεχίζεται μέχρι και σήμερα, με την τρέχουσα να είναι η 6^η του έκδοση. Το μοντέλο CFAST διατίθεται ελεύθερα από την ακόλουθη ιστοσελίδα: http://www.nist.gov/el/fire_research/cfast.cfm

1) Εισαγωγή γενικών δεδομένων σεναρίου

Αφού έχουμε εγκαταστήσει το CFAST, ανοίγουμε το εκτελέσιμο αρχείο *CEdit.exe* . Το πρόγραμμα μας εμφανίζει ένα παράθυρο με 9 φύλλα, στο οποίο και θα εισάγουμε τα δεδομένα του σεναρίου που θέλουμε να προσομοιώσουμε.

Στο πρώτο φύλλο με την ονομασία *Simulation Environment* (εικόνα Γ-1), εισάγουμε τα εξής:

- Το όνομα του σεναρίου που θέλουμε να προσομοιώσουμε.
- Τον συνολικό χρόνο προσομοίωσης (simulation time)
- Τα χρονικά βήματα που θα περάσει το πρόγραμμα στα αρχεία αποτελεσμάτων (text output interval, binary output interval, spreadsheet output interval) καθώς και στον γραφικό προσομοιωτή που το συνοδεύει (Smokeview).
- Τις περιβαλλοντικές συνθήκες εντός του χώρου (θερμοκρασία σε °C, υψόμετρο, ατμοσφαιρική πίεση σε pascal και σχετική υγρασία).
- Τις περιβαλλοντικές συνθήκες εκτός του χώρου (θερμοκρασία, υψόμετρο, πίεση, ταχύτητα ανέμου κλπ.)



Εικόνα Γ-1

2) Εισαγωγή χώρου

α) Εισαγωγή διαμερισμάτων

Αφού εισάγουμε τα γενικά δεδομένα του σεναρίου, προχωρούμε στο επόμενο φύλλο με την ονομασία *Compartment Geometry*. Εδώ εισάγουμε τα εξής χαρακτηριστικά των διαμερισμάτων (compartments):

- Το όνομα του διαμερίσματος.
- Τις διαστάσεις του, δηλαδή το μήκος (width), το πλάτος (depth) και το ύψος του.
- Την θέση του ως προς το σημείο αναφοράς του χώρου.
- Τα υλικά κατασκευής των τοίχων, του πατώματος και της οροφής του. Εδώ μας δίνει μια πληθώρα από κατασκευαστικά υλικά, μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονται και το αλουμίνιο, ο χάλυβας και το ξύλο σε διάφορους τύπους και πάχη.
- Τον τύπο του διαμερίσματος. Εδώ δίνονται τρεις επιλογές: κανονικό (normal) οπότε και λογίζεται ως διζωνικός χώρος, διάδρομος (corridor) όπου πάλι λογίζεται ως διζωνικός χώρος, αλλά με καθυστερημένη ροή, και φρεάτιο (shaft) που μοντελοποιείται με μια ενιαία ζώνη.

β) Εισαγωγή πορτών

Για να εισάγουμε τις πόρτες που συνδέουν τα διάφορα διαμερίσματα, πάμε στο τρίτο φύλλο με την ονομασία *Horizontal Flow Vents*. Εδώ ουσιαστικά εισάγουμε όλα τα ανοίγματα που επιτρέπουν την οριζόντια ροή. Για την δημιουργία ενός τέτοιου ανοίγματος, πρέπει να ορίσουμε τα εξής:

- Τα δυο διαμερίσματα που συνδέει το συγκεκριμένο άνοιγμα.
- Την θέση του κέντρου του ανοίγματος από το σημείο αναφοράς του κάθε διαμερίσματος.
- Την πλευρά του πρώτου διαμερίσματος στην οποία βρίσκεται το συγκεκριμένο άνοιγμα (πρόσοψη, πίσω πλευρά, δεξιά πλευρά, αριστερή πλευρά)
- Την απόσταση της κάτω πλευράς του ανοίγματος από το πάτωμα (sill) και την οροφή (soffit) του πρώτου διαμερίσματος, καθώς και το πλάτος του ανοίγματος (width).
- Την αρχική κατάσταση του ανοίγματος (initial opening fraction), την τελική του κατάσταση (final opening fraction) και την χρονική στιγμή κατά την οποία μεταβαίνει από τη μια κατάσταση στην άλλη. Με αυτό τον τρόπο μας επιτρέπει ουσιαστικά να ορίσουμε π.χ. την πόρτα κλειστή και τη χρονική στιγμή κατά την οποία ανοίγει.

Προσοχή: Κατά την εισαγωγή των ανοιγμάτων, θα πρέπει να προσέξουμε ώστε το διαμέρισμα 1 (compartment 1) να είναι αυτό με τον μικρότερο αριθμό στην λίστα των εισηγμένων διαμερισμάτων. Παραδείγματος χάριν, αν θέλουμε να συνδέσουμε το διαμέρισμα C10 με τον διάδρομο CORR1 και τον διάδρομο τον έχουμε περάσει στο μοντέλο πριν το διαμέρισμα C10, τότε ως διαμέρισμα 1 λαμβάνουμε τον διάδρομο. Σε αντίθετη περίπτωση παρατηρήσαμε ότι το μοντέλο δεν τοποθετεί το άνοιγμα στο σημείο που του έχουμε ορίσει, παρότι αυτό δεν αναφέρεται στις οδηγίες χρήσης που μας παρέχει το NIST.

γ) Εισαγωγή κατακόρυφων ανοιγμάτων

Με παρόμοιο τρόπο εισάγονται και τα κατακόρυφα ανοίγματα στο επόμενο φύλλο με την ονομασία *Vertical Flow Vents*. Η διαφορά εδώ είναι ότι δεν χρειάζεται να ορίσουμε την ακριβή θέση του ανοίγματος, καθώς το πρόγραμμα θεωρεί ότι το κέντρο του ανοίγματος βρίσκεται στο μέσον του ανώτερου από τα δυο διαμερίσματα. Ο χρήστης ορίζει μόνο το σχήμα του (κυκλικό ή ορθογώνιο), το εμβαδόν του, την αρχική και τελική κατάσταση, καθώς και το χρονικό σημείο της αλλαγής.

δ) Εισαγωγή ανοιγμάτων με υποβοηθούμενη ροή

Στο φύλλο με την ονομασία *Mechanical Flow Vents* εισάγουμε τα ανοίγματα όπου η ροή υποβοηθείται μηχανικά (π.χ. αυτόνομα συστήματα εξαερισμού). Εδώ εισάγουμε την γεωμετρία των ανοιγμάτων με τον ίδιο τρόπο όπως και στην προηγούμενη περίπτωση. Εκτός, από τη γεωμετρία, εισάγουμε και τα χαρακτηριστικά της μηχανολογικής εγκατάστασης που χρησιμοποιείται, δηλαδή:

- Ρυθμός ροής σε m^3/sec .
- Κατώτερο σημείο πίεσης για εκκίνηση της εγκατάστασης.
- Ανώτερο σημείο πίεσης για παύση της εγκατάστασης.
- Βαθμός απόδοσης φίλτρων.
- Χρονικό σημείο έναρξης λειτουργίας των φίλτρων.

3) Εισαγωγή πυρκαγιάς

Αφού ολοκληρώσουμε την εισαγωγή του χώρου, προχωρούμε στην κατασκευή της πυρκαγιάς, τα χαρακτηριστικά της οποίας εισάγουμε στο φύλλο *Fires* (εικόνα Γ-2). Εδώ έχουμε δυο επιλογές: είτε την χρήση διαφόρων αντικειμένων (π.χ. κρεβάτια, καρέκλες, κουρτίνες) τα χαρακτηριστικά καύσης των οποίων είναι ήδη εισηγμένα στο πρόγραμμα, είτε να κατασκευάσουμε μια δική μας πυρκαγιά, εισάγοντας την καμπύλη έκλυσης θερμότητας (Heat Release Rate – HRR) και τα παραγόμενα αέρια σε κάθε χρονικό σημείο. Έχοντας επιλέξει τα αντικείμενα ή κατασκευάσει την δική μας πυρκαγιά, πρέπει να ορίσουμε τα εξής:

- Το διαμέρισμα ή τα διαμερίσματα στα οποία βρίσκονται οι εστίες της πυρκαγιάς.
- Την θέση τους ως προς το σημείο αναφοράς του συγκεκριμένου διαμερίσματος
- Το κριτήριο έναυσης. Εδώ μας δίνει τρεις επιλογές: χρονικό σημείο, θερμοκρασία και απορροφούμενη θερμότητα (heat flux).
- Την μεθοδολογία υπολογισμού του ύψους και της θερμοκρασίας της φλόγας. Εδώ μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε είτε τους τύπους του McCaffrey, είτε τους τύπους του Heskestad. (McCaffrey, 1979) (Heskestad, 1984)

4) Εισαγωγή συστημάτων αυτόματου εντοπισμού και κατάσβεσης

Το μοντέλο CFAST μας παρέχει επιπλέον την δυνατότητα να τοποθετήσουμε αυτόματα συστήματα κατάσβεσης (sprinklers) και εντοπισμού (smoke alarm, heat alarm). Αυτό γίνεται στο φύλλο *Detection/Suppression*. Εκεί τοποθετούμε τα εξής στοιχεία:

- Το διαμέρισμα στο οποίο βρίσκεται το στοιχείο.
- Την θέση του στοιχείου ως προς το σημείο αναφοράς του διαμερίσματος.
- Την θερμοκρασία ενεργοποίησης του ανυχνευτή ή του ψεκαστήρα.
- Την πυκνότητα του εκλυόμενου υγρού από τον ψεκαστήρα (spray density).

Σημειώνεται ότι στην περίπτωση όπου δεν έχουμε περάσει συστήματα εντοπισμού, οι ψεκαστήρες λειτουργούν αυτόνομα (ενεργοποιούνται όταν η θερμοκρασία εντός του διαμερίσματος ξεπεράσει την κρίσιμη τιμή), ενώ στην περίπτωση που έχουμε περάσει τέτοια στοιχεία, ενεργοποιούνται όλοι μαζί όταν η συγκέντρωση του καπνού ή η θερμοκρασία ξεπεράσει την κρίσιμη τιμή σε κάποιο από τα διαμερίσματα όπου βρίσκονται οι ανιχνευτές.

5) Εκτέλεση της προσομοίωσης

Αφού ολοκληρώσουμε τις ενέργειες που περιγράψαμε στις προηγούμενες σελίδες, προχωρούμε στην εκτέλεση της προσομοίωσης. Τα βήματα που ακολουθούμε είναι τα εξής:

- Αποθηκεύουμε το σενάριο, πατώντας το κουμπί Save που βρίσκεται στην κάτω πλευρά του κεντρικού παραθύρου του προγράμματος.
- Εισάγουμε τον χώρο στον προσομοιωτή, πατώντας το κουμπί Geometry που βρίσκεται ακριβώς δίπλα από το κουμπί Save.
- Εκτελούμε την προσομοίωση πατώντας το κουμπί Run. Το πρόγραμμα ανοίγει ένα καινούριο παράθυρο, όπου εμφανίζει σε πραγματικό χρόνο τα αποτελέσματα των υπολογισμών του για κάθε διαμέρισμα (εικόνα Γ-3). Όταν τελειώσει τους υπολογισμούς, εμφανίζει στην άνω αριστερή γωνία του παραθύρου το μήνυμα "CFAST finished".

RunModel

Current Time Step: CFAST finished Simulation Time: 6000 s Progress: [Progress Bar]

Compartment	Upper Layer Temperature (°C)	Lower Layer Temperature (°C)	Interface Height (m)	Pyrolysis Rate (kg/s)	Fire Size (kW)	Pressure (Pa)	Ambient Target Flux (kW/m ²)
1	21.8	20.3	2.5	0	0	-0.156	0.007
2	27.7	21.4	1.8	0	0	-0.24	0.024
3	20.6	22.8	1.9	0	0	-0.325	0.012
4	52.8	24	2.1	0	0.06	-0.373	0.071
5	20.6	22.7	1.9	0	0	-0.324	0.012
6	105.1	37.6	1.7	0.00248	46.94	-0.887	0.515
7	20.9	20.3	0	0	0	-0.222	0.004
8	22.2	21.1	0.71	0	0	-0.248	0.011
9	20.9	20.3	0	0	0	-0.222	0.004
10	27.3	22.2	1.7	0	0	-0.298	0.027
11	22.9	21.6	1.9	0	0	-0.279	0.014
12	20.4	20.1	0.84	0	0	-0.0261	0.002
13	20.3	20.1	0	0	0	-0.02	0.002
14	20	20	0	0	0	-0.01	0
15	20	20	0	0	0	-0.0104	0
16	21.3	20.5	0	0	0	-0.0409	0.008
17	20.4	20.2	0	0	0	-0.0051	0.003
18	20.4	20.2	0	0	0	-0.0051	0.003

Buttons: Close, Stop, Update

RunOptions: Net Heat Flux Output

Εικόνα Γ-3

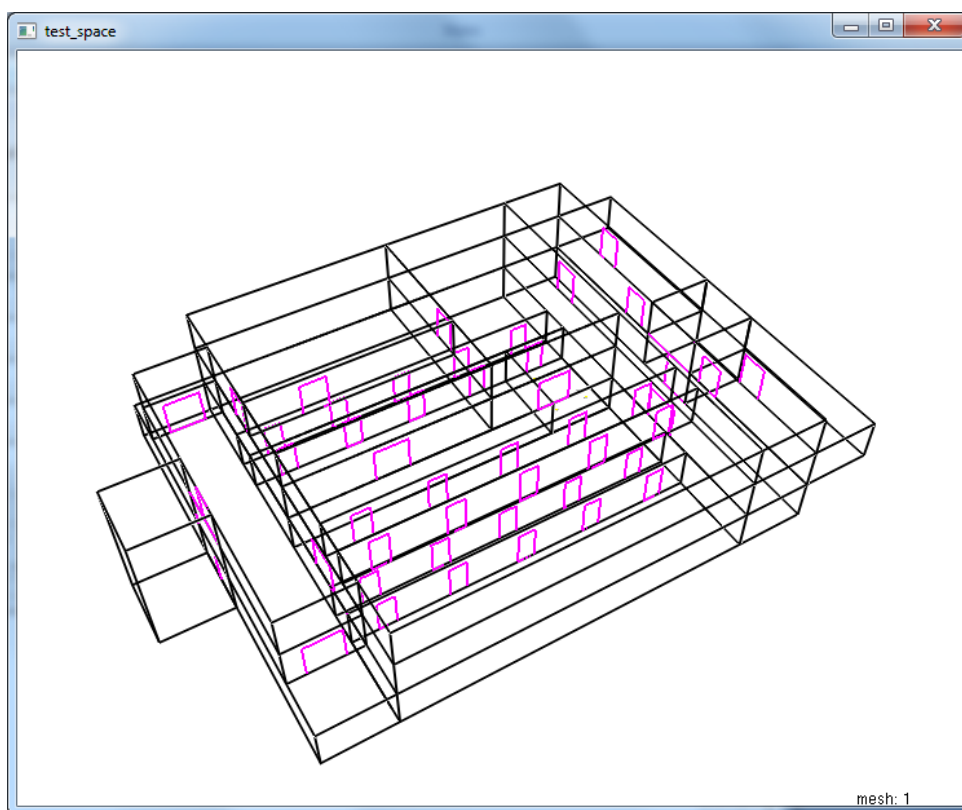
6) Παραγόμενα αποτελέσματα

Μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, το πρόγραμμα CFAST αποθηκεύει τα δεδομένα στο αρχείο όπου έχουμε αποθηκεύσει και το αρχείο του σεναρίου. Τα αρχεία των αποτελεσμάτων είναι μορφής .csv (Comma Separated Values) και για την παραιτέρω επεξεργασία και ανάλυσή τους πρέπει να εισαχθούν υπολογιστικό φύλλο του Microsoft Excel. Τα αρχεία που δημιουργούνται είναι τα ακόλουθα:

- Αρχείο με κατάληξη “f”: περιλαμβάνει την ροή αερίων μέσω των διαφόρων ανοιγμάτων, σε κάθε χρονικό βήμα.
- Αρχείο με κατάληξη “n”: περιλαμβάνει τις θερμοκρασίες των ανώτερων και κατώτερων ζωνών του διαμερίσματος καθώς και τις εκπομπές θερμότητας και ενέργειας των φλεγόμενων αντικειμένων, σε κάθε χρονικό βήμα.
- Αρχείο με κατάληξη “s”: περιλαμβάνει τα επίπεδα καπνού και παραγόμενων αερίων, σε κάθε χρονικό βήμα.
- Αρχείο με κατάληξη “w”: περιλαμβάνει τις θερμοκρασίες των διαχωριστικών των διαμερισμάτων, σε κάθε χρονικό βήμα.

7) Τρισδιάστατη αναπαράσταση χώρου και αποτελεσμάτων

Το πρόγραμμα CFAST συνοδεύεται από το υποπρόγραμμα *Smokeview*, μέσω του οποίου είναι δυνατή η τρισδιάστατη αναπαράσταση του χώρου καθώς και η εμφάνιση των επιπέδων καπνού και θερμοκρασιών, καθώς και των ρών ενέργειας και αερίων σε κάθε χρονικό βήμα. Το *Smokeview* μας βοηθά επίσης να ελέγχουμε την ορθή τοποθέτηση των διαφόρων στοιχείων κατά τη διαδικασία κατασκευής του χώρου. Για να ανοίξουμε το *Smokeview*, πατάμε το κουμπί View που βρίσκεται στην κάτω δεξιά γωνία του κεντρικού παραθύρου του προγράμματος. Αν έχουμε ακολουθήσει σωστά τα προηγούμενα βήματα (Save και ακολούθως Geometry), το πρόγραμμα ανοίγει ένα καινούριο παράθυρο όπου εμφανίζεται τρισδιάστατα ο χώρος (εικόνα Γ-4).



Εικόνα Γ-4

Για να εισάγουμε τα αποτελέσματα του σεναρίου στο *Smokeview*, πατάμε δεξί κλικ επάνω στην εικόνα και ακολούθως: Load/Unload > Zone fire file > όνομα του σεναρίου. Μέσω του ίδιου μενού μπορούμε να επιλέξουμε την ταχύτητα των frames καθώς και τα στοιχεία που θα παρουσιάζονται στην εικόνα, όπως ροές, επίπεδα καπνού και θερμοκρασίες.