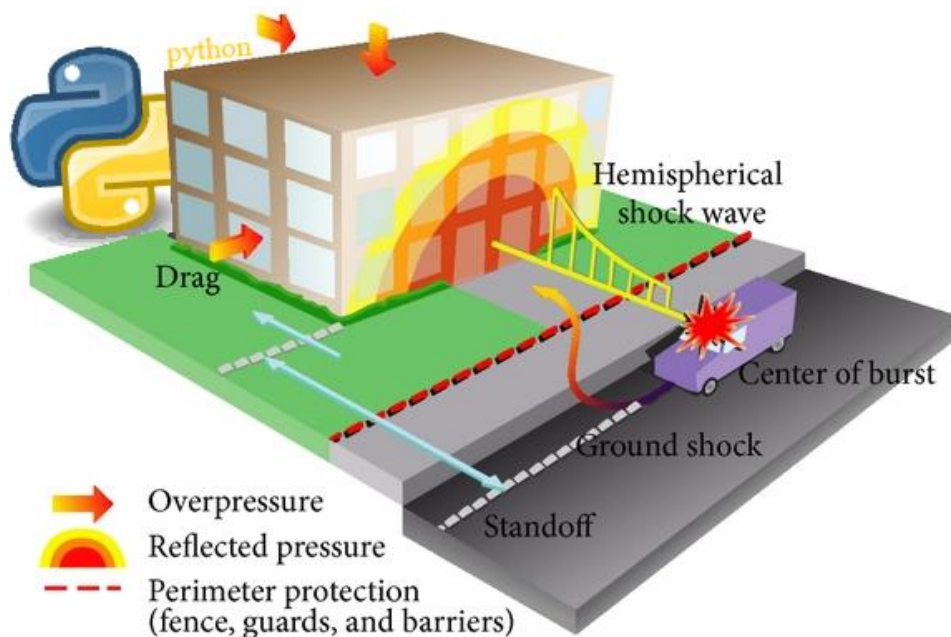




Ανάπτυξη λογισμικού απλοποιημένης αποτίμησης μεταλλικής κατασκευής υπό φορτία εξωτερικών εκρήξεων



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Β. Ρηγούτσος

Επιβλέπων: Βαμβάτσικος Δημήτριος

Αθήνα, Φεβρουάριος 2021

EMK ME 2021/02

Ρηγούτσος Γ. Β. (2021)

Ανάπτυξη λογισμικού απλοποιημένης αποτίμησης μεταλλικής κατασκευής υπό φορτία εξωτερικών εκρήξεων

Μεταπτυχιακή Εργασία ΕΜΚ ΜΕ 2021/02

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Rigoutsos G. V. (2021)

Software development for the simplified assessment of steel structures under external blast loads

MSc Thesis ΕΜΚ ΜΕ 2021/02

Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Copyright © Ρηγούτσος Β. Γεώργιος, 2021 Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του συγγραφέα. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της μεταπτυχιακής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Rigoutsos V. Georgios, 2021 All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this postgraduate thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this postgraduate thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	3
Abstract	4
Ευχαριστίες	5
1 Εισαγωγή	6
1.1 Γενικά	6
1.2 Εκρήξεις στην Ελλάδα	7
1.3 Βιομηχανικά Ατυχήματα Μεγάλης Έκτασης (B.A.M.E.)	8
1.4 Τρομοκρατικές επιθέσεις	9
1.5 Ελεγχόμενες κατεδαφίσεις με χρήση εκρηκτικών	12
1.6 Αβεβαιότητες και υποθέσεις	14
1.7 Διάρθρωση εργασίας	14
2 Εκρηκτικές ύλες	15
2.1 Κατηγοριοποίηση εκρήξεων	15
2.2 Ιδιότητες εκρηκτικών υλών	15
2.2.1 Διέγερση εκρηκτικής ύλης-γέμισμα	16
2.2.2 Ταχύτητα έκρηξης	16
2.2.3 Ισχύς έκρηξης	17
2.2.4 Ισοδυναμία TNT	17
2.2.5 Ποιότητα παραγόμενων αερίων	19
2.2.6 Αντίσταση στο νερό	19
2.3 Λειτουργία της έκρηξης (χημικής) εκρηκτικής ύλης	19
2.4 Κατηγοριοποίηση εκρηκτικών υλών	20
3 Φυσική των εκρήξεων	22
3.1 Έκρηξη συμπυκνωμένης φάσης	22
3.2 Έκρηξη νέφους αερίων	25
3.3 Διαφορές έκρηξης συμπυκνωμένης φάσης και έκρηξης νέφους αερίων	26
3.4 Χαρακτηριστικά εκρηκτικού κύματος	26
3.5 Έκρηξη με περιορισμένες συνθήκες	38
3.6 Ζημιές του κτιρίου	41
4 Περιγραφή του μεταλλικού κτιρίου	46
4.1 Γενικά	46
4.2 Διατομές και γεωμετρικά χαρακτηριστικά	49
4.3 Περιγραφή πανέλων	52
5 Διαδικασία υπολογισμού	55
5.1 Γενικά	55
5.2 Πιέσεις και ωθήσεις	55
5.3 Ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα (SDOF)	57
5.4 Συνθήκες στήριξης	60
5.4.1 Πανέλα τοίχου και οροφής	60
5.4.2 Μηκίδες και τεγίδες	64
6 Απόκριση πανέλων	66
6.1 Γενικά	66
6.2 Οριακές καταστάσεις και στάθμες βλαβών	69
6.3 Μέγιστες μετακινήσεις	71

6.4	Χρόνος άφιξης.....	76
6.5	Πιέσεις και ωθήσεις.....	77
6.6	Πιθανοτική ανάλυση επικινδυνότητας εκρήξεων (PBHA)	79
6.6.1	Καμπύλη επικινδυνότητας και ρυθμός γεγονότων.....	79
6.6.2	Συχνότητα εκρηκτικού φορτίου	80
6.6.3	Συχνότητα αποστάσεων από τον στόχο	86
6.7	Καμπύλες διακινδύνευσης.....	90
7	Συμπεράσματα.....	94
8	Βιβλιογραφία	95

Ανάπτυξη λογισμικού απλοποιημένης αποτίμησης μεταλλικής κατασκευής υπό φορτία εξωτερικών εκρήξεων

Ρηγούτσος Γ. Β. (Επιβλέπων: Βαμβάτσικος Δ.)

Περίληψη

Η πίεση που δέχεται μια κατασκευή λόγω μιας εξωτερικής έκρηξης, είναι πολύ μεγάλο μέγεθος και πολύ μικρής διάρκειας. Η κρουστική αυτή φόρτιση, υπολογίζεται, χρησιμοποιώντας χρονικές αναλύσεις. Πιο συγκεκριμένα, αναπτύσσεται λογισμικό, που δύναται να παράγει αποτελέσματα χρονικών αναλύσεων και δυναμικών αντιδράσεων για κάθε πανέλο (οροφής και τοίχου), μηκίδα και τεγίδα, μεταλλικής κατασκευής, για οποιοδήποτε σενάριο εξωτερικής έκρηξης. Τα στοιχεία που επηρεάζονται, μοντελοποιούνται ως ένα ελαστοπλαστικό δυναμικό σύστημα με έναν βαθμό ελευθερίας, ο οποίος αντιστοιχεί στη μέγιστη παραμόρφωση λόγω έκρηξης, ενώ οι πιέσεις και οι ωθήσεις υπολογίζονται χρησιμοποιώντας πολυωνμικές εξισώσεις. Η έκρηξη, πυροδοτείται από τέσσερις πιθανές κατηγορίες («άνθρωπος», «μοτοσυκλέτα», «αυτοκίνητο» και «φορτηγό»), με εκρηκτικά φορτία από 1 έως 10000kg-TNT, από 3200 διαφορετικά σημεία. Από τα αποτελέσματα, γίνεται εμφανές πως οι μετακινήσεις των στοιχείων, αυξάνονται με την αύξηση του βάρους του εκρηκτικού φορτίου, με τη μείωση της απόστασης του σημείου της έκρηξης από τον στόχο και κυρίως, όταν το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης είναι θετικό. Οι ανακλώμενες πιέσεις/ωθήσεις είναι μεγαλύτερες από τις προσπίπτουσες πιέσεις/ωθήσεις αντίστοιχα για κάθε απόσταση, και επίσης, όσο μεγαλώνει η απόσταση από τον στόχο, οι μέγιστες πιέσεις/ωθήσεις μειώνονται δραματικά. Ακολουθεί, πιθανοτική ανάλυση επικινδυνότητας των εκρήξεων και σχεδιάζεται η καμπύλη διακινδύνευσης ενός πανέλου του κτιρίου, από την οποία, για τα παραπάνω σενάρια εκρήξεων, διαπιστώνεται πως η διάτρηση του πανέλου, αντιστοιχεί σε 1250 έτη περίοδο επαναφοράς και έντονες βλάβες παρατηρούνται περίπου στα 600 έτη. Τέλος, σχεδιάζονται οι καμπύλες διακινδύνευσης για όλες τις πλευρές του κτιρίου, σύμφωνα με τις οποίες συμπεραίνεται πως η περίοδος επαναφοράς της οριακής κατάστασης αστοχίας, αυξάνεται όσο μειώνονται οι κατηγορίες που προκαλούν εκρήξεις με γωνία πρόσπτωσης του εκρηκτικού κύματος θετικού συνημιτόνου, και όσο αυτές οι κατηγορίες μπορούν να πυροδοτήσουν κυρίως εκρήξεις με μεγάλα εκρηκτικά φορτία, τα οποία φυσικά αντιστοιχούν σε μικρότερη συχνότητα εμφάνισης ή τόσο μικρά φορτία, τα οποία δεν προκαλούν αστοχίες.

MSc THESIS
EMK ME 2021/02

**Software development for the simplified assessment of steel structures
under external blast loads**

Rigoutsos G. V. (supervised by Vamvatsikos D.)

Abstract

The blast pressure on a structure due to an external explosion is typically of very high magnitude and very short duration. Such an impulsive loading, is calculated, using dynamic time-history analysis. In particular, a software is developed, able to provide time history analysis and dynamic reaction results for each panel (roof and wall), girt and purlin, of a steel structure, for every external explosion scenario. The elements that are affected, are modeled as an elastic-plastic dynamic system with a single degree of freedom, that corresponds to the maximum blast deflection. The pressures and the impulses, are calculated using polynomial equations. The explosion, can be detonated from four possible categories (“human”, “motorcycle”, “car” and “truck”), with explosive charge mass from 1 to 10000kg-TNT, from 3200 different grid points. It is clear from the results that the deflections of the elements, are increasing with the increment of the explosive charge mass, the decline of the stand-off distance and mainly, when the cosine of the angle of incidence is positive. Reflected pressures/impulses are greater than the incident pressures/impulses respectively for every stand-off distance, and also, as the stand-off distance is increasing, the maximum pressures/impulses are dramatically decreasing. Furthermore, probabilistic blast hazard analysis is carried out, where the risk curve of a panel of the structure is designed, from which, for the above scenarios of explosion, it is concluded that the failure of the panel, corresponds to 1250 years and heavy damages are observed at 600 years. Finally, the risk curves for every side of the building are designed, and it can be concluded that the period of failure is increasing, as the categories that can cause explosions with positive cosine of the angle of incidence are decreasing, and as these categories can detonate explosions with big explosive weights, which certainly correspond to smaller frequency, or small enough explosive weights, that can not cause any damage.

Ευχαριστίες

Με την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία σηματοδοτείται η ολοκλήρωση της φοίτησής μου στο Δ.Π.Μ.Σ. Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των Κατασκευών. Κλείνοντας το εν λόγω ακαδημαϊκό κεφάλαιο, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον ακόλουθο κύκλο ανθρώπων, οι οποίοι υπήρξαν συνοδοιπόροι μου σε αυτή την προσπάθεια:

- ✓ Τον καθηγητή και επιβλέποντα της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας κ. Βαμβάτσικο Δημήτριο, για την ευκαιρία που μου έδωσε να συνεργαστώ μαζί του σε ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον και πρωτότυπο θέμα, καθώς και για την αμέριστη βοήθειά του.
- ✓ Τον διδάκτορα κ. Ιωάννου Ορέστη, για την ενεργό παρουσία του και τη συμβολή του καθ' όλη τη διάρκεια της διεξαγωγής της εργασίας, καθώς και για τις γνώσεις που μου μετέφερε μέσα από μία ευχάριστη συνεργασία.
- ✓ Την Αγνούλα μου, για την αδιάκοπη ενθάρρυνση, το γέλιο και τη θετική ενέργεια που μου μετέδιδε όλους αυτούς τους μήνες με τεράστια επιτυχία.
- ✓ Τέλος, μέσα από την καρδιά μου, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την πάσης φύσεως στήριξη που μου παρείχε στην χάραξη της μέχρι τώρα πορείας μου, που συνεχίζει να είναι δίπλα μου και να με στηρίζει καθημερινά σε κάθε βήμα μου, σε κάθε επιτυχία μου, αλλά προπαντός σε κάθε αποτυχία μου.

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Γενικά η *έκρηξη*, σύμφωνα με τον πάπυρο Larousse Britannica τόμος 22 (2001), είναι φαινόμενο κατά τη διάρκεια του οποίου παράγονται ή απελευθερώνονται μέσα σε εξαιρετικά σύντομο χρονικό διάστημα μεγάλες μάζες αερίων υπό υψηλή πίεση, ως αποτέλεσμα ξαφνικής απελευθέρωσης εσωτερικής ενέργειας από μία ουσία ή ένα μηχανισμό, που οδηγεί στην ανάπτυξη πολύ υψηλών πιέσεων. Κάθε έκρηξη προκαλεί μηχανικές καταπονήσεις στο περιβάλλον, ενώ συχνά συνοδεύεται και από την παραγωγή εκκωφαντικού θορύβου, ο οποίος παλαιότερα είχε θεωρηθεί ως κύριο χαρακτηριστικό των εκρήξεων. Σήμερα έχει διαπιστωθεί ότι δεν αποτελεί παρά μία απλή καταγραφή από το αντί του ανθρώπου του εκρηκτικού κύματος, το οποίο διαδίδεται στον αέρα κατά τη διάρκεια της έκρηξης, και για αυτό απλά συγκαταλέγεται στα διάφορα φαινόμενα που τη συνοδεύουν.

Εκρηκτικό κύμα καλείται η μετάδοση της έκρηξης στη μάζα της εκρηκτικής ύλης, συνήθως με ταχύτητα 2 έως 10 km/s, εξαρτημένο από τις φυσικές και χημικές ιδιότητες της εκρηκτικής ύλης.

Τα *εκρηκτικά υλικά* χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την ταχύτητα της αντίδρασης (έκρηξης). Αν η ταχύτητα είναι υψηλότερη της ταχύτητας του ήχου, η εκρηκτική ύλη καλείται «*υψηλής ισχύος*», ενώ αν είναι χαμηλότερη, καλείται εκρηκτική ύλη «*χαμηλής ισχύος*».

Χαρακτηριστικά των εκρηκτικών είναι: η *ισχύς* (μέτρο ρυθμού έκλυσης της ενέργειας), η *παραγόμενη ενέργεια* και ο *όγκος των παραγόμενων αερίων*, η *ταχύτητα πυροδότησης* (ταχύτητα με την οποία οδεύει το κρουστικό κύμα), η *πυκνότητα* (ποσότητα που τοποθετείται κατά τη γόμωση), η *αντίσταση στο νερό* και η *ευαισθησία* (ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για την έναυση). Οι ιδιότητες των εκρηκτικών περιγράφονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 2.

Έναυση ή *διέγερση* καλείται η έκρηξη υπό συνθήκες απόλυτου ελέγχου. Με τον όρο «εκρηκτικά μέσα», αναφέρονται οι εκρηκτικές ύλες που χρησιμοποιούνται και τα μέσα έναυσεως (πυροκροτητές και θρυαλλίδες).

Διάτρημα είναι μια κυλινδρική οπή ενός υλικού, εντός της οποίας προκαλείται η ακαριαία αποσύνθεση της εκρηκτικής ύλης, με σκοπό τη διάρρηξη του υλικού.

Γόμωση είναι η εργασία τοποθέτησης της εκρηκτικής ύλης εντός του διατρήματος. Με τον ίδιο όρο χαρακτηρίζεται επίσης η ποσότητα της εκρηκτικής ύλης, που εισάγεται στο διάτρημα.

Η έκρηξη, όμως, δεν αποτελεί μια συνήθη περίπτωση αλλά χρήζει ειδικής μεταχείρισης. Αυτή η μεταχείριση υπήρχε σχεδόν αποκλειστικά σε βιομηχανικά έργα ειδικού σκοπού, όπως σε πετρελαϊκές εγκαταστάσεις, που συνδέονται άμεσα με την πολιτική προστασία. Από εκεί που ο σχεδιαστής είχε συνηθίσει, λοιπόν, να ορίζει πως θα τοποθετηθούν τα δομικά στοιχεία, ώστε να καλύπτουν πρωτίστως την αρχιτεκτονική και αντισεισμική σκοπιά, τώρα καλείται να επεκτείνει τις τακτικές που εφαρμόζει στα βιομηχανικά έργα ειδικού σκοπού, και σε όλα τα υπόλοιπα έργα.

Έτσι, καταλήγει να αρχίζει να σκέφτεται με σενάρια έκρηξης. Πόσο κοντά μπορεί να πλησιάσει ο τρομοκράτης; Πόσα κιλά βόμβα μπορεί να κουβαλήσει ως εκεί; Μου αντέχει

η κολώνα; Θα μου σπάσουν τα παράθυρα; Αυτά είναι τα ερωτήματα που απασχολούν και θα πρέπει να απασχολούν όλο και περισσότερο τον σχεδιαστή, ιδίως εκείνον που ασχολείται με έργα ευρύτερης κοινωνικής και οικονομικής σημασίας.

Αλλά δεν είναι μόνο αυτό. Ο τρόπος φόρτισης της κατασκευής από μία πιθανή έκρηξη αποτελεί μια σχοινοτενή διαδικασία που χρειάζεται ειδικές γνώσεις και ειδικά λογισμικά. Από τη μία πλευρά βρίσκεται το ύψος και το είδος του φορτίου το οποίο επιδρά στην κατασκευή και από την άλλη πλευρά βρίσκεται η απόκριση της κατασκευής σε αυτό το περίεργο φορτίο. Ο σχεδιαστής καλείται να ανταποκριθεί σε αυτές τις απαιτήσεις και να σχεδιάσει την κατασκευή του με τέτοιο τρόπο, ώστε να καταστήσει το ενδεχόμενο έκρηξης περιορισμένο, να προστατεύσει το ανθρώπινο δυναμικό, τον εξοπλισμό καθώς και να επιβάλει τη επαναλειτουργία της κατασκευής μετά από την έκρηξη όσο πιο εύκολη γίνεται.

1.2 Εκρήξεις στην Ελλάδα

Ο κίνδυνος έκρηξης σε μία κατασκευή αποτελεί έναν από τους πλέον σημαντικούς κινδύνους της σύγχρονης εποχής. Ολοένα και περισσότερο οι προσχεδιασμένες επιθέσεις μεγεθύνονται ενώ οι εκρήξεις από ατυχήματα έχουν μια σταθερή θέση στη γενική κατάταξη. Ιδιαίτερα στην Ελλάδα, οι εκρήξεις υπήρχαν, υπάρχουν και ίσως θα συνεχίσουν να υπάρχουν και σε όρους πολεμικούς, και σε όρους τρομοκρατικούς και σε όρους ατυχημάτων. Αυτό απεικονίζεται ανάγλυφα στις διεθνείς λίστες που εμφανίζουν τη χώρα μόνιμως στα Top-Ten των αναπτυγμένων χωρών όπως φαίνεται στον πίνακα 1.1 .

Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η έκρηξη δυναμίτιδας στο πλοίο Πανορμίτης στο λιμάνι της Σούδας το 1979, η έκρηξη σε βυτιοφόρο στην εθνική οδό Αθηνών – Λαμίας το 1999, η έκρηξη στο ναό της Ρόδου το 1856 και το «Ατύχημα» στην PETROLA το 1992.

Πίνακας 1.1: Ταξινόμηση τρομοκρατικών επιθέσεων διεθνώς [Jenkins M. (2010)].

All attacks: leading countries - distribution and average fatalities per attack										
Rank	Developing Country	#	% of Total	FPA	IPA	Developed Country	#	% of Total	FPA	IPA
1	India	267	16.35%	5.3	17.6	Israel	156	9.55%	3.2	15.7
2	Pakistan	149	9.12%	3.8	9.9	Russia	115	7.04%	2.6	9.5
3	Philippines	85	5.21%	1.8	7.3	U.K.	78	4.78%	1.0	12.3
5	Colombia	71	4.35%	1.3	1.4	Spain	47	2.88%	3.8	38.3
6	Sri Lanka	57	3.49%	9.0	27.7	France	27	1.65%	0.7	6.8
4	Turkey	54	3.31%	1.9	6.9	Germany	25	1.53%	0.1	0.9
7	Algeria	44	2.69%	6.1	9.5	Italy	14	0.86%	7.9	23.5
9	Thailand	42	2.57%	0.9	3.9	Greece	10	0.61%	0.1	1.6
8	Egypt	34	2.08%	1.3	6.5	Japan	8	0.49%	0.1	0.3
10	China	18	1.10%	9.5	11.6	U.S.	7	0.43%	0	0.3

1.3 Βιομηχανικά Ατυχήματα Μεγάλης Έκτασης (B.A.M.E.)

Η πρόσφατη έκρηξη που έγινε στο λιμάνι της Βηρυτού στις 4 Αυγούστου 2020 (Εικόνα 1.1) και οι εκατοντάδες πληγές, υλικές, αλλά κυρίως οι ανθρώπινες αποτέλεσαν την αιχμή του δόρατος για τη συγγραφή αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, οι νεκροί ήταν τουλάχιστον 203 και οι τραυματίες 6.500. Η έκρηξη σημειώθηκε σε χώρο αποθήκευσης πυροτεχνημάτων και στη συνέχεια επεκτάθηκε σε χώρο όπου ήταν αποθηκευμένοι 2.750 τόνοι νιτρικού αμμωνίου. Κατεγράφησαν ζημιές ακόμη και σε σπίτια 10 χιλιόμετρα μακριά από το τόπο της έκρηξης και έγινε αισθητή ακόμα και στην Κύπρο.



Εικόνα 1.1: Συνδυασμός εικόνων από το υλικό που καταγράφηκε τη στιγμή της τεράστιας έκρηξης που έπληξε την Βηρυτό στο λιμάνι της πρωτεύουσας του Λιβάνου στις 4 Αυγούστου 2020 [AFP].

Υπάρχουν πολλά παραδείγματα Βιομηχανικών Ατυχημάτων Μεγάλης Έκτασης (B.A.M.E.) ορισμένα από τα οποία παραθέτονται παρακάτω:

- Λιμένας Χάλιφαξ Καναδάς (1917) [Stepben J. (2002)]

Η έκρηξη ήταν εξαιρετικά ισχυρή με αποτέλεσμα να σκοτωθούν ακαριαία πάνω από 1600 άνθρωποι, να τυφλωθούν περί τους 1.000 ανθρώπους από τα θραύσματα που εκσφενδονίστηκαν, να τραυματιστούν περαιτέρω χιλιάδες άνθρωποι, ενώ ισοπεδώθηκαν 1300 στρέμματα γης και ξέσπασαν αμέτρητες πυρκαγιές στην ευρύτερη περιοχή. Ένα από τα κανόνια του Μον Μπλαν βρέθηκε πέντε χιλιόμετρα μακριά από το σημείο της έκρηξης.

- Γερμανία, Οππάου (1921) [Τα ΝΕΑ της EXTRACO (2009)].

Έκρηξη μίγματος 50/50 θειικού αμμωνίου και νιτρικού αμμωνίου στο Oppau της Γερμανίας το 1921, η οποία προκάλεσε το θάνατο 430 ανθρώπων.

- Η.Π.Α., Τέξας (1947) [Τα ΝΕΑ της EXTRACO (2009)].

Μετά από πολύωρη κατάκαυση 3200 τόνων φορτίου Νιτρικού Αμμωνίου (AN) σε πλοίο που ήταν αγκυροβολημένο στο λιμάνι του Τέξας προκλήθηκε μεγάλη έκρηξη, που είχε ως αποτέλεσμα το θάνατο 552 και τον τραυματισμό 3000 ανθρώπων.

- Ηνωμένο Βασίλειο, Έκρηξη στη χημική βιομηχανία Flixborough (1974).

Το ατύχημα είναι το πιο σοβαρό που συνέβη ποτέ στη χημική βιομηχανία του Ηνωμένου Βασιλείου και είχε σαν αποτέλεσμα την πλήρη καταστροφή του εργοστασίου. Από τους εργαζόμενους εκείνη τη στιγμή στο εργοστάσιο, 28 σκοτώθηκαν και 89 τραυματίστηκαν σοβαρά.

1.4 Τρομοκρατικές επιθέσεις

Οι ταυτόχρονες επιθέσεις στο Παγκόσμιο Κέντρο Εμπορίου (επιθέσεις 11^{ης} Σεπτεμβρίου 2001, (Εικόνα 1.2) και στο Πεντάγωνο έχουν αφήσει μια βαθιά αποτύπωση στις αντιλήψεις: τη φιλοδοξία των εμπλεκόμενων τρομοκρατών, την κομψότητα και την καινοτομία της μεθόδου επίθεσης, την πολυπλοκότητα των παρασκευασμάτων τους, η φρικτή και περιστασιακή δολοφονία χιλιάδων αθώων, την αρχική διαταραχή σε έναν πολύ διασυνδεδεμένο εμπορικό κόσμο, η προσβολή που δόθηκε στην εθνική αυτοεκτίμηση με συνέπειες πέρα από την ίδια την επίθεση.



Εικόνα 1.2: Τρομοκρατική επίθεση 11^{ης} Σεπτεμβρίου 2001 [Yelland M. (2015)]

Τα τελευταία χρόνια, οι τρομοκρατικές επιθέσεις έχουν εξελιχθεί ραγδαία, σύμφωνα με τους D.Cormie et al, ιδιαίτερα με την εμφάνιση βομβιστών αυτοκτονίας οι οποίοι είναι διατεθειμένοι να δώσουν τέλος στη ζωή τους ώστε να παραδώσουν ένα μήνυμα. Δυστυχώς, η τρομοκρατία δείχνει ακόμη κάθε σημάδι ύπαρξης για πολύ καιρό ακόμη. Τόσο φυσιολογικό έχει γίνει πλέον όπου τα αντιτρομοκρατικά μέτρα θεωρούνται πλέον συνηθισμένα στις περισσότερες εμπορικές και ψυχαγωγικές δραστηριότητες. Η προστασία

είναι πλέον συνηθισμένη σε έργα υποδομής και υπάρχει αυξημένη περιέργεια για το τι μπορεί να επιτευχθεί σε αυτόν τον τομέα στο μέλλον.

Ωστόσο, ήταν η σκόπιμη πτήση δύο αεροσκαφών με πλήρη καύσιμα στους δίδυμους πύργους του Παγκόσμιου Κέντρου Εμπορίου (World Trade Center) στη Νέα Υόρκη το 2001 που άλλαξε απότομα την ευαισθητοποίηση. Η αρχική έκπληξη κατά την πράξη αντικαταστάθηκε από την αναγνώριση ότι οι τρομοκράτες θα εξερευνούσαν κάθε ευκαιρία που παρουσιάστηκε, περιοριζόμενη μόνο από αυτό που ήταν δυνατό στους νόμους της φυσικής.

Ταξινομημένες όσον αφορά το κόστος σε ανθρώπινες ζωές παρουσιάζονται οι μεγαλύτερες εκρήξεις από τρομοκρατικές επιθέσεις που έχουν συμβεί:

- Βομβαρδισμός των πολυκατοικιών Yazidi στις Kahtaniya and Jazeera του Ιράκ (2007) [onlinearchive].

Η απώλεια σε ανθρώπινες ζωές ήταν 520 νεκροί και 1500 τραυματίες, η εκρηκτική ύλη που χρησιμοποιήθηκε ήταν 2000kg Ισοδυναμίας TNT άγνωστου είδους με χρήση αυτοσχέδιων μηχανισμών με όχημα.

- Βομβαρδισμός σε πολυκατοικίες στη Βομβάη της Ινδίας (1993) [indiatoday].

Η απώλεια σε ανθρώπινες ζωές ήταν 257 νεκροί και 717 τραυματίες, η εκρηκτική ύλη που χρησιμοποιήθηκε ήταν 3329kg RDX 2000kg με χρήση αυτοσχέδιων μηχανισμών με όχημα.

- Βομβαρδισμός της αμερικάνικης πρεσβείας της Κένυας (1997) [CNN].

Η απώλεια σε ανθρώπινες ζωές ήταν 213 νεκροί και 4000 τραυματίες, η εκρηκτική ύλη που χρησιμοποιήθηκε ήταν 3000~17000kg Ισοδυναμίας TNT άγνωστου είδους με χρήση αυτοσχέδιων μηχανισμών με όχημα.

- Βομβαρδισμός στο Beirut του Λιβάνου (1983) [Huffingtonpost].

Η απώλεια σε ανθρώπινες ζωές ήταν 305 νεκροί και 75 τραυματίες, η εκρηκτική ύλη που χρησιμοποιήθηκε ήταν 9525kg Ισοδυναμίας TNT άγνωστου είδους με χρήση αυτοσχέδιων μηχανισμών με όχημα.

- Βομβαρδισμός σε νυχτερινό μαγαζί στην Kuta του Μπαλί (2002) [newscom].

Η απώλεια σε ανθρώπινες ζωές ήταν 202 νεκροί και 209 τραυματίες, η εκρηκτική ύλη που χρησιμοποιήθηκε ήταν 1020kg Μίγματος χλωρικού καλίου με σκόνη αργιλίου και θείο με χρήση αυτοσχέδιων μηχανισμών με όχημα.

- Βομβαρδισμός κτιρίων στην Sadr του Ιράκ (2006)

Η απώλεια σε ανθρώπινες ζωές ήταν 202 νεκροί και 260 τραυματίες, η εκρηκτική ύλη που χρησιμοποιήθηκε ήταν 1000kg TNT με χρήση αυτοσχέδιων μηχανισμών με όχημα.

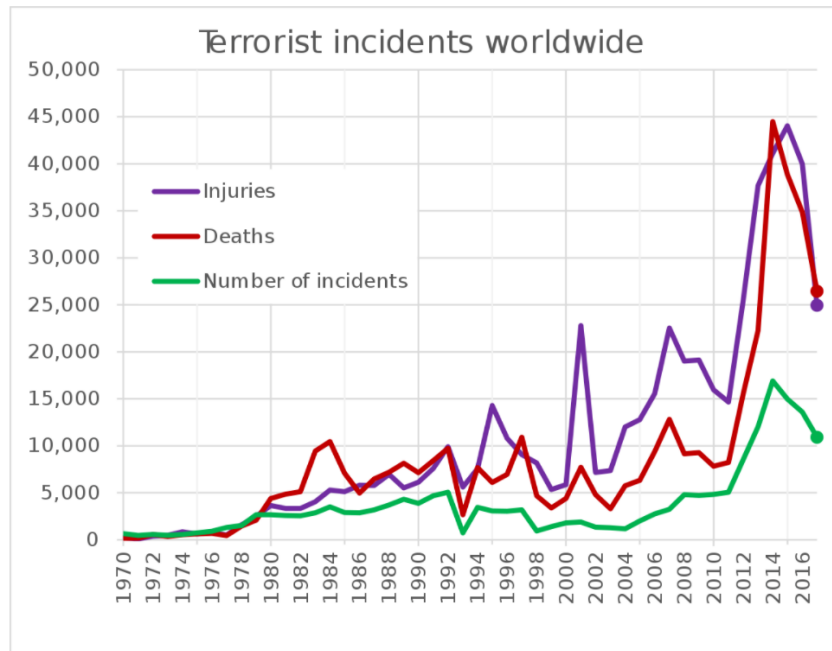
- Βομβαρδισμός του Alfred P. Murrah Federal Building στην Oklahoma των Η.Π.Α. (1995).

Η απώλεια σε ανθρώπινες ζωές ήταν 169 νεκροί και 675 τραυματίες, η εκρηκτική ύλη που χρησιμοποιήθηκε ήταν 3200kg Νιτρικού αμμωνίου, νιτρομεθανίου και Tonex με χρήση αυτοσχέδιων μηχανισμών με όχημα.

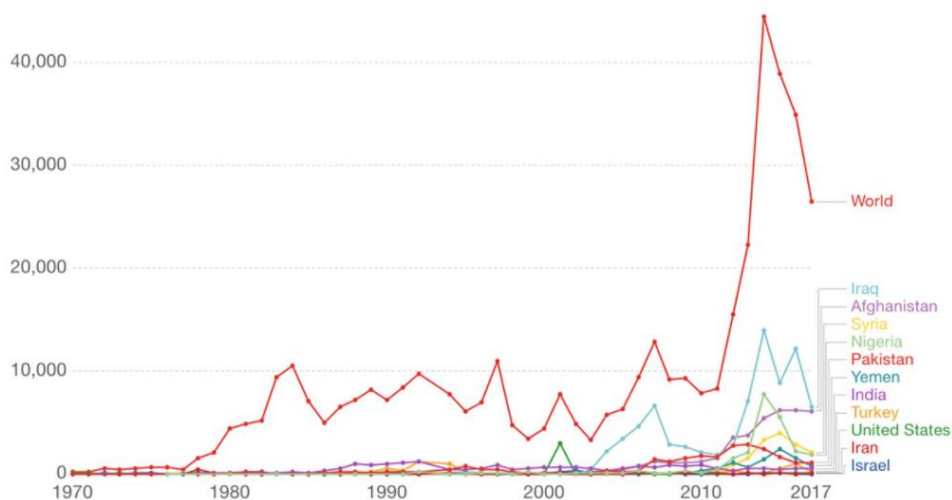
Συνολικά, μέσα από τα παραδείγματα τρομοκρατικής δράσης διαπιστώνεται ότι:

- Με την πάροδο του χρόνου αυξάνουν οι τρομοκρατικές επιθέσεις μέσω εκρήξεων και γίνονται όλο και πιο θανατηφόρες, όπως φαίνεται και στα σχήματα 1.3 και 1.4.

- Η χρήση αυτοσχέδιου μηχανισμού με όχημα είναι σχεδόν καθολική.
- Ακόμη και περιορισμένου μεγέθους εκρηκτικό φορτίο, αν προκαλέσει έκρηξη εντός της κατασκευής, όσο ικανή και αν είναι θα υπάρξει τουλάχιστον τοπική αστοχία.
- Ψαθυρά στοιχεία επιφέρουν πολύ χειρότερη απόκριση της κατασκευής σε αντίθεση με τα πλάστιμα στοιχεία.
- Σύγχρονες κατασκευές με κοντινή έκρηξη δεν αστοχούν πλήρως αλλά ο σκελετός τους συνήθως παραμένει.



Σχήμα 1.3: Τραυματισμοί, θάνατοι και αριθμός τρομοκρατικών επιθέσεων διεθνώς [Wikipedia].



Σχήμα 1.4: Θάνατοι τρομοκρατικών επιθέσεων διεθνώς και στις πιο συχνά πληγμένες χώρες [Wikipedia].

1.5 Ελεγχόμενες κατεδαφίσεις με χρήση εκρηκτικών

Η απόφαση για την καθαίρεση μιας κατασκευής ή τμήματος αυτής, είναι ένα αποτέλεσμα προερχόμενο από πολλά και διαφορετικά αίτια, σύμφωνα με τις Νομικού Ι. και Ξύδη Α. (2011). Η φθορά, η γήρανση μιας κατασκευής ή ένας σεισμός, συνθήκες που δημιουργούν σοβαρές βλάβες (τοπικές ή γενικευμένες), φέρνει τους μηχανικούς στο δίλλημα, επισκευή ή κατεδάφιση; Η λήψη μέτρων απέναντι στην επικινδυνότητα ενός κτιρίου, και συνεπώς στην καθαίρεση του ή όχι, επιλέγεται σύμφωνα με οικονομικά κριτήρια, λαμβάνοντας σοβαρά υπ' όψη και την ηλικία του. Η απόφαση κατεδάφισης μιας ή περισσότερων εγκαταστάσεων εμφανίζεται και για λόγους κάλυψης των κοινωνικών αναγκών, όταν χρειάζεται να ανοικοδομηθούν δημόσια κτίρια, όπως νοσοκομεία ή σχολεία, εργασία που λόγω της έκτασης της κατασκευής, προϋποθέτει την εφαρμογή της κατάλληλης μεθόδου κατεδάφισης.

Οι λόγοι που οδηγούν σε μια κατεδάφιση λοιπόν, εμφανίζονται ουκ ολίγες φορές. Οι τρόποι εκτέλεσής της είναι αρκετοί, δίνοντας ένα φάσμα επιλογών ώστε να προτιμηθεί ο εκάστοτε καταλληλότερος, σύμφωνα με ένα σύνολο κριτηρίων. Στο πέρας του χρόνου, οι τρόποι καθαίρεσης των κατασκευών βελτιώνονται και εμπλουτίζονται. Μια από αυτές τις μεθόδους, που εμφανίζεται τα τελευταία χρόνια και στην Ελλάδα, εφαρμόστηκε πρώτη φορά το 1995, και είναι η κατεδάφιση με την τεχνική της ελεγχόμενης χρήσης εκρηκτικών.

Οι μέθοδοι κατεδάφισης που χρησιμοποιούνται είναι με μηχανικά μέσα και εργασία χειρός (συμβατικές μέθοδοι), θερμικές μέθοδοι, μέθοδος με εκτόνωση αερίου, με χρήση διογκούμενων υλικών διάσπασης (αθόρυβα εκρηκτικά) και με χρήση εκρηκτικών.

Η υποχρεωτική εφαρμογή της μεθόδου εμφανίζεται όταν δεν υπάρχει ο κατάλληλος εξοπλισμός ώστε να πραγματοποιηθεί η κατεδάφιση με μηχανικά μέσα, αλλά και όταν αυτά δεν μπορούν να εργαστούν με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα ή δεν είναι εφικτό να προσεγγίσουν το σημείο που απαιτείται η κατεδάφιση. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η αυξημένη ασφάλεια του προσωπικού και η ποιότητα διεξαγωγής της κατεδάφισης, ο σύντομος χρόνος που προσφέρει ο δεδομένος τρόπος της κατεδάφισης, η μέθοδος συνολικά, θεωρείται πιο «φιλική» προς το περιβάλλον και το κόστος σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να είναι χαμηλότερο από τις συμβατικές μεθόδους.

Στην μελέτη καταρχάς, εξετάζονται οι πιθανοί-δυνατοί τρόποι που μπορεί να πραγματοποιηθεί η καθαίρεση της κατασκευής. Μπορούμε να διακρίνουμε 2 τρόπους κατεδάφισης με τη χρήση εκρηκτικών, σύμφωνα με την κατεύθυνση της πτώσης. Ο ένας τρόπος είναι η κατάρρευση να πραγματοποιηθεί προς μια πλευρά όπου υπάρχει ελεύθερος χώρος (Εικόνα 1.5 αριστερά) και ο άλλος η συνολική πτώση προς το εσωτερικό, εντός του περιγράμματος της κατασκευής (Εικόνα 1.5 δεξιά). Αυτή η επιλογή καθορίζεται κατ' εξοχήν από τον περιβάλλοντα χώρο. Αν για παράδειγμα, σε μια αστική περιοχή υπάρχει από την μια πλευρά της προς καθαίρεση κατασκευής, ένα γειτονικό κτίριο αρκετά κοντά, ενώ από την διαμετρικά αντίθετη πλευρά, ελεύθερος χώρος (πάρκινγκ, μη χρησιμοποιούμενη κατασκευαστικά έκταση), η επιθυμητή κατεύθυνση πτώσης, πιθανότατα να είναι προς αυτόν τον ελεύθερο χώρο. Φυσικά, σε μια τέτοια περίπτωση, η κατεύθυνση πτώσης θα επιλεγεί σε συνδυασμό και με τα χαρακτηριστικά της κατασκευής. Αντίθετα, αν η περιοχή είναι πυκνοκατοικημένη και δεν υπάρχει ελεύθερος χώρος γειτονικά, η μελέτη θα επικεντρωθεί σε τεχνικές κατάρρευσης, εντός του περιγράμματός της. Η κατάρρευση προς μια πλευρά είναι πιο εύκολος και πιο ασφαλής τρόπος κατεδάφισης.



Εικόνα 1.5: Πτώση προς μια πλευρά New York, U.S.A. 2007, Εσωτερική κατεδάφιση Las Vegas, U.S.A. 1998 [Νομικού Ι., Ξύδη Α. (2011)].

Οι θέσεις - επίπεδα γόμωσης και οι χρόνοι επιβράδυνσης που οδηγούν στη δημιουργία 'φάσεων' πυροδότησης, είναι οι παράγοντες που καθορίζουν την εξέλιξη και την κατεύθυνση της πτώσης σύμφωνα με τον Μπαλικτσή Η. (1996). Στον πρώτο τρόπο κατεδάφισης οι διαφορές φάσεων πραγματοποιούνται κατά την οριζόντια διεύθυνση και η ταυτόχρονη καθ' ύψος πυροδότηση των υποστυλωμάτων, ξεκινώντας από τη μια πλευρά και καταλήγοντας στην άλλη (Σχήμα 1.6). Σε μια κατεδάφιση προς το εσωτερικό του κτιρίου, στην πρώτη φάση ενεργοποιούνται οι γομώσεις του πυρήνα του κτιρίου, δηλαδή στο κέντρο. Κάποιες φορές, η πρώτη φάση μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα, να αποδυναμώσει και όχι απαραίτητα να σπάσει τις συγκεκριμένες κολώνες, αδυνατίζοντας στατικά το κτίριο, χωρίς αυτό να πέφτει. Μετά από λίγο, ακολουθούν οι επόμενες φάσεις που κόβουν τις κολώνες από μέσα προς τα έξω, προκαλώντας την κατάρρευση πάνω από το αδυνατισμένο σημείο. Η επιθυμητή κατεύθυνση πτώσης προς το εσωτερικό, μπορεί να υποστηριχθεί επιπλέον, με ειδικά συρματόσχοινα που δένουν τις ακριανές κολώνες με το κέντρο της πλάκας του κάθε ορόφου, έτσι ώστε η κατάρρευση να παρασύρει τις γωνίες προς τα μέσα. Αυτή η τεχνική εφαρμόστηκε στην κατεδάφιση του NAT στην Αθήνα το 2010 (Σχήμα 1.6)



Εικόνα 1.6: 1η φάση, υποστήριξη με συρματόσχοινα, Κατεδάφιση NAT, Αθήνα, Ελλάδα 2010, 2η - 3η φάση κατεδάφισης, Κατεδάφιση NAT, Αθήνα, Ελλάδα 2010 [Νομικού Ι., Ξύδη Α. (2011)].

Οι εκρηκτικές ύλες που χρησιμοποιούνται για την καθαίρεση κατασκευών είναι κυρίως οι δυναμίτιδες (εκρηκτικά υψηλής ισχύος) που έχουν ως κύριο συστατικό την

νιτρογλυκερίνη. Η έναυση απαιτεί τη δημιουργία και μετάδοση κρουστικού κύματος που είναι δυνατό να γίνει ηλεκτρικό και μη- ηλεκτρικό σύστημα. Η έναυση με ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά μέσα είναι αρκετά διαδεδομένη σε υπόγειες και επιφανειακές ανατινάξεις, λόγω της ευκολίας σύνδεσης και ελέγχου των κυκλωμάτων, πρέπει όμως να αποφεύγεται σε υγρές συνθήκες και όπου υπάρχουν ισχυρά τυχαία ρεύματα. Στα μη ηλεκτρικά συστήματα, ο σχεδιασμός και η εφαρμογή της συνδεσμολογίας γίνεται χωρίς υπολογισμούς, την απαίτηση σχολαστικής προετοιμασίας, χωρίς μεγάλη μηχανή πυροδότησης, ενώ κατά κανόνα οι κίνδυνοι να προκληθούν ζημιές, βλάβες και διακοπές στους σωλήνες και στο σύστημα πυροδότησης είναι μικρότεροι.

Σε κάποιες περιπτώσεις χρησιμοποιείται σαν εκρηκτική ύλη το T.N.T (τρινιτροτολουένιο) σε συνδυασμό με RDX και PENT (πεντρίτης), από τις ισχυρότερες εκρηκτικές ύλες και κατά πλειοψηφία η εφαρμογή του είναι για στρατιωτικούς σκοπούς. Στις καταδείξεις χρησιμοποιείται για κοπή μεταλλικών στοιχείων.

1.6 Αβεβαιότητες και υποθέσεις

Υπάρχουν αρκετές αβεβαιότητες και υποθέσεις στον σχεδιασμό και στην ανάλυση των εκρήξεων, ακόμα και όταν χρησιμοποιούνται δυναμικές φορτίσεις και αποκρίσεις. Τυπικά παραδείγματα περιλαμβάνουν:

- Το μέγεθος και η τοποθεσία της εκρηκτικής ύλης.
- Το μέγεθος και το σχήμα της χρονοϊστορίας πίεσης της έκρηξης.
- Οι επιδράσεις της δονήσεως του εδάφους, οι θρυμματισμοί που προκαλούνται και τα δευτερεύοντα συντρίμια.
- Τα χαρακτηριστικά των υλικών.
- Η συσχέτιση μεταξύ της παραμόρφωσης του στοιχείου και του βαθμού της ζημιάς.
- Η μεταφορά του φορτίου στις συνδέσεις των φέροντων στοιχείων.

Ακόμα και μικρές παραλλαγές αυτών των παραμέτρων μπορεί να έχουν σημαντική επιρροή στην προβλεπόμενη συμπεριφορά. Γνωρίζοντας αυτά, είναι σημαντικό κάτω από ορισμένες συνθήκες, να υιοθετηθεί μια ισοδύναμη μεθοδολογία, η οποία είναι προσιτή σε επαγγελματίες πολιτικούς μηχανικούς και παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 5.

1.7 Διάρθρωση εργασίας

Η διάρθρωση της εργασίας έχει ως εξής:

1^ο Κεφάλαιο: Παρουσιάζονται διάφορα εισαγωγικά στοιχεία πάνω στο αντικείμενο των εκρήξεων.

2^ο Κεφάλαιο: Δίνονται βασικές πληροφορίες επί των εκρηκτικών υλών.

3^ο Κεφάλαιο: Αναλύεται η έκρηξη ως φυσικό φαινόμενο.

4^ο Κεφάλαιο: Δίνεται η περιγραφή του μεταλλικού κτιρίου που μελετάται.

5^ο Κεφάλαιο: Αναλύεται η διαδικασία υπολογισμού που ακολουθήθηκε.

6^ο Κεφάλαιο: Γίνεται ανάλυση της απόκρισης των πανέλων του κτιρίου.

7^ο Κεφάλαιο: Δίνονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία.

8^ο Κεφάλαιο: Συμπεριλαμβάνονται όλες οι πηγές της εργασίας.

2 Εκρηκτικές ύλες

2.1 Κατηγοριοποίηση εκρήξεων

Σύμφωνα με τον Καμπούρη Εμμ., (1984), εκρηκτική ύλη είναι κάθε υλικό σώμα ή σύστημα το οποίο δύναται κατόπιν κατάλληλης θερμικής ή μηχανικής διέγερσης να ελευθερώσει απότομα μία μεγάλη ποσότητα αερίων με τέτοιο τρόπο ώστε να καταστεί δυνατή η άσκηση μίας ισχυρής δυναμικής καταπόνησης στο περιβάλλον. Αντίστοιχα, έκρηξη μίας εκρηκτικής ύλης είναι η ταχύτερη μεταβολή της, κυρίως σε αέρια προϊόντα, τα οποία βρίσκονται σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων.

Για την καλύτερη κατανόηση του αντικειμένου των εκρήξεων είναι αρχικά απαραίτητη η κατηγοριοποίησή τους, έτσι ώστε να καταστεί ευχερέστερη η διάκρισή τους εν συνεχεία. Οι εκρήξεις δύνανται να ταξινομηθούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Φυσικές εκρήξεις, όπως η έκρηξη ηφαιστείου.
- Πυρηνικές εκρήξεις, όπως η έκρηξη ατομικής βόμβας.
- Χημικές εκρήξεις, όπως η έκρηξη με τη χρήση δυναμίτη.
- Ηλεκτρικές εκρήξεις, όπως η έκρηξη ηλεκτρικού τόξου.
- Μηχανικές εκρήξεις, όπως η έκρηξη από διάρρηξη δοχείου πίεσης.

Το παρόν κείμενο αφορά τις χημικές εκρήξεις δεδομένου ότι κατ' ουσίαν μόνο αυτές έχουν σχέση με τη φιλοσοφία της εργασίας. Οι εκρήξεις αυτής της κατηγορίας οφείλονται στην πραγματοποίηση μίας ταχύτερης χημικής αντίδρασης που συντελείται στη μάζα μίας χημικής ουσίας ή ενός μίγματος χημικών ουσιών, που χαρακτηρίζεται ως εκρηκτική ύλη. Συνήθως με τον απλό όρο «έκρηξη» νοείται η χημική έκρηξη, ενώ οι υπόλοιπες κατηγορίες αναφέρονται σαφώς ως μηχανικές, πυρηνικές κ.λπ. εκρήξεις. Αποτελούν την πιο μεγάλη κατηγορία εκρήξεων και για το λόγο αυτό η τεχνολογία των εκρηκτικών υλών ασχολείται κατά το μεγαλύτερο μέρος της με τις χημικές εκρηκτικές ύλες. Οι φυσικές και πυρηνικές εκρήξεις είναι εκτός της κλίμακας του κτιρίου και της επιμέρους εξέτασής του ενώ οι ηλεκτρικές και μηχανικές εκρήξεις καλύπτονται εν μέρει με την ανάλυση των συνεπειών τους στην αντίσταση των κτιρίων αλλά δίχως τη συνολική θεώρησή τους.

2.2 Ιδιότητες εκρηκτικών υλών

Στις πλείστες των περιπτώσεων οι εκρηκτικές ύλες συντίθενται από οξυγόνο, από άζωτο και από τα προς οξείδωση (καύσιμη ύλη) χημικά στοιχεία, όπως το υδρογόνο ή ο άνθρακας. Έτσι, κατά τη χημική αντίδραση της έκρηξης τα μόρια οξυγόνου-αζώτου χωρίζονται μεταξύ τους και ενώνονται με την καύσιμη ύλη απελευθερώνοντας μεγάλη ποσότητα ενέργειας και καυτών αερίων η θερμοκρασία των οποίων προκύπτει από τη θερμοκρασία που απαιτείται για τον αρχικό διαχωρισμό οξυγόνου-αζώτου και τη θερμοκρασία που προκύπτει από τη μετέπειτα ένωση με την καύσιμη ύλη.

Κατά την αντίδραση της έκρηξης παράγεται ένα απότομο κύμα.

- Κρουστικό κύμα: Απότομο κύμα πίεσης εντός κάποιου αερίου.
 - Εκρηκτικό κύμα: Ο συνδυασμός ενός κρουστικού κύματος με τον άνεμο.
- Παρακάτω παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των εκρηκτικών υλών.

2.2.1 Διέγερση εκρηκτικής ύλης-γέμισμα

Δύο βασικές έννοιες άρρηκτα συνδεδεμένες με τις εκρηκτικές ύλες είναι η διέγερση και το γέμισμα.

Διέγερση μίας εκρηκτικής ύλης σε έκρηξη είναι η πράξη με την οποία επιτυγχάνεται η έναρξη της έκρηξης στη μάζα της εκρηκτικής ύλης. Η διέγερση μπορεί να είναι ασθενής ή ισχυρή.

- i) Ασθενής διέγερση είναι εκείνη η οποία επιτυγχάνεται με πολύ μικρή πηγή ενέργειας, για παράδειγμα τέτοια πηγή είναι ένα θερμό σημείο, η τριβή και η ελαφριά κρούση.
- ii) Ισχυρή διέγερση είναι εκείνη η οποία για να επιτευχθεί απαιτεί έκρηξη μίας ποσότητας εκρηκτικής ύλης.

Γέμισμα είναι μία οποιαδήποτε μορφοποιημένη ποσότητα εκρηκτικής ύλης. Η πλέον συνηθισμένη μορφή των γεμισμάτων είναι η κυλινδρική. Περιορισμός ενός γεμίματος είναι κάθε περίβλημα το οποίο περιβάλλει το γέμισμα και το περιορίζει σε συγκεκριμένες διαστάσεις. Ο περιορισμός μπορεί να είναι ασθενής (π.χ. περίβλημα από χαρτί) ή ισχυρός (π.χ. περίβλημα από χάλυβα). Απόλυτος περιορισμός καλείται εκείνος ο οποίος δεν υφίσταται έστω και την ελάχιστη προσβολή, κατά την έκρηξη της περιορισμένης εκρηκτικής ύλης (πχ μεταλλικοί κάλυκες φυσιγγίων πυροβόλων όπλων). Γεμίματα χωρίς περιορισμό είναι εκείνα που οι διαστάσεις τους δεν περιορίζονται από οποιοδήποτε περίβλημα ή μέσο κατά τη διάρκεια της έκρηξης.

2.2.2 Ταχύτητα έκρηξης

Η ταχύτητα έκρηξης (velocity of detonation – VOD) είναι η ταχύτητα με την οποία προχωρά το μέτωπο αντίδρασης έκρηξης εντός μιας κυλινδρικής στήλης γόμωσης από εκρηκτική ύλη. Εκφράζει τον ρυθμό έκλυσης της χημικής ενέργειας και έχει άμεση σχέση με την πίεση έκρηξης και τη διαρρηκτική ενέργεια της εκρηκτικής ύλης. Εφόσον συσχετίζεται άμεσα με τον ρυθμό έκλυσης ενέργειας, όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα έκρηξης, τόσο ταχύτερη είναι η έκλυση ενέργειας και, άρα, τόσο βραχύτερη η έκρηξη.

Λόγω του ότι ο περιβάλλον χώρος της εκρηκτικής ύλης παίζει σημαντικό ρόλο στην έκρηξη, αυτός διαχωρίζεται σε τρεις διαφορετικές καταστάσεις:

- Έκρηξη με περιορισμένες συνθήκες (Dc - ConfinedVOD).
- Έκρηξη με ελεύθερες συνθήκες (Du - UnconfinedVOD).
- Ιδανική έκρηξη (D – IdealVOD).

Οι συνθήκες αυτές έχουν βαρύνουσα σημασία για την ταχύτητα έκρηξης, αφού με αύξηση των περιορισμών δύναται η αντίδραση της έκρηξης να εκτελεστεί πληρέστερα, μειώνοντας την κρίσιμη διάμετρο:

- Κρίσιμη διάμετρος: Ελάχιστη διάμετρος γόμωσης κατά την οποία η εκλυόμενη ενέργεια είναι ικανή να διατηρήσει την αυτοδιάδοση της έκρηξης.
- Ταχύτητα έκρηξης σε περιορισμένες συνθήκες (Dc): Για διάμετρο γόμωσης μεγαλύτερη της κρίσιμης διαμέτρου εκτελείται η αντίδραση της έκρηξης. Όταν σε μια διάμετρο όλοι οι κόκκοι αντιδρούν, τότε για τις υφιστάμενες συνθήκες προκύπτει η ταχύτητα έκρηξης Dc.
- Ιδανική ταχύτητα έκρηξης (D): Με τη συνεχή αύξηση της διαμέτρου γόμωσης, κάποια στιγμή θα επέλθει ένα τέλμα και η ταχύτητα έκρηξης αγγίζει ένα μέγιστο. Αυτό το μέγιστο αποτελεί την ιδανική ταχύτητα έκρηξης.

Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα έκρηξης είναι:

- Χρόνος αποθήκευσης εκρηκτικής ύλης.

- Προσμίξεις στην εκρηκτική ύλη.
- Συσκευασία εκρηκτικής ύλης.
- Χημική σύσταση εκρηκτικής ύλης.
- Κοκκομετρία εκρηκτικής ύλης.
- Πυκνότητα γόμωσης (αύξηση της πυκνότητας γόμωσης οδηγεί σε αύξηση της ταχύτητας έκρηξης).
- Διάμετρος γόμωσης (αύξηση της διαμέτρου γόμωσης οδηγεί σε αύξηση της ταχύτητας έκρηξης).
- Βαθμός περιορισμού των συνθηκών γύρω από την εκρηκτική ύλη (αύξηση των περιορισμών οδηγεί σε αύξηση της ταχύτητας έκρηξης).
- Θερμοκρασία.
- Διαδικασία έναυσης εκρηκτικής ύλης.
- Χρόνος ανάμεσα σε γόμωση και έναυση.
- Μήκος διατρήματος.
- Περιβάλλον διατρήματος.
- Μέθοδοι μέτρησης της ταχύτητας έκρηξης:
 - Υπερταχεία φωτογράφιση.
 - Ηλεκτρονική μέθοδος με χρήση αισθητήρων και παλμογράφου.
 - Με οπτικές ίνες.
 - Μέθοδος Dautriche.

2.2.3 Ισχύς έκρηξης

Η ισχύς εκφράζει την εκλυόμενη ενέργεια κατά την έκρηξη μιας εκρηκτικής ύλης. Κατά τη διάρκεια μιας έκρηξης, η χημική ενέργεια μετατρέπεται σε ενέργεια πίεσης όπου πυκνά μόρια αερίων έχουν υψηλή κινητική ενέργεια. Αυτή καταναλώνεται κυρίως κρουστικά με την άσκηση σχεδόν στατικής πίεσης και προκαλώντας μετακίνηση, θραύση, δόνηση, τριβή κ.α.

Η ενέργεια εκφράζεται κατά μονάδα βάρους εκρηκτικής ύλης και κατά μονάδα όγκου εκρηκτικής ύλης. Αλλά και ως απόλυτη ισχύς ή σχετική ισχύς σε σχέση με κάποια άλλη εκρηκτική ύλη αναφοράς. Έτσι προκύπτουν:

- Απόλυτη ισχύς κατά βάρος (Absolute weight strength - AWS). Εκφράζεται συνήθως σε cal/g ή J/g.
- Απόλυτη ισχύς κατ' όγκον (Absolute bulk strength - ABS). Εκφράζεται συνήθως σε cal/cm³ ή J/cm³.
- Σχετική ισχύς κατά βάρος (Relative weight strength - RWS). Εκφράζεται σε σχέση με κάποια εκρηκτική ύλη, όπως NG, AN κ.τ.λ.
- Σχετική ισχύς κατ' όγκον (Relative bulk strength - RBS). Εκφράζεται σε σχέση με κάποια εκρηκτική ύλη, όπως NG, AN κ.τ.λ.

Μέθοδοι μέτρησης της ισχύος έκρηξης:

- Δοκιμή Trauzl.
- Δοκιμή βαλλιστικού εκκρεμούς.
- Δοκιμή Hess.
- Δοκιμή κρατήρα.

2.2.4 Ισοδυναμία TNT

Χαρακτηριστική περίπτωση είναι η ισοδυναμία TNT για τον υπολογισμό της ενέργειας που απελευθερώνεται σε μία έκρηξη. Ως παραδοχή θεωρήθηκε ότι κατά την έκρηξη TNT

προκύπτουν 4184 J/g. Στην πραγματικότητα αποδείχθηκε ότι η σωστή τιμή είναι 4686 J/g πρακτικά και 4853 J/g θεωρητικά. Όμως, λόγω του ότι ήδη υπήρχε σε εφαρμογή η τιμή των 4184 J/g διατηρήθηκε και στη συνέχεια μέχρι σήμερα. Η ισοδυναμία TNT αποτελεί ένα από τα πλέον σημαντικά στοιχεία για τον χαρακτηρισμό μιας εκρηκτικής ύλης. Ωστόσο, δεν υπάρχει κοινή μεθοδολογία παγκοσμίως για τον υπολογισμό της ισοδυναμίας TNT μιας συγκεκριμένης εκρηκτικής ύλης.

Όπως θα δούμε παρακάτω για την κλιμακωτή απόσταση (σχέση 3.10), $Z = R/(W^{1/3})$ όπου R η απόσταση από το κέντρο της έκρηξης σε m, και W το εκρηκτικό φορτίο εκφρασμένο σε ισοδύναμα κιλά TNT, η χρήση του TNT ως εκρηκτικού «αναφοράς» στη διαμόρφωση του Z είναι καθορισμένη. Το πρώτο στάδιο στον προσδιορισμό των κυμάτων έκρηξης από άλλες πηγές εκτός του TNT είναι η μετατροπή της πραγματικής μάζας του φορτίου σε ισοδύναμη μάζα TNT. Ωστόσο, δεν υπάρχει καθολικά αποδεκτή προσέγγιση για την αξιολόγηση της ισοδυναμίας TNT οποιουδήποτε εκρηκτικού. Βέβαια, υπάρχουν ενδείξεις ότι ένα συγκεκριμένο εκρηκτικό υλικό μπορεί να έχει ισοδυναμία TNT που εξαρτάται από το Z .

Ο απλούστερος τρόπος αξιολόγησης της ισοδυναμίας TNT ενός συγκεκριμένου εκρηκτικού είναι να πολλαπλασιαστεί η μάζα της εκρηκτικής ύλης με έναν συντελεστή ισοδυναμίας με βάση τη συγκεκριμένη ενέργεια του και εκείνη του TNT. Μια ισοδυναμία TNT που είναι μεγαλύτερη από την μονάδα δείχνει ότι η ειδική ενέργεια της εκρηκτικής ύλης είναι μεγαλύτερη αυτής του TNT.

Οι συντελεστές ισοδυναμίας TNT για έναν αριθμό εκρηκτικών υλών παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1. Από τον πίνακα φαίνεται, για παράδειγμα, ότι μια φόρτιση 100 kg της χημικής ένωσης B (Compound B) μετατρέπεται σε 114,8 kg TNT, καθώς ο λόγος των συγκεκριμένων ενεργειών είναι 5190/4520 (=1.148).

Πίνακας 2.1: Συντελεστές μετατροπής για εκρήξεις [Cormie D. et al.].

Explosive	Mass specific energy Q_x (kJ/kg)	TNT equivalent (Q_x/Q_{TNT})
Nitroglycerin (liquid)	6700	1.481
C4 (91% RDX)	–	1.19–1.37
HMX	5680	1.256
Semtex	5660	1.250
RDX (cyclonite)	5360	1.185
Compound B (60% RDX 40% TNT)	5190	1.148
TNT	4520	1.000
Blasting gelatin	4520	1.000
ANFO (94% ammonium nitrate, 6% fuel oil) [6]	3932	0.870
60% nitroglycerin dynamite	2710	0.600

Μια εναλλακτική μέθοδος που προτείνεται από το “US Army Corps of Engineers” χρησιμοποιεί δύο συντελεστές μετατροπής που επιτρέπουν τη διαφοροποίηση της συσχέτισης μιας εκρηκτικής ύλης με το TNT όσον αφορά στην ώθηση και όσον αφορά στην πίεση p_s . Έτσι, άλλος συντελεστής μετατροπής υπάρχει για την ώθηση και άλλος για την πίεση παρότι πρόκειται για την ίδια εκρηκτική ύλη. Έτσι, για την Ένωση B το γεγονός

ότι και οι δύο παράγοντες είναι μικρότεροι από 1,148 είναι χαρακτηριστικό των προβλημάτων στον οριστικό προσδιορισμό της ισοδυναμίας.

Σύμφωνα με τους Cormie D. et al., η ισοδυναμία TNT ενός αυτοσχεδιασμένου εκρηκτικού όπως το ANFO (νιτρικό αμμώνιο - μαζούτ) είναι δύσκολο να προσδιοριστεί λόγω της μεταβλητότητας της σύνθεσής του και της ποιότητας του ελέγχου που χρησιμοποιείται στην κατασκευή του. Έχουν προταθεί συντελεστές ισοδύναμοι με TNT που κυμαίνονται από 0,4 (για χαμηλής ποιότητας αυτοσχέδια εκρηκτικά) έως και σχεδόν της μονάδας. Συνήθως χρησιμοποιείται συντελεστής ισοδυναμίας 0,87 τόσο για την πίεση όσο και για την ώθηση.

Για εκρήξεις νέφους καυσίμου - αέρα ή ατμού, η ισοδυναμία TNT είναι εξίσου δύσκολο να προσδιοριστεί με ακρίβεια, αν και μερικές φορές χρησιμοποιείται συντελεστής μεταξύ 0,4 και 0,6.

2.2.5 Ποιότητα παραγόμενων αερίων

Σε περίπτωση πραγματοποίησης μιας ιδανικής έκρηξης, μια εκρηκτική ύλη δεν παράγει τοξικά αέρια. Όταν, όμως, η αντίδραση της έκρηξης δεν είναι ισοζυγισμένη με το οξυγόνο, τότε παράγονται τοξικά αέρια, όπως το CO, διάφορα οξείδια του αζώτου NO_x κ.α. Άλλοι λόγοι που μπορούν να οδηγήσουν στην παραγωγή τοξικών αερίων είναι η ανεπαρκής έναυση, η μειωμένη ανθεκτικότητα στην υγρασία, η πλημμυελής γόμωση κ.α. Ωστόσο, όταν πρόκειται για υπαίθριες ανατινάξεις, τα τοξικά αέρια διαλύονται άμεσα στην ατμόσφαιρα. Το σημαντικό πρόβλημα βρίσκεται στις υπόγειες ανατινάξεις όπου ο αερισμός είναι δύσκολος. Οι εκρηκτικές ύλες ταξινομούνται σε τάξεις (fumeclases/ratings).

2.2.6 Αντίσταση στο νερό

Μέσα από την αντίστασή της στο νερό προσδιορίζεται η δυνατότητα της εκρηκτικής ύλης να εκρήγνυται με την έκθεσή της σε υγρό περιβάλλον. Υπάρχουν εκρηκτικές ύλες με καλή αντίσταση στο νερό που μπορούν να εκρήγνυται επιτυχώς αν εκτεθούν για μικρό χρονικό διάστημα ενώ υπάρχουν εκρηκτικές ύλες με εξαιρετική αντίσταση στο νερό όταν εκρήγνυται επιτυχώς και εκτίθενται στο νερό για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Η εκπομπή καπνών σε διάφορα ιδιαίτερα χρώματα κατά την έκρηξη μιας εκρηκτικής ύλης δείχνει ότι η εκρηκτική ύλη έχει πιθανώς αλλοιωθεί από προηγούμενη έκθεση σε υγρό περιβάλλον. Γενικά η υγροσκοπικότητα μιας εκρηκτικής ύλης αποτελεί δείγμα για το κατά πόσο είναι ανθεκτική σε έκθεση σε υγρό περιβάλλον (υγροσκοπικότητα: η ιδιότητα μιας ύλης να προσλαμβάνει υγρασία).

2.3 Λειτουργία της έκρηξης (χημικής) εκρηκτικής ύλης

Σύμφωνα με τον Καμπούρη Ε. (1984), κατά την έκρηξη η χημική εκρηκτική ύλη αποσυντίθεται σε χρόνο 0,0001 sec (χρόνος έκρηξης), ενώ τα αέρια που παράγονται αναπτύσσουν πιέσεις μέχρι και 700 τόνους ανά τετραγωνική ίντσα. Η θερμοκρασία κατά την έκρηξη ισχυρής εκρηκτικής ύλης ανέρχεται στους 3.000 έως 4.000 βαθμούς Κελσίου. Μία ποσότητα της ενέργειας που εκλύεται δαπανάται για τη διάρρηξη - αποσύνθεση της εκρηκτικής ύλης και τη δημιουργία θραυσμάτων, ενώ όλη η υπόλοιπη ενέργεια συμπιέζει τον αέρα που βρίσκεται γύρω από το σημείο της έκρηξης. Η συμπύεση αυτή είναι το αίτιο παραγωγής του εκρηκτικού του αέρα κινείται γρήγορα, με φορά απομάκρυνσης από το κέντρο της έκρηξης σαν μία αέρια σφαίρα, η εξωτερική επιφάνεια της οποίας εμφανίζεται σαν μέτωπο λεπτότατου πάχους (περίπου 0,001 χιλιοστά) το οποίο καλείται κρουστικό

μέτωπο. Αυτό κινείται με αρχική ταχύτητα πολύ μεγαλύτερη του ήχου (1.100 πόδια/δευτερόλεπτο), η οποία όμως ελαττώνεται γρήγορα και κάποια στιγμή τα θραύσματα που ακολουθούν προηγούνται του κρουστικού μετώπου. Αυτό συμβαίνει διότι η επιβράδυνση που προκαλείται από την αντίσταση του αέρα είναι ανάλογη προς την επιφάνεια του κινούμενου σώματος. Ενώ η επιφάνεια και το μέγεθος των θραυσμάτων παραμένουν σταθερά η επιφάνεια του κρουστικού μετώπου αυξάνει όσο απομακρύνεται από το κέντρο της έκρηξης. Το κρουστικό μέτωπο ασκεί μία απότομη κρούση και πίεση μικρής διάρκειας, η οποία προκαλεί αντιστροφή της κίνησης του αέρα προς το κέντρο της έκρηξης. Εξαιτίας αυτού του φαινομένου ένα ελαφρύ αντικείμενο, που βρέθηκε κοντά στο κέντρο της έκρηξης, εκσφενδονίζεται μακριά αλλά στη συνέχεια επανέρχεται, υπό την επίδραση της αντιστροφής κίνησης του αέρα. Για το γκρέμισμα ή την καταστροφή μίας κατασκευής ή πετρωμάτων, κ.λπ. πρέπει η μέγιστη πίεση και η ώθηση του εκρηκτικού κύματος να ξεπεράσουν ορισμένες τιμές χαρακτηριστικές του αντικειμένου στο οποίο απευθύνεται η έκρηξη. Άλλες κατασκευές ή πετρώματα καταβάλλονται από την ισχυρή κρούση του κρουστικού μετώπου και άλλες από την παρατεινόμενη πίεση του ωστικού κύματος. Σημειώνεται ότι με έκρηξη σε περιορισμένο χώρο τα εκρηκτικά αποτελέσματα ενισχύονται λόγω της ανάκλασης του εκρηκτικού κύματος πάνω στις περιοριστικές επιφάνειες. Τέλος αν το εκρηκτικό κύμα που δημιουργείται από την έκρηξη εκρηκτικής ύλης και ενώ διατηρεί ακόμη την κατάλληλη ενέργεια συναντήσει άλλη εκρηκτική ύλη τότε την διεγείρει και της προκαλεί έκρηξη, η οποία αποκαλείται συμπαθητική έκρηξη κύματος, το οποίο χαρακτηρίζεται από: το κρουστικό μέτωπο, το ωστικό κύμα και την αραιώση των αερίων στο χώρο της έκρηξης. Αμέσως μετά την έκρηξη τα αέρια προϊόντα αυτής, τα οποία βρίσκονται σε κατάσταση υψηλής πίεσης εκτονώνονται και αρχίζουν να πιέζουν τη στοιβάδα του αέρα, που βρίσκεται δίπλα τους και τελούσε μέχρι εκείνη τη στιγμή σε ατμοσφαιρική ισορροπία.

2.4 Κατηγοριοποίηση εκρηκτικών υλών

Σε μία χημική έκρηξη γίνεται ταχεία οξειδωση της εκρηκτικής ύλης. Η φύση της ύλης μπορεί να είναι είτε στερεή, είτε υγρή, είτε αέρια. Οι χημικές εκρήξεις ταξινομούνται σε δύο βασικά είδη και, αντίστοιχα, προκύπτει ένας βασικός τρόπος κατηγοριοποίησης των εκρηκτικών υλών:

- Εκρήξεις συμπτωκνωμένης φάσης: Η οξειδωση στην περίπτωση αυτή οδηγεί στη βίαιη εκτόνωση αερίων και στην απελευθέρωση θερμότητας. Συνακόλουθα, προκαλούνται εκρηκτικά κύματα στον αέρα και κρουστικές πιέσεις στα παρακείμενα στερεά σώματα στιγμιαία. Η έκρηξη αυτού του τύπου ονομάζεται κατάρρηξη [Κρουστικό κύμα – Μικρότερη διάρκεια θετικής φάσης – Υψηλότερο εύρος – Υπερηχητική ταχύτητα κύματος – Εκρηκτικές ύλες υψηλής ισχύος].
- Εκρήξεις νέφους αερίων: Ένα νέφος εύφλεκτου ρευστού έχει διασκορπισθεί σε ένα οξειδωτικό σώμα και αναφλέγεται με αποτέλεσμα το μίγμα του ρευστού και του σώματος σταδιακά να υπόκειται σε κατάκαυση και να δημιουργεί κύμα πίεσης. Η έκρηξη αυτού του τύπου χαρακτηρίζει και τα προωθητικά υλικά και ονομάζεται κατάκαυση [Κύμα πίεσης – Μεγαλύτερη διάρκεια θετικής φάσης – Χαμηλότερο εύρος - Υποχημητική ταχύτητα κύματος – Εκρηκτικές ύλες περιορισμένης ισχύος].

Ωστόσο, οι εκρηκτικές ύλες που προκαλούν τις εκρήξεις κατηγοριοποιούνται κατά κόρον ανάλογα με την ευκολία πυροδότησής τους ή αλλιώς ευαισθησίας τους. Η ευκολία πυροδότησης των εκρηκτικών υλών είναι ένα σημαντικό μέγεθος δεδομένου ότι τελικά καθορίζει σε σημαντικό βαθμό την επιτυχία και το κόστος τους.

Επιπλέον, ένας θεμελιώδης τρόπος διαχωρισμού των εκρηκτικών υλών είναι μέσα από τη σύστασή τους. Υπό αυτήν την οπτική, είναι διαφορετική η σύσταση των εκρηκτικών

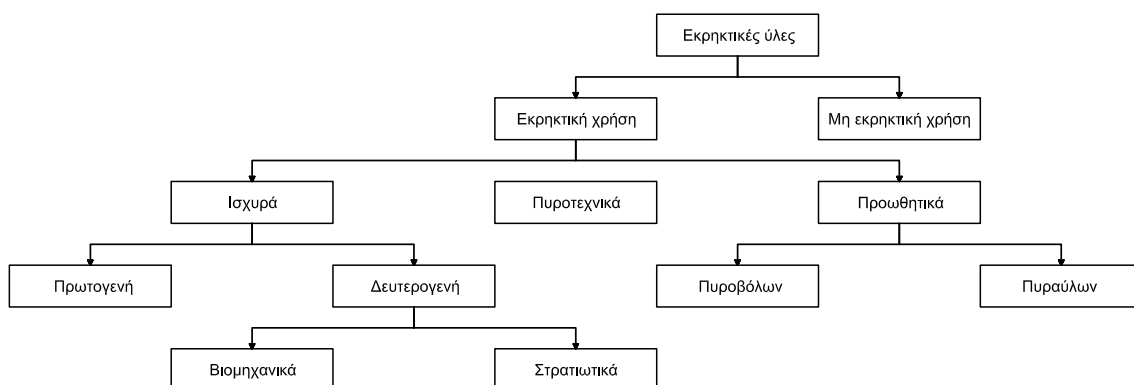
υλών ανάλογα με το αν είναι χημικές ουσίες (όπως η γλυκερίνη) ή αν αποτελούν μίξη χημικών στοιχείων (όπως ο δυναμίτης). Ο συγκεκριμένος τρόπος κατηγοριοποίησης μπορεί να επεκταθεί σε ταξινόμηση ανάλογα με μοριακές ομάδες.

Σημαντικό είδος κατηγοριοποίησης, όμως, αποτελεί και η χρήση των εκρηκτικών υλών. Οπότε, αρχικά διαχωρίζονται σε αυτά που έχουν ως σκοπό τους την εκρηκτική χρήση και μετέπειτα, ανάλογα με τον σκοπό της έκρηξης, προκύπτει αν πρόκειται για ισχυρά εκρηκτικά, για προωθητικά (πυροβόλων ή πυραύλων) και για πυροτεχνικά. Τα ισχυρά εκρηκτικά στην πορεία χωρίζονται στα πρωτογενή και στα δευτερογενή που έχουν ή βιομηχανική ή στρατιωτική χρήση.

Βασικοί ορισμοί των ανωτέρω που δεν έχουν προαναφερθεί:

- Δευτερογενή εκρηκτικά: Εκρηκτικά τα οποία λόγω της περιορισμένης ευαισθησίας τους, καθίσταται δυσχερής η διαδικασία κατάρρηξής τους κι έτσι χρειάζονται τα πρωτογενή εκρηκτικά, ώστε να προκληθεί η κατάρρηξή τους (όπως το TNT).
- Εκρηκτικές ύλες με μη εκρηκτική χρήση: Παράγονται με σκοπό τη μη αξιοποίηση της έκρηξής τους (όπως τα ζιζανιοκτόνα).
- Πυροτεχνικά: Παράγονται με σκοπό την παρουσίαση ειδικών εφέ (όπως τα βεγγαλικά).
- Προωθητικά υλικά: Υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται για την εκτόξευση αντικειμένων, όπως μια σφαίρα ή έναν πύραυλο. Περιέχουν τα ίδια το απαραίτητο οξυγόνο για την καύση και γενικότερα δεν εκρήγνυνται αλλά καίγονται με τρόπο βίαιο (όπως η πυρίτιδα).
- Πρωτογενή εκρηκτικά: Εκρηκτικά με ταχεία μετάβαση από την ανάφλεξη στην κατάρρηξη και με σκοπό να μεταδώσουν την κατάρρηξή τους σε λιγότερο ευαίσθητα εκρηκτικά. Τα ίδια έχουν μεγάλη ευαισθησία σε κρουστικά κύματα, τριβή, υψηλές θερμοκρασίες και ηλεκτρικούς σπινθήρες (όπως το αζίδιο του μολύβδου).
- Ενισχυτές: Υλικά που καλύπτουν το κενό ανάμεσα σε έναν τυπικό εκπυρσοκροτητή και μια χαμηλής ευαισθησίας εκρηκτικής ύλης, με την πυροδότησή τους αρχικά από τον εκπυρσοκροτητή και την εν συνεχεία εκπυρσοκρότηση από τα ίδια της εκρηκτικής ύλης (τριτογενής). Πρόκειται στην πραγματικότητα για δευτερογενές εκρηκτικό.
- Ευαισθητοποιητές: Υλικό με σκοπό την αδρανοποίηση των εκρηκτικών με την αύξηση της σταθερότητας και τον περιορισμό της ευαισθησίας τους, όπως το κερί παραφίνης (paraffin wax), το TNT, το χαρτί, το νερό κ.α.

Στο σχήμα 2.1 γίνεται η κατηγοριοποίηση των εκρηκτικών υλών ανάλογα με τη χρήση τους



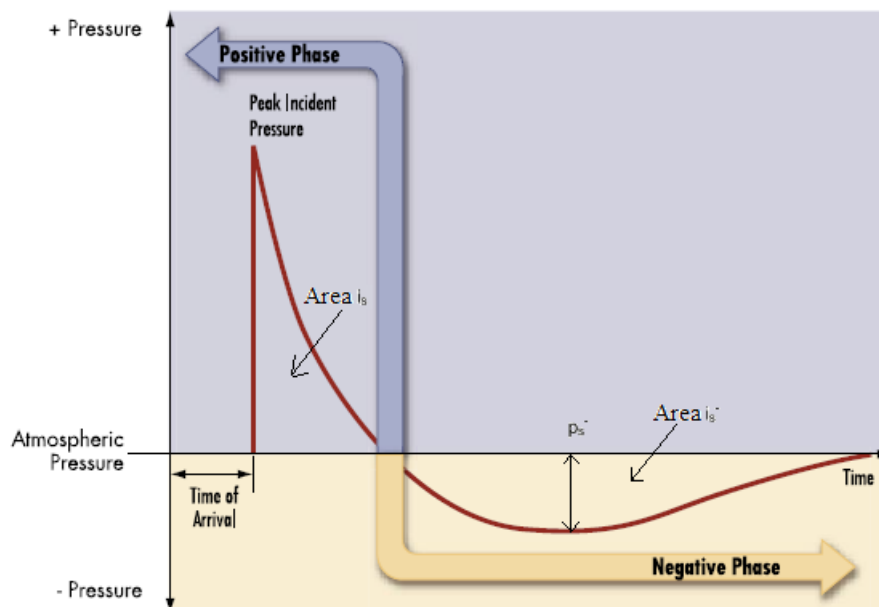
Σχήμα 2.1: Κατηγοριοποίηση των εκρηκτικών υλών ανάλογα με τη χρήση τους.

3 Φυσική των εκρήξεων

Αρχικά δίνονται αναλυτικά οι διαδικασίες που συντρέχουν κατά την έκρηξη των δύο διαφορετικών μορφών που προαναφέρθηκαν, δηλαδή της έκρηξης συμπυκνωμένης φάσης και της έκρηξης νέφους αερίων.

3.1 Έκρηξη συμπυκνωμένης φάσης

Σε μια έκρηξη συμπυκνωμένης φάσης, μετά την έναυση της εκρηκτικής ύλης παράγονται θερμά αέρια που βρίσκονται σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Τα αέρια αυτά διογκώνονται απότομα εξωθώντας τον γύρω αέρα εκτός του όγκου που καταλαμβάνει και αναγκάζοντάς τον να συμπιεστεί. Έτσι, δημιουργείται το εκρηκτικό κύμα το οποίο περιέχει την ενέργεια πίεσης η οποία περιλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της χημικής ενέργειας της έκρηξης. Λόγω της διαφοράς ανάμεσα στο πλέον συμπιεσμένο στρώμα αέρα εντός του εκρηκτικού κύματος και στον ελεύθερα διασκορπισμένο πέριξ αέρα, το εκρηκτικό κύμα ξεκινά από το κέντρο της έκρηξης και ταξιδεύει έξωθεν με πίεση συνεχώς μειούμενη όσο απομακρύνεται από το κέντρο. Η ορμή των αερίων τα αναγκάζει να υπερδιογκωθούν προκαλώντας έτσι μια μείωση κάτω από τα επίπεδα της ατμοσφαιρικής πίεσης στο πέρας του εκρηκτικού κύματος. Αυτή η αρνητική φάση όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1, το οποίο παρουσιάζει το διάγραμμα πίεσης – χρόνου εκρηκτικού κύματος συμπυκνωμένης φάσης (κατάρρηξη), αναγκάζει τα γύρω μόρια των αερίων να επιβραδύνουν και η ροή να αντιστραφεί προς το κέντρο της έκρηξης. Τελικά, με αυτόν τον τρόπο αποκαθίσταται η ισορροπία.



Σχήμα 3.1: Τυπική χρονοϊστορία πίεσης [βασισμένο από Chipley, M. (2003)].

Σύμφωνα με Chipley, M. (2003), το μέγεθος και η κατανομή των φορτίων έκρηξης σε μία κατασκευή εξαρτάται από διάφορους παράγοντες:

- Ιδιότητες εκρηκτικών (τύπος υλικού, ενέργεια που απελευθερώνεται, και ποσότητα της έκρηξης)
- Απόσταση της έκρηξης από το κτίριο
- Ενίσχυση του παλμού της πίεσης μέσω της αλληλεπίδρασης με το έδαφος ή το κτίριο (ανακλάσεις).

Για την εξαγωγή της πίεσης σε σχέση με το χρόνο ο Friedlander πρότεινε την εξής σχέση:

$$p(t) = p_s \times \left(1 - \frac{t}{t_0}\right) \times \exp\left(-\frac{b \times t}{t_0}\right), \quad (3.1)$$

b: Παράμετρος σχήματος του κύματος

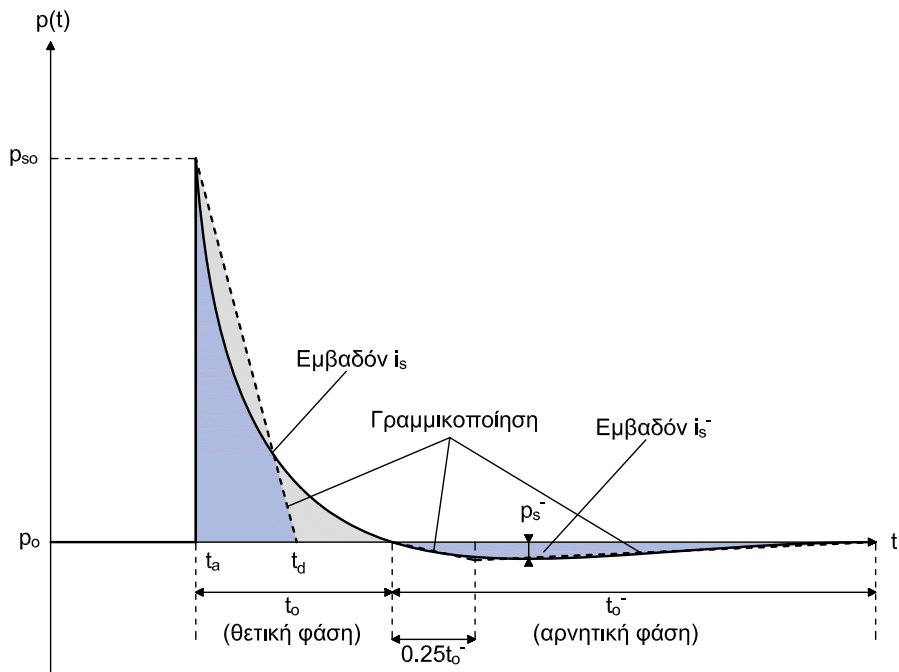
Σύμφωνα με τους H. Draganić, V. Sigmund, το μέτωπο του κύματος έρχεται σε μια συγκεκριμένη θέση στον χρόνο t_A , και μετά την αύξηση σε μια μέγιστη τιμή p_{s0} , η μέγιστη πίεση μειώνεται στην τιμή της ατμοσφαιρικής πίεσης τη στιγμή t_0 που αντιπροσωπεύει τη θετική φάση. Αυτή ακολουθείται από μια αρνητική φάση με διάρκεια t_0^- η οποία συνήθως είναι πολύ μεγαλύτερη από τη θετική φάση και χαρακτηρίζεται από αρνητική πίεση (κάτω από την ατμοσφαιρική) με μέγιστη τιμή p_{s0}^- και αντίστροφη ροή σωματιδίων. Η ώθηση που σχετίζεται με το κύμα είναι η επιφάνεια κάτω από την καμπύλη χρόνου πίεσης και υποδεικνύεται με i_s για τη θετική φάση και i_s^- για την αρνητική φάση.

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 1, υπάρχουν αρκετές αβεβαιότητες και υποθέσεις στον σχεδιασμό και στην ανάλυση των εκρήξεων, ακόμα και όταν χρησιμοποιούνται δυναμικές φορτίσεις και αποκρίσεις. Επομένως, είναι σημαντικό κάτω από ορισμένες συνθήκες, να υιοθετηθεί μια ισοδύναμη μεθοδολογία, η οποία είναι προσιτή σε επαγγελματίες πολιτικούς μηχανικούς.

Όσον αφορά τη φόρτιση, πολλές φορές γίνεται για λόγους ευχρησίας γραμμικοποίηση της σχέσης καθιστώντας τη διάρκεια πλέον της θετικής φάσης ως t_d (Σχήμα 3.2). Η γραμμικοποίηση προκύπτει από τη διατήρηση της ίδιας ώθησης, δηλαδή του ίδιου εμβαδού της θετικής φάσης. Πιο συγκεκριμένα, η ισοδύναμη αυτή φόρτιση προσαρμόζεται έτσι ώστε να ταιριάζει στη μέγιστη ανακλώμενη πίεση (p_s) και στη συνολική ανακλώμενη ώθηση (i_s) της θετικής φάσης του φορτίου, έτσι ώστε η διάρκεια σχεδιασμού:

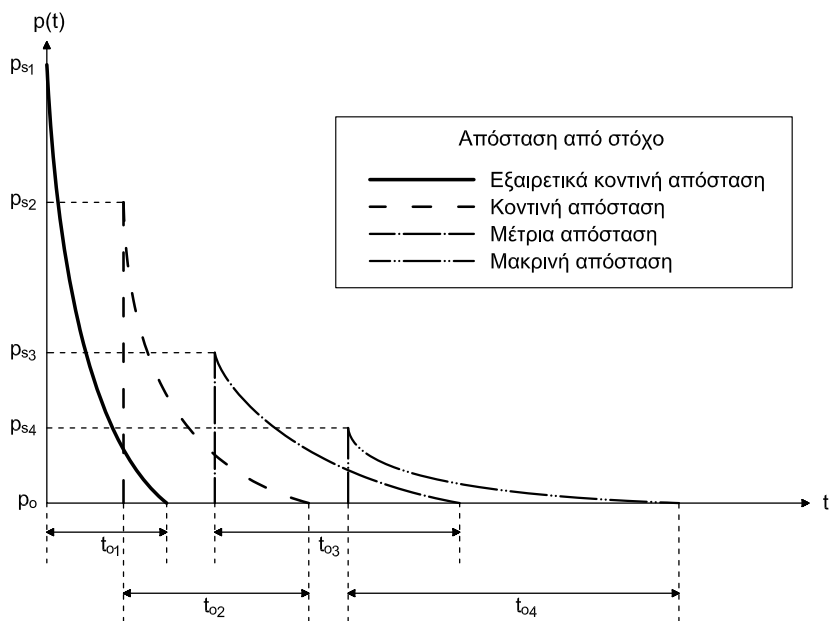
$$t_d = \frac{2 \times i_s}{p_s}, \quad (3.2)$$

Οι τιμές i_s και p_s εξαρτώνται από την απόσταση της έκρηξης R και το μέγεθος του εκρηκτικού φορτίου W , τα οποία συνδυάζονται ώστε να καθορίσουν την κλιμακωτή απόσταση όπως φαίνεται παρακάτω στη σχέση 3-10. Η αρνητική φάση δε λαμβάνεται υπόψη αφού συνήθως έχει μικρή επίδραση στη μέγιστη απόκριση.

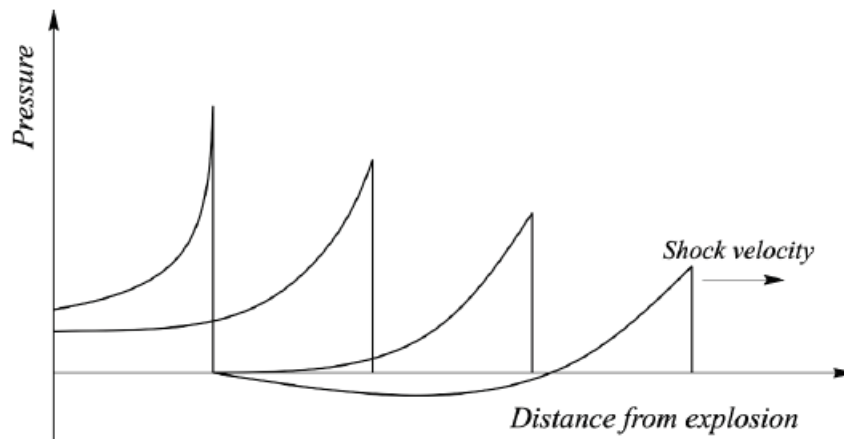


Σχήμα 3.2: Διάγραμμα πίεσης – χρόνου εκρηκτικού κύματος συμπυκνωμένης φάσης(κατάρρηξη) με γραμμικοποίηση [βασισμένο από Chipley, M. (2003)].

Σημαντικό ρόλο παίζει, επίσης, η απόσταση από τον στόχο (Stand-off distance) η οποία καθορίζει σημαντικά το φορτίο που δέχεται η υπόψιν κατασκευή. Από το Σχήμα 3.3, φαίνεται πως όσο μεγαλώνει η απόσταση από τον στόχο, μεγαλώνει ο χρόνος άφιξης του εκρηκτικού κύματος, ενώ ταυτόχρονα, οι μέγιστες πιέσεις μειώνονται δραματικά. Αυτό επιβεβαιώνεται και στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα πίεσης – χρόνου εκρηκτικού κύματος για διάφορες αποστάσεις από τον στόχο [Chipley, M. (2003)].

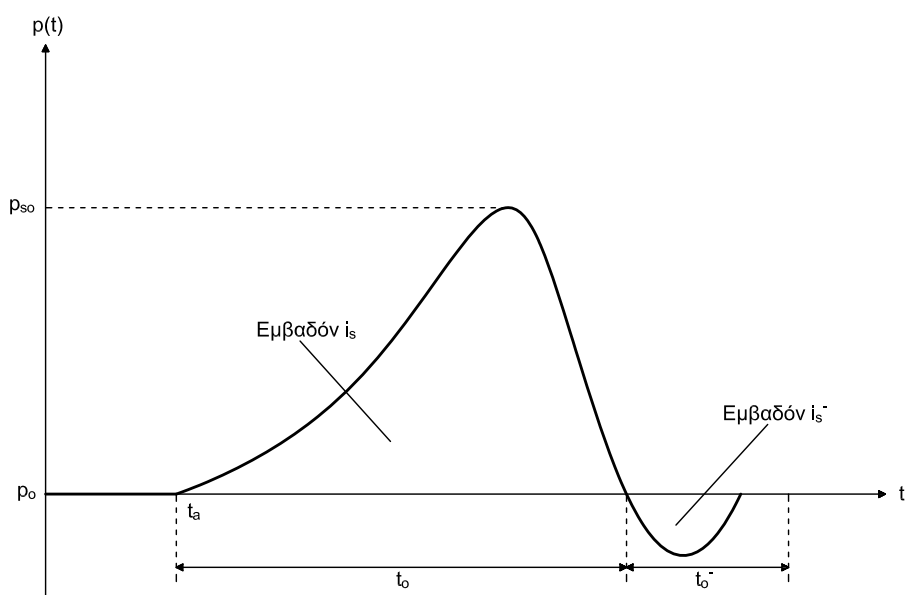


Σχήμα 3.4: Μεταβολή πίεσης με την απόσταση [Draganić H., Sigmund V.].

3.2 Έκρηξη νέφους αερίων

Κατά την έκρηξη ενός νέφους αερίων η καύση λαμβάνει χώρα σε μεγάλο χώρο με αποτέλεσμα το κύμα πίεσης που παράγεται να αλληλοεπιδρά με το γύρω περιβάλλον ταυτόχρονα με την ακόμη συνεχιζόμενη καύση. Όσο εξελίσσεται η καύση, τόσο αυξάνει η τύρβη μεγαλώνοντας το μέτωπο φλόγας και, συνακόλουθα, τον ρυθμό καύσης. Αυτό σε συνδυασμό με το γεγονός ότι το μέτωπο φλόγας δεν είναι ενιαίο και ομοιόμορφο αλλά έχει ακανόνιστο σχήμα και, άρα, το βοηθάει να προχωράει προσπερνώντας κομμάτια στα οποία δεν έχει ήδη φτάσει η φλόγα. Έτσι, χάριν των παραπάνω αιτιών το μέτωπο φλόγας προχωρά γρήγορα. Η ταχύτητα αυτή είναι που κρίνει πόσο υψηλή θα είναι η μέγιστη υπερπίεση που προκαλείται. Στο σχήμα 3.5 δίνεται το διάγραμμα πίεσης – χρόνου κύματος πίεσης.

Επιπλέον, η στοιχειομετρία του μίγματος καυσίμου – αέρα παίζει σημαντικό ρόλο αφού καθορίζει πόσο ιδανική ή όχι είναι η αντίδραση. Η ιδανική αγγίζεται όταν η καύση ολοκληρώνεται καταναλώνοντας πλήρως τον αέρα και το καύσιμο. Μπορεί, όμως, το καύσιμο να είναι λιγότερο ή περισσότερο από όσο χρειάζεται. Αλλά η πιο έντονη αντίδραση προκύπτει όσο ο λόγος αέρα – καυσίμου είναι κοντύτερα στον στοιχειομετρικό λόγο. Ενώ, επιπροσθέτως, σημαντικό παράγοντα αποτελεί το σημείο ανάφλεξης, δεδομένης της ακατάστατης διασποράς του καυσίμου. Μια κεντρική θέση ανάφλεξης θα προκαλούσε σημαντικότερες υπερπίεσεις από ότι μια απομακρυσμένη θέση.



Σχήμα 3.5: Διάγραμμα πίεσης – χρόνου κύματος πίεσης νέφους αερίων (κατάκαυση) [Ιωάννου Ο.].

Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση του DDT (Deflagration to detonation transition) κατά την οποία μια έκρηξη τύπου κατάκαυσης αρχίζει να αποκτά τις ιδιότητες μιας έκρηξης τύπου κατάρρηξης και εξελίσσεται σαν αυτήν. Πιο συγκεκριμένα, ιδιαίτερα σε περιορισμένες συνθήκες (για παράδειγμα σε ένα κλειστό δωμάτιο) η εξέλιξη της καύσης από υποηχητική μετατρέπεται σε υπερηχητική και πλέον εφαρμόζει στο περίξ περιβάλλον υψηλές πιέσεις που είναι κοινές σε μέγεθος με αυτές της κατάρρηξης.

3.3 Διαφορές έκρηξης συμπυκνωμένης φάσης και έκρηξης νέφους αερίων

Οι βασικές διαφορές έκρηξης συμπυκνωμένης φάσης με έκρηξη νέφους αερίων που προκύπτουν, είναι οι εξής:

Πίνακας 3.1: Σύγκριση έκρηξης συμπυκνωμένης φάσης με έκρηξη νέφους αερίων.

	Συμπυκνωμένη φάση	Νέφος αερίων
Περιβάλλον χώρος	Δεν επηρεάζει	Επηρεάζει
Εύρος	Υψηλότερο	Χαμηλότερο
Διάρκεια θετικής φάσης	Μικρότερη	Μεγαλύτερη
Κύμα	Κρουστικό	Πίεσης
Ταχύτητα	Υπερηχητική	Υποηχητική
Εκρηκτικές ύλες	Υψηλής ισχύος	Περιορισμένης ισχύος
Είδος έκρηξης	Κατάρρηξη	Κατάκαυση

3.4 Χαρακτηριστικά εκρηκτικού κύματος

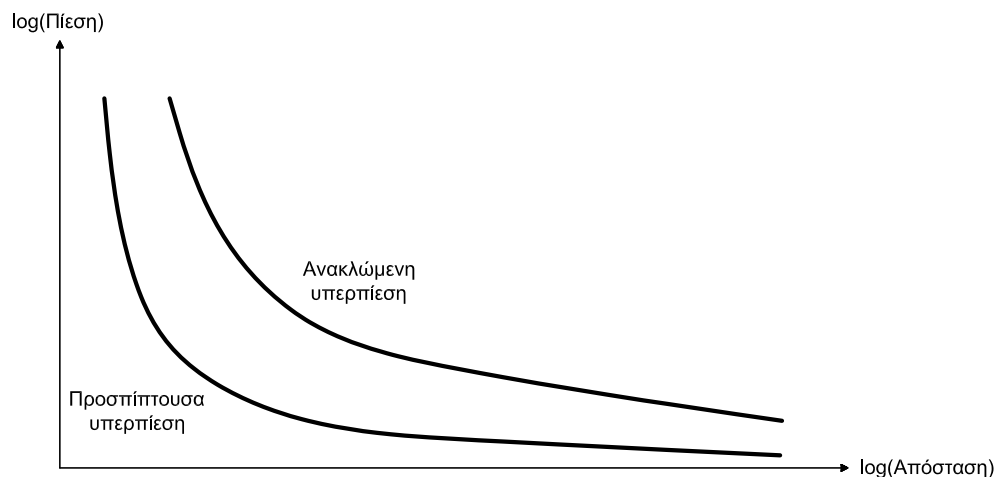
Τα διαγράμματα πίεσης – χρόνου αφορούν ένα αντικείμενο το οποίο βρίσκεται στον δρόμο του εκρηκτικού κύματος αλλά δεν έχει τη δυνατότητα να το επηρεάσει. Δέχεται

ενέργεια από το εκρηκτικό κύμα υπό τη μορφή της ενέργειας πίεσης. Η πίεση που δέχεται ονομάζεται προσπίπτουσα υπερπίεση p_s .

Γενικότερα, όμως, όταν το εκρηκτικό κύμα συναντήσει μια στερεή επιφάνεια, τότε ανακλάται ή και υπόκειται σε περίθλαση γύρω της (ανάλογα με το μέγεθος της επιφάνειας). Απλούστερη μορφή ενός τέτοιου παραδείγματος αποτελεί μια απείρως μεγάλη, στιβαρή και προκαλώντας ολική ανάκλαση επιφάνεια (όπως το έδαφος σε μια έκρηξη σε ελεύθερο περιβάλλον ή ένα τεράστιο κτίριο). Κατά την ανάκλαση, δημιουργείται τοπικά μια ζώνη περαιτέρω πίεσης στην οποία η επιφάνεια προκαλεί τα μόρια του αέρα να αποκτήσουν αντίθετη ορμή. Η αλλαγή της ορμής αυξάνει τοπικά την πίεση και την φτάνει πάνω από τα επίπεδα της προσπίπτουσας πίεσης. Η πίεση αυτή ονομάζεται μέγιστη ανακλώμενη υπερπίεση p_r .

Η μέγιστη πίεση βρίσκεται στο μέτωπο του εκρηκτικού κύματος και ονομάζεται μέγιστη προσπίπτουσα υπερπίεση p_{s0} ενώ υπάρχει και η μέγιστη δυναμική υπερπίεση q_s η οποία αφορά την πίεση που ασκείται σε ένα αντικείμενο λόγω της ταχύτητας του αέρα που το προσπερνά.

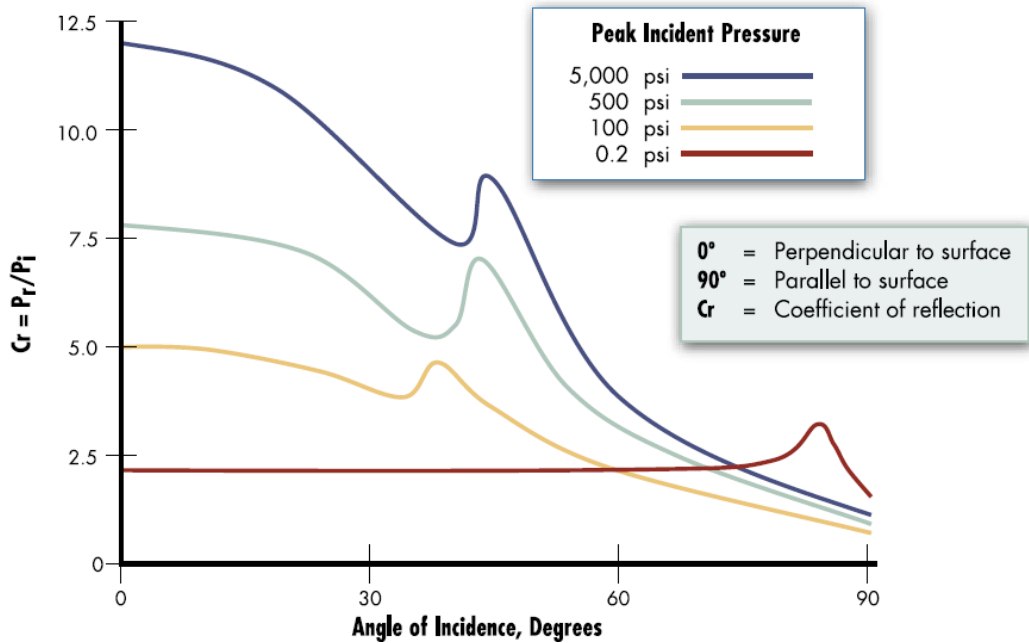
Γενικότερα, η ανακλώμενη υπερπίεση, σύμφωνα με Chipley, M. (2003), είναι πάντα μεγαλύτερη από την προσπίπτουσα υπερπίεση, για την ίδια απόσταση από την έκρηξη (Σχήμα 3.6). Η ανακλώμενη υπερπίεση διαφέρει με τη γωνία πρόσπτωσης του εκρηκτικού κύματος. Όταν το εκρηκτικό κύμα προσκρούει σε μία επιφάνεια που βρίσκεται κάθετα στη διεύθυνσή της, τότε εκεί θα δημιουργηθεί η μέγιστη ανακλώμενη υπερπίεση. Αντίστοιχα, όταν η επιφάνεια βρίσκεται παράλληλα στο εκρηκτικό κύμα, τότε εκεί θα δημιουργηθεί η ελάχιστη ανακλώμενη ή προσπίπτουσα υπερπίεση. Πέρα από τη γωνία πρόσπτωσης, το μέγεθος της μέγιστης ανακλώμενης υπερπίεσης, εξαρτάται από τη μέγιστη προσπίπτουσα υπερπίεση, η οποία είναι συνάρτηση του καθαρού εκρηκτικού βάρους και της απόστασης από την έκρηξη.



Σχήμα 3.6: Ανακλώμενη υπερπίεση έναντι της προσπίπτουσας υπερπίεσης [Ιωάννου Ο.].

Το Σχήμα 3.7 δείχνει τους τυπικούς συντελεστές ανακλώμενης υπερπίεσης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης για τέσσερα διαφορετικές μέγιστες προσπίπτουσες υπερπίεσεις. Ο συντελεστής ανακλώμενης υπερπίεσης, ισούται με τη μέγιστη ανακλώμενη υπερπίεση προς τη μέγιστη προσπίπτουσα υπερπίεση ($C_r = P_r/P_i$). Αυτό το σχήμα δείχνει πως οι ανακλώμενες υπερπίεσεις στις εκρήξεις μπορούν να είναι έως και 13 φορές μεγαλύτερες

από τις μέγιστες προσπίπτουσες υπερπίεσεις. και πως για όλες τις εκρήξεις, οι συντελεστές ανακλώμενης υπερπίεσης είναι σημαντικά μεγαλύτεροι κοντά στην έκρηξη.



Σχήμα 3.7: Διάγραμμα συντελεστή ανακλώμενης υπερπίεσης – γωνίας πρόσπτωσης [Chipley, M. (2003)].

Οι σχέσεις που έχουν προκύψει από την εργασία των Rankine & Hugoniot είναι:

$$U_s = a_0 \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot p_s + 7 \cdot p_0}{7 \cdot p_0}} \quad (3-3)$$

$$q_s = \frac{5 \cdot p_s^2}{2 \cdot (p_s + 7 \cdot p_0)} \quad (3-4)$$

$$p_r = 2 \cdot p_s + (\gamma + 1) \cdot q_s = 2 \cdot p_s \cdot \frac{7 \cdot p_0 + 4 \cdot p_s}{7 \cdot p_0 + p_s} \quad (3-5)$$

$$C_r = \frac{p_r}{p_s} \quad (3-6)$$

U_s : Ταχύτητα μετώπου.

p_0 : Πίεση σε συνθήκες περιβάλλοντος.

a_0 : Ταχύτητα του ήχου στον αέρα σε πίεση p_0 .

γ : Λόγος ειδικής θερμότητας C_p/C_v (=1.4 για τον αέρα).

C_p : Θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση.

C_v : Θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο.

C_v : Σταθερά ανάκλασης.

Για τον υπολογισμό της πίεσης p_s σε κοντινό και μακρινό πεδίο καθώς και της υποπίεσης p_{s0} ο Brode πρότεινε τις εξής σχέσεις (1MPa = 10bar):

$$p_s = \frac{6.7}{Z^3} + 1 \text{ (bar)}, p_s \geq 10 \text{ bar} \quad (3-7)$$

$$p_s = \frac{0.975}{Z} + \frac{1.455}{Z^2} + \frac{5.85}{Z^3} - 0.019 \text{ (bar)}, 0.1 \text{ bar} \leq p_s < 10 \text{ bar} \quad (3-8)$$

$$p_{s0} = -\frac{0.35}{Z} \quad (3-9)$$

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (3-10)$$

R: Απόσταση από το κέντρο της έκρηξης σε m.

W: Εκρηκτικό φορτίο εκφρασμένο σε ισοδύναμα κιλά TNT.

Γενικά, υπάρχουν και εναλλακτικές θεωρίες, όπως αυτή των Naumyenko και Petrovshyi:

$$p_s = \frac{10.7}{Z^3} + 1 \text{ (kp/cm}^2\text{)}, Z \leq 1 \quad (3-11)$$

$$p_s = \frac{0.76}{Z} + \frac{2.55}{Z^2} + \frac{6.50}{Z^3} \text{ (kp/cm}^2\text{)}, 1 \leq Z \leq 15 \quad (3-12)$$

Η θεωρία του Henrych:

$$p_s = \frac{14.072}{Z} + \frac{5.540}{Z^2} - \frac{0.357}{Z^3} + \frac{0.00625}{Z^4} \text{ (bar)}, 0.05 \leq Z < 0.3 \quad (3-13)$$

$$p_s = \frac{6.194}{Z} - \frac{0.326}{Z^2} + \frac{2.132}{Z^3} \text{ (bar)}, 0.3 \leq Z \leq 1 \quad (3-14)$$

$$p_s = \frac{0.662}{Z} + \frac{4.05}{Z^2} + \frac{3.288}{Z^3} \text{ (bar)}, 1 \leq Z \leq 10 \quad (3-15)$$

Η θεωρία του Mills:

$$p_s = \frac{1772}{Z^3} - \frac{114}{Z^2} + \frac{108}{Z} \text{ (kPa)} \quad (3-16)$$

Άλλες θεωρίες είναι αυτές των Kinney, Newmark, Kingery-Bulmash.

Η ώθηση (διαφορά ορμής) που παράγεται από την προσπίπτουσα πίεση υπολογίζεται για τη διάρκεια της θετικής φάσης μέσα από την ολοκλήρωση:

$$i_s = \int p_s(t) dt \quad (3-17)$$

Ενώ για την αρνητική φάση μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$\bar{i}_s \approx i_s \cdot \left[1 - \frac{1}{2 \cdot Z} \right] \quad (3-18)$$

Για την καλύτερη κατανόηση των χαρακτηριστικών του εκρηκτικού κύματος χρησιμοποιούνται διαγράμματα με την κλιμακωτή απόσταση Z . Αυτά τα διαγράμματα εισήχθησαν από τον Hopkinson και τον Cranz και συσχετίζουν το εκρηκτικό φορτίο και τη διάμετρο δύο διαφορετικών εκρηκτικών υλών μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα, το φορτίο W_1 μιας εκρηκτικής ύλης είναι αναλογικό της διαμέτρου της d_1 . Αντίστοιχα, το φορτίο W_2 μιας εκρηκτικής ύλης είναι αναλογικό της διαμέτρου d_2 . Έτσι επιστρατεύοντας την κυβική ρίζα:

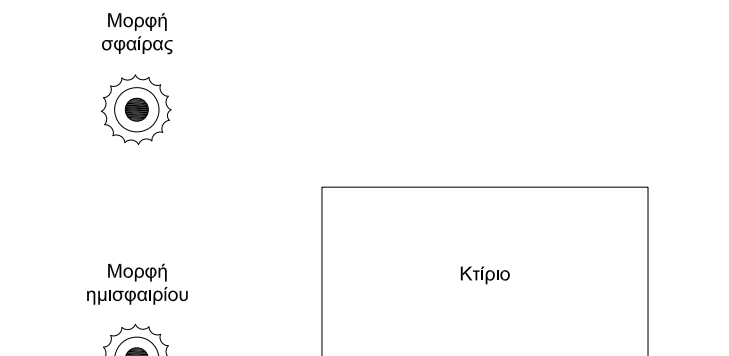
$$\frac{d_1}{d_2} = \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^{1/3} \quad (3-19)$$

Άλλος τρόπος ώστε να προκύψουν τα διαγράμματα με την κλιμακωτή απόσταση είναι αυτή του Sachs.

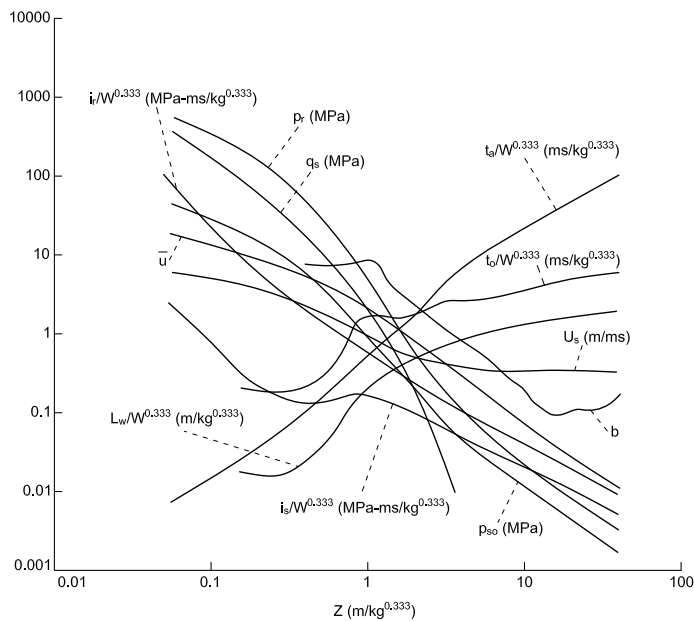
Οι εκρήξεις σε εξωτερικό χώρο ταξινομούνται ως:

- Ελεύθερες στον αέρα εκρήξεις μορφής σφαίρας: Η έκρηξη επιδρά στην κατασκευή δίχως πρότερη επίδραση σε άλλα εμπόδια στο έδαφος.
- Στον αέρα εκρήξεις μορφής σφαίρας: Η έκρηξη επιδρά στην κατασκευή μετά από επίδραση με άλλα εμπόδια στο έδαφος.
- Στην επιφάνεια εκρήξεις μορφής ημισφαιρίου: Η έκρηξη λαμβάνει χώρα στο έδαφος και έτσι αναπτύσσει ημισφαιρική μορφή που επιδρά στην κατασκευή. Αυτής της μορφής η έκρηξη θεωρήθηκε στο κεφάλαιο 5, στο παράδειγμα του μεταλλικού κτιρίου.

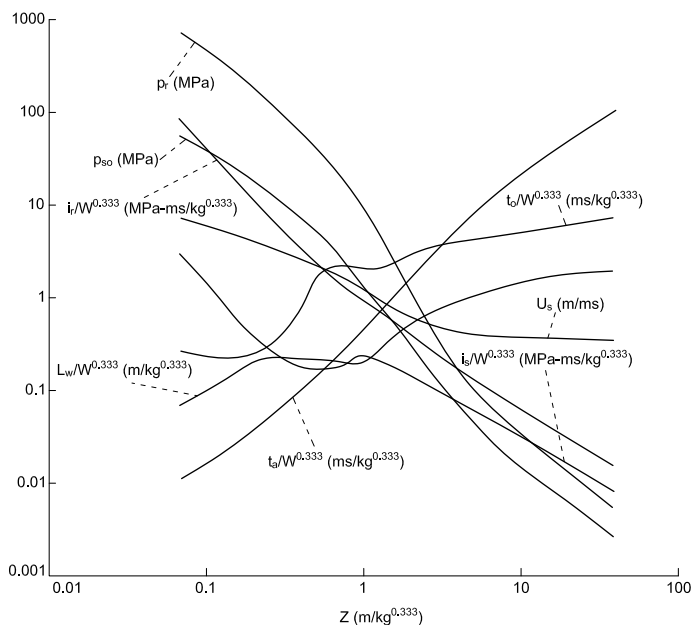
Στο σχήμα 3.8 γίνεται ξεκάθαρη η διαφορά έκρηξης μορφής σφαίρας και μορφής ημισφαιρίου.



Σχήμα 3.8: Διαφορά έκρηξης μορφής σφαίρας και μορφής ημισφαιρίου.



Σχήμα 3.9: Παράμετροι εκρηκτικού κύματος για μορφή σφαίρας σε ελεύθερο αέρα και στο επίπεδο της θάλασσας (θετική φάση) [Ιωάννου Ο.].

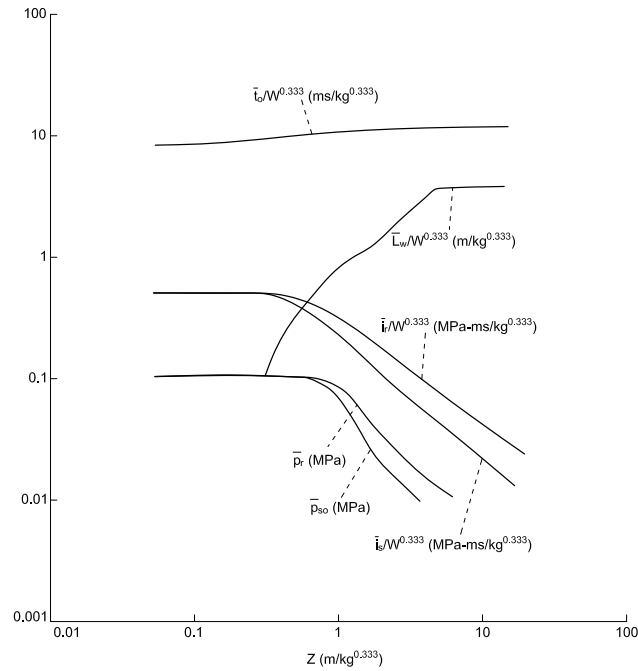


Σχήμα 3.10: Παράμετροι εκρηκτικού κύματος για μορφή ημισφαιρίου στην επιφάνεια και στο επίπεδο της θάλασσας (θετική φάση). [Ιωάννου Ο.].

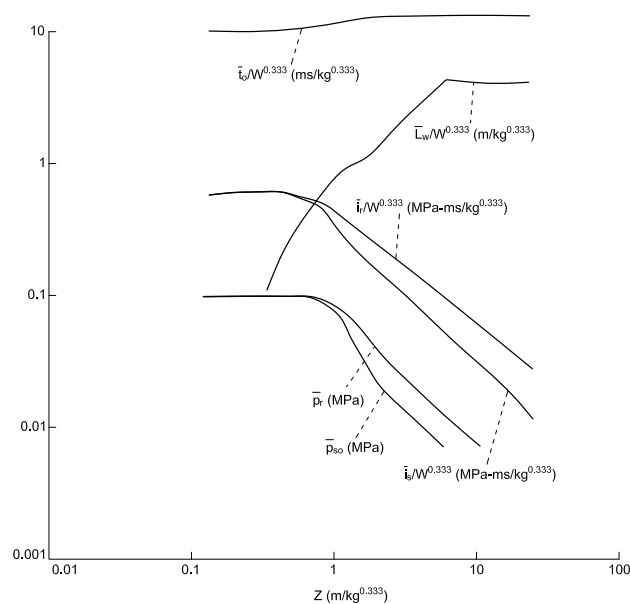
Με αυτόν τον τρόπο μπορούν στο ίδιο διάγραμμα να αναπαρασταθούν και οι υπόλοιπες παράμετροι, καθιστώντας το ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται από πλείστους επιστήμονες και σχεδιαστές. Αυτό συμβαίνει διότι με την κυβική ρίζα, αν επιθυμείται η ίδια πίεση p_s δύο διαφορετικών εκρηκτικών υλών, τότε ο υπολογισμός των διαφορετικών ακτίνων στις οποίες υπάρχει η ίδια πίεση p_s (>10 bar) είναι:

$$p_{s1} = p_{s2} \rightarrow \frac{6.7}{Z_1^3} + 1 = \frac{6.7}{Z_2^3} + 1 \rightarrow Z_1^3 = Z_2^3 \rightarrow \frac{R_1}{R_2} = \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^{1/3} \quad (3-20)$$

Αυτός είναι και ο λόγος που εξ αρχής ορίστηκε έτσι η κλιμακωτή απόσταση Z . Τα σχήματα αναφέρονται τόσο σε μορφή σφαίρας (σε ελεύθερο αέρα και χωρίς εγγύτητα με κάποια επιφάνεια που προκαλεί ανάκλαση) όσο και σε μορφή ημισφαιρίου (σε άμεση εγγύτητα από την άλλη πλευρά του ημισφαιρίου με επιφάνεια που προκαλεί ολική ανάκλαση).



Σχήμα 3.11: Παράμετροι εκρηκτικού κύματος για μορφή σφαίρας σε ελεύθερο αέρα και στο επίπεδο της θάλασσας (αρνητική φάση). [Ιωάννου Ο.].

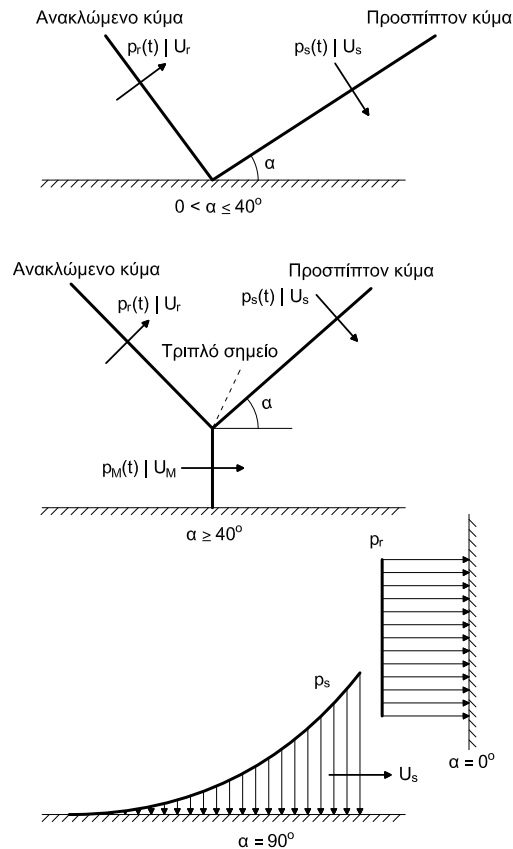


Σχήμα 3.12: Παράμετροι εκρηκτικού κύματος για μορφή ημισφαιρίου στην επιφάνεια και στο επίπεδο της θάλασσας (αρνητική φάση). [Ιωάννου Ο.].

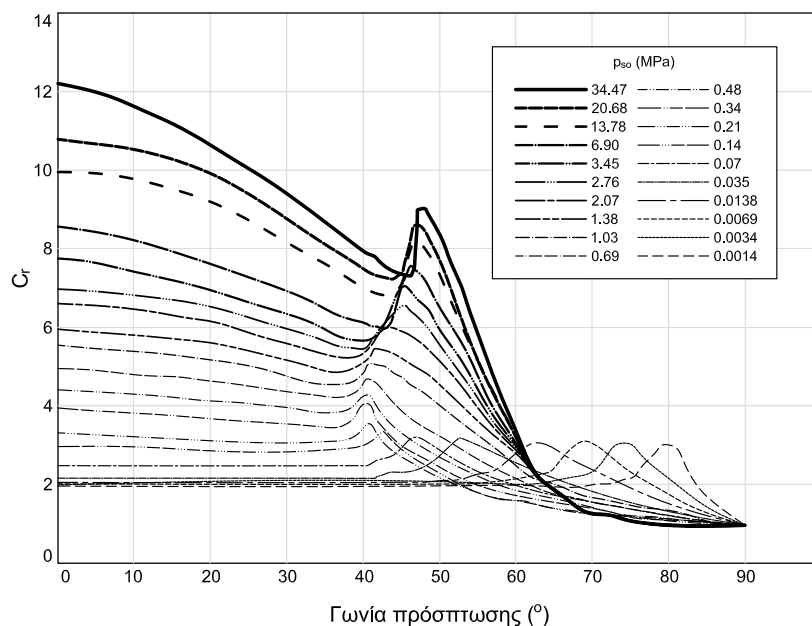
Όσον αφορά την παράμετρο της γωνίας πρόσπτωσης, για γωνία πρόσπτωσης μέχρι 40° εξελίσσεται φυσιολογικά η ανάκλαση. Ωστόσο, για μεγαλύτερη γωνία έρχεται στο προσκήνιο η ανάκλαση Mach η οποία πρόκειται για ειδική και σύνθετη περίπτωση ανάκλασης κατά την οποία στην ουσία το κύμα δεν αναπηδά από την επιφάνεια αλλά την γδέρνει, το ανακλώμενο κύμα αλληλοεπιδρά με το προσπίπτον κύμα και προκαλούν τη δημιουργία ενός τρίτου κύματος κάτω από το τριπλό σημείο.

Εξ ορισμού, μέσα από τους τύπους των Rankine&Hugoniot φαίνεται ότι $2 \leq C_r \leq 8$. Αλλά αυτό, όπως παρουσιάζεται στο αντίστοιχο διάγραμμα δεν ισχύει, δεδομένου ότι αγγίζει και τιμές που φτάνουν το 12~13. Αυτό συμβαίνει λόγω διασπάσεων των μορίων του αερίου τοπικά στην επιφάνεια πρόσπτωσης. Η ανακλώμενη ώθηση υπολογίζεται ως:

$$i_a = i_s \cdot (1 + \cos \alpha - 2 \cdot \cos^2 \alpha) + i_r \cdot \cos^2 \alpha \quad (3-21)$$



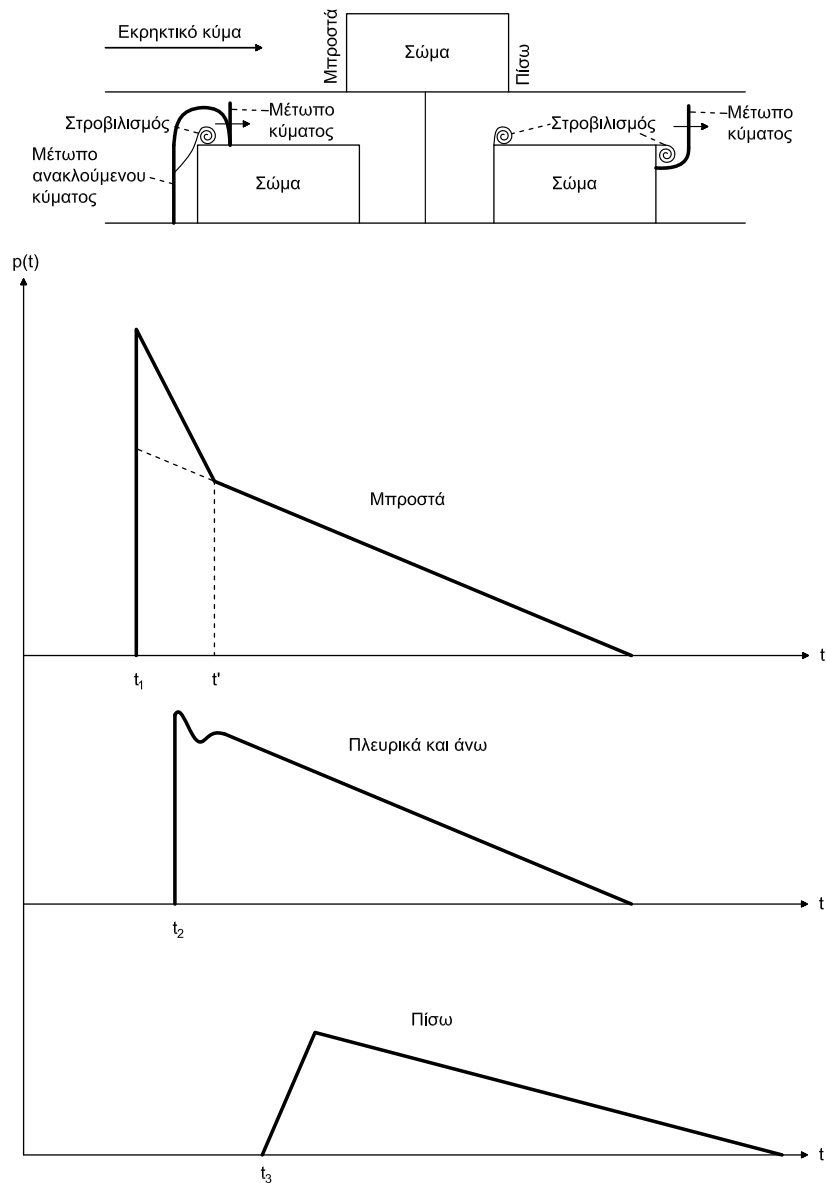
Σχήμα 3.13: Μορφές ανάκλασης εκρηκτικού κύματος [Ιωάννου Ο.].



Σχήμα 3.14: Διαφοροποίηση του C_r ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης και την πίεση p_{so} . [Chipley, M. (2003)].

- Γενικά, τρεις βασικές κατηγορίες επιφανειών – σωμάτων μπορούν να προσδιοριστούν:
- Σώμα που υπόκειται σε φόρτιση από ένα μεγάλης κλίμακας εκρηκτικό κύμα το οποίο το περικλείει αλλά δεν καταφέρνει να το μετακινήσει (όπως ένα κτίριο). Στην ουσία, επιπλέον των υπολοίπων δυνάμεων, ασκεί και μια πρόσθετη δύναμη σύρσεως πλευρικά υπό τη μορφή περίθλασης. Το σώμα, όμως, δεν μετακινείται λόγω του όγκου του.
 - Σώμα που υπόκειται σε φόρτιση από ένα μεγάλης κλίμακας εκρηκτικό κύμα το οποίο το περικλείει και έχει δυνατότητα να το μετακινήσει (όπως ένα αυτοκίνητο). Ασκείται πίεση στα πλευρικά τοιχώματα του σώματος και υπόκειται σε μια δύναμη σύρσεως η οποία μπορεί να το μετακινήσει με άμεση συνέπεια να προκληθεί ζημιά και μόνο λόγω αυτής της μετακίνησης.
 - Σώμα που υπόκειται σε φόρτιση από ένα περιορισμένης κλίμακας εκρηκτικό κύμα και δεν το φορτίζει με ενιαίο και ομοιόμορφο τρόπο αλλά κάθε στοιχείο φορτίζεται σε διαφορετική στιγμή και με διαφορετική πίεση.

Όσον αφορά στις δύο πρώτες κατηγορίες, με την παρέλευση του εκρηκτικού κύματος, αναπτύσσονται σε όλες τις εκτιθέμενες πλευρές πιέσεις. Αυτές οι πιέσεις κατανέμονται ως:



Σχήμα 3.15: Αναπτυσσόμενη πίεση από εκρηκτικό κύμα στα διάφορα σημεία του σώματος [Chipley, M. (2003)].

Μπροστά: Με την πρόσπτωση του εκρηκτικού κύματος αναπτύσσεται έντονη πίεση στην μπροστινή πλευρά του σώματος. Σε χρόνο t_1 αυτή η πίεση θα είναι ίση με την μέγιστη ανακλώμενη πίεση p_r . Ωστόσο, εν συνεχεία αυτή η πίεση μειώνεται λόγω του γεγονότος ότι υπάρχει στις γωνίες πλευρική πίεση p_s η οποία είναι μικρότερη της p_r . Η πίεση αυτή βαίνει μειούμενη μέχρις ότου να φτάσει τη στάσιμη πίεση p_{stag} η οποία συντίθεται από την πίεση p_s και τη δυναμική πίεση q . Μέσα από αυτήν τη μετάβαση εκφράζεται η μείωση της ώθησης που προκαλείται σε σχέση με αυτήν ενός σώματος που έχει άπειρες διαστάσεις και, άρα, δεν έχει διαφορετικές πιέσεις στις γωνίες. Αυτός ο χρόνος μετάβασης t_c υπολογίζεται ως:

$$t_c = t' - t_1 = \frac{4 \cdot S}{(1 + \frac{S}{G}) \cdot C_r} \quad (3-22)$$

G: (= max(B/2,H)).

S: Μεταβατική απόσταση (= min(B/2,H)).

B: Πλάτος σώματος.

H: Ύψος σώματος.

C_r: Ταχύτητα του ήχου.

$$p_{stag} = p_s + C_D \cdot q \quad (3-23)$$

Πλευρικά και άνω: Αρχικά υπάρχει μια ανατάραξη που οφείλεται στη προκαλούμενη σύνθετη ροή στις γωνίες ενώ στην πορεία ακολουθεί μια ομαλώς μειούμενη πίεση.

$$p_a = C_E \cdot p_{s0} + C_D \cdot q_0 \quad (3-24)$$

P_a: Ενεργός πίεση πλευρικά και άνω.

C_E: Συντελεστής από το διάγραμμα 2-196 του UFC 3-340-02.

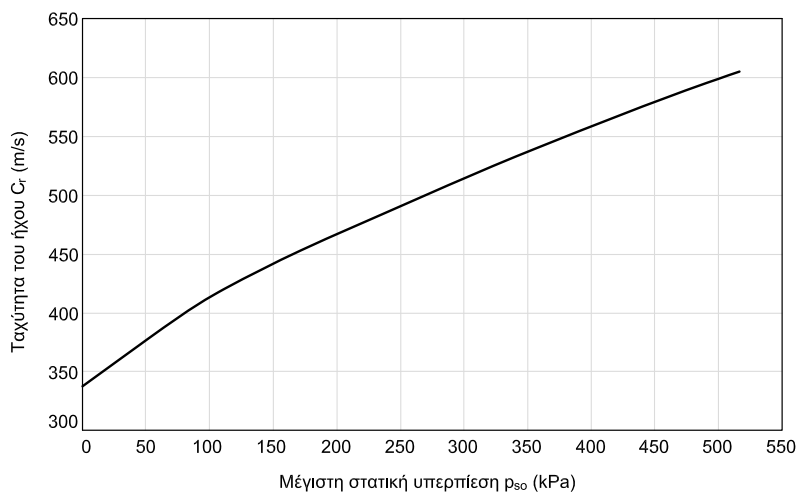
C_D: Συντελεστής σύρσεως.

q₀: Μέγιστη δυναμική πίεση.

Πίνακας 3-1. Συντελεστές σύρσεως C_D σύμφωνα με το [UFC 3-340-02].

q ₀ (kPA)	C _D
0-172	-0.40
172-345	-0.30
345-897	-0.20

Πίσω: Σε διαφορετικό χρόνο, μέχρι δηλαδή το κύμα να διανύσει όλο το μήκος του σώματος, προκαλείται μια αρχική αυξανόμενη και στη συνέχεια μειούμενη πίεση.



Σχήμα 3.16: Ταχύτητα του ήχου ανάλογα με τη μέγιστη στατική υπερπίεση [Ιωάννου Ο.].

Η δύναμη σύρσεως υπολογίζεται ως εξής:

$$F_D = C_D \cdot q_s(t) \cdot A \quad (3-25)$$

A: Εμβαδόν φορτιζόμενης επιφάνειας.

Σύμφωνα με τους H. Draganić, V. Sigmund, καθώς το κύμα διαδίδεται μέσω του αέρα, το μέτωπο του κύματος περικυκλώνει το κτίριο και όλες τις επιφάνειές του έτσι ώστε ολόκληρο το κτίριο να εκτίθεται στην πίεση της έκρηξης. Το μέγεθος και η κατανομή του φορτίου εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες:

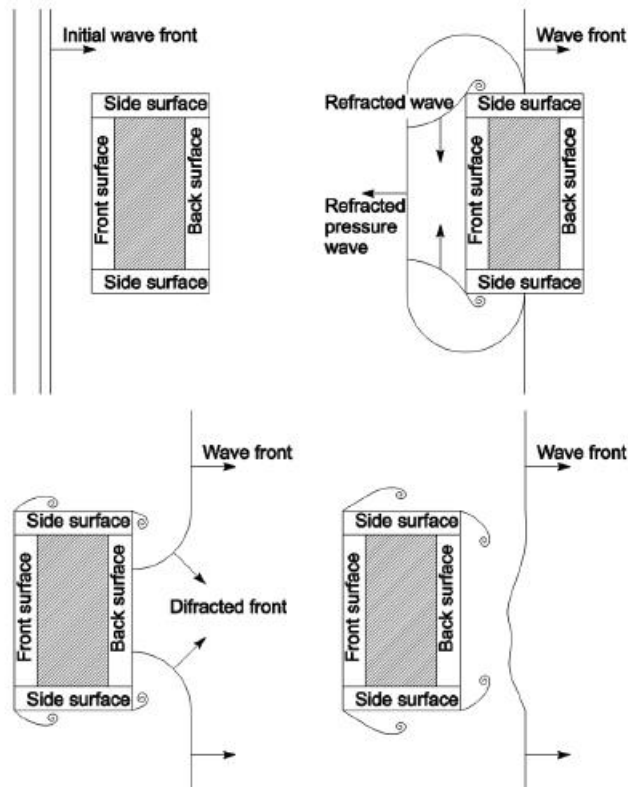
α) τα χαρακτηριστικά των εκρηκτικών που εξαρτώνται από τον τύπο του εκρηκτικού υλικού, την ενέργεια που απελευθερώνεται (μέγεθος έκρηξης) και το βάρος του εκρηκτικού,

β) τη θέση έκρηξης σε σχέση με το κτίριο,

γ) την ένταση και την αύξηση της πίεσης στην αλληλεπίδραση με το έδαφος ή το ίδιο το κτίριο.

Εάν το ορθογώνιο κτίριο εκτίθεται σε έκρηξη, θα ασκούνται πιέσεις σε όλες τις επιφάνειές του. Η περίθλαση της έκρηξης γύρω από το κτίριο θα προκαλέσει δύναμη σε οποιαδήποτε εκτεθειμένη επιφάνεια (Σχήμα 3.17). Το κτίριο ωθείται προς τα δεξιά εάν η αριστερή πλευρά είναι φορτισμένη ενώ ταυτόχρονα ωθείται ελαφρώς προς τα αριστερά όσο η περίθλαση τελειώνει. Η ελκτική δύναμη σπρώχνει το κτίριο από την αριστερή πλευρά και ακολουθείται από τη δύναμη αναρρόφησης στα δεξιά όταν η δυναμική πίεση διασχίζει από πάνω και περιμετρικά το κτίριο.

Καθώς το μέτωπο επεκτείνεται στον περιβάλλοντα όγκο του αέρα, η αρχική μέγιστη πίεση μειώνεται και η διάρκεια της πίεσης αυξάνεται.



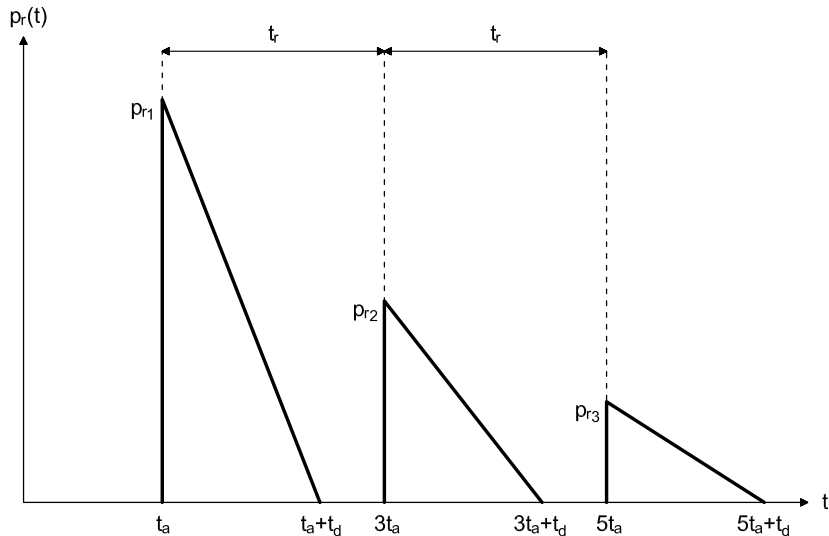
Σχήμα 3.17: Συμπεριφορά του κύματος κατά το πέρασμά του γύρω από το κτίριο [H. Draganić, V. Sigmund].

3.5 Έκρηξη με περιορισμένες συνθήκες

Όπως προαναφέρθηκε, υπάρχουν οι εκρήξεις με ελεύθερες και οι εκρήξεις με περιορισμένες συνθήκες. Σε επίπεδο κτιρίων, η διαφορά τους είναι σημαντική διότι ένα κτίριο που προκαλεί περιορισμένες συνθήκες (για παράδειγμα ένα υπόγειο parking) πρέπει να είναι ισχυρότερο προκειμένου να αντισταθεί σε σχέση με ένα που προκαλεί ελεύθερες συνθήκες (για παράδειγμα ένας όροφος με πολλά παράθυρα). Γενικώς, έκρηξη εντός ενός κτιρίου προκαλεί δύο είδη φόρτισης:

- Φόρτιση λόγω του εκρηκτικού κύματος και της συνακόλουθης αντήχησης. Η φόρτιση αυτή δεν αφορά μόνο το αρχικό κρουστικό κύμα αλλά και τα ανακλώμενα εκ του αρχικού κρουστικά κύματα τα οποία, όμως, βαίνουν μειούμενα.
- Φόρτιση λόγω διόγκωσης που προκαλείται από τα αέρια των χημικών αντιδράσεων.

Τα ανακλώμενα κύματα μπορούν χάριν απλούστευσης να θεωρηθούν τριγωνικά με μηδενικό χρόνο ανύψωσης και προσδιορίζοντας την ανακλώμενη πίεση ως τη μισή του προηγούμενου κύματος. Έτσι, διατηρώντας την ίδια διάρκεια σε κάθε παλμό, λόγω του γεγονότος ότι η ώθηση προκύπτει από το εμβαδόν του εκάστοτε παλμού, συνάδεται ότι και αυτή μειώνεται στο μισό της. Συνήθως, τρεις παλμοί (τρεις ανακλάσεις) θεωρούνται ικανοποιητική προσέγγιση. Επιπλέον, διατηρείται σταθερός ο χρόνος εμφάνισης των παλμών και ίσος με t_r , γεγονός όμως που δεν ισχύει πλήρως, αφού οι ασθενέστεροι παλμοί στην πραγματικότητα έχουν μεγαλύτερη διάρκεια.



Σχήμα 3.18: Προσέγγιση των ανακλάσεων για έκρηξη σε περιορισμένες συνθήκες.

Οι αντίστοιχοι τύποι είναι οι εξής:

$$p_{r2} = 0.5 \cdot p_{r1} \mid p_{r3} = 0.5 \cdot p_{r2} \mid p_{r4} = 0 \quad (3-26)$$

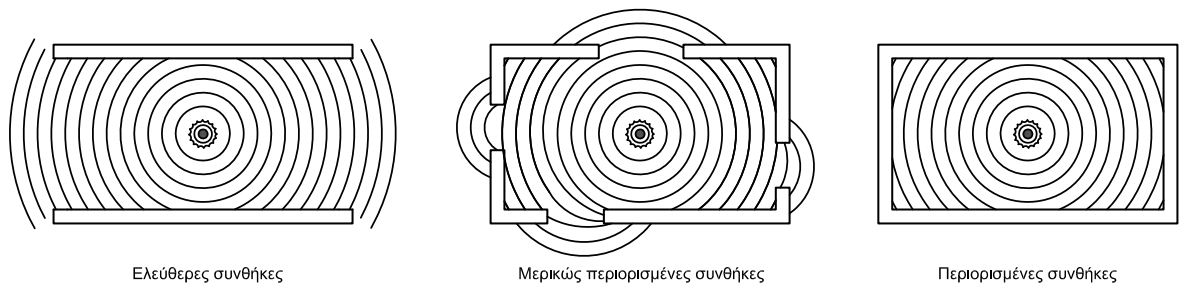
$$i_{r2} = 0.5 \cdot i_{r1} \mid i_{r3} = 0.5 \cdot i_{r2} \mid i_{r4} = 0 \quad (3-27)$$

$$t_r = 2 \cdot t_a \quad (3-28)$$

Μια άλλη εναλλακτική μέθοδος για τη χρησιμοποίηση των ανακλώμενων κυμάτων (ιδιαίτερα στην περίπτωση κατασκευής με μεγάλη ιδιοπερίοδο) είναι η ενοποίησή τους σε ένα επαυξημένο με τα κάτωθι χαρακτηριστικά:

$$p_{rT} = p_{r1} + p_{r2} + p_{r3} = 1.75 \cdot p_{r1} \quad (3-29)$$

$$i_{rT} = i_{r1} + i_{r2} + i_{r3} = 1.75 \cdot i_{r1} \quad (3-30)$$



Σχήμα 3.19: Ταξινόμηση εκρήξεων ως προς τους περιορισμούς [Ιωάννου Ο.].

Τα ανακλώμενα κύματα, λοιπόν, ασκούνται στην αρχή αλλά στην πορεία εμφανίζεται η πίεση του αερίου. Αυτή ξεκινά μαζί με τα κρουστικά κύματα και αναπτύσσεται ως το σημείο A, από το οποίο και μετά συνεχίζει με φθίνουσα πορεία. Η πίεση αερίου εξαρτάται καθοριστικά από τον προς διάθεση όγκο, από την εκρηκτική ύλη και από το μέγεθος των περιορισμών (σε ένα κτίριο βασικό ρόλο παίζει ο εξαερισμός). Η φθίνουσα πορεία της πίεσης αερίου περιγράφεται ικανοποιητικά από τη σχέση:

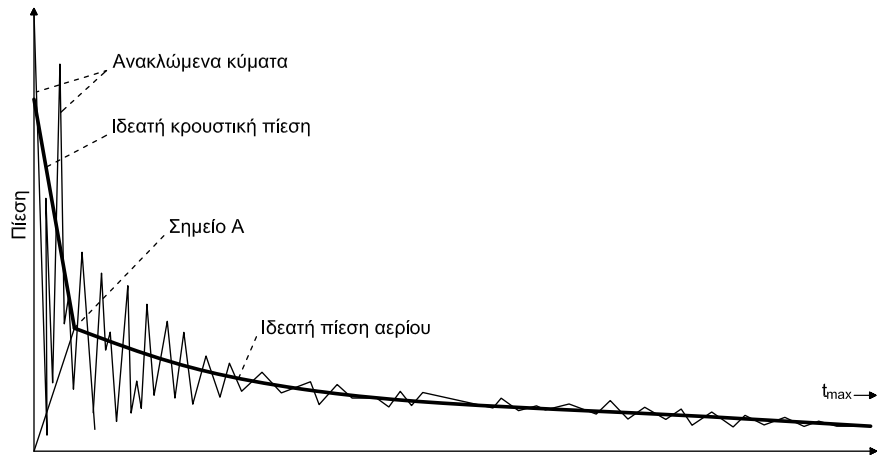
$$p(t) = (p_{Q5} + p_0) e^{\left(\frac{a_e \cdot A_s \cdot t \cdot a_0}{V}\right)} \quad (3-31)$$

p_{Q5} : Μέγιστη οιοειή στατική πίεση.

a_e : Λόγος επιφανειών εξαερισμού προς την επιφάνεια των τοίχων και οροφών.

A_s : Συνολική επιφάνεια εσωτερικά τοίχων και οροφών.

V : Όγκος χώρου.



Σχήμα 3.20: . Ανακλώμενη κρουστική πίεση και πίεση αερίου σε έκρηξη με περιορισμένες συνθήκες [Ιωάννου Ο.].

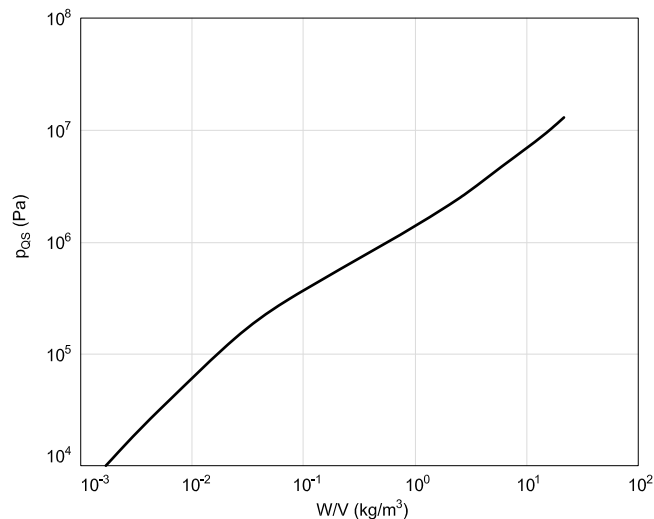
Αυτή η φθίνουσα πορεία έχει εφαλτήριο το σημείο A, δηλαδή τη χρονική στιγμή $5t_a+t_d$, οπότε και παύουν (θεωρητικά) οι ανακλάσεις. Το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη ορίζει την ώθηση της πίεσης αερίου i_g :

$$i_g = \int_0^{t_{\max}} (p(t)-p_0)dt = \frac{p_1}{C} \cdot (1-e^{-C \cdot t_{\max}}) - p_0 \cdot t_{\max} \quad (3-32)$$

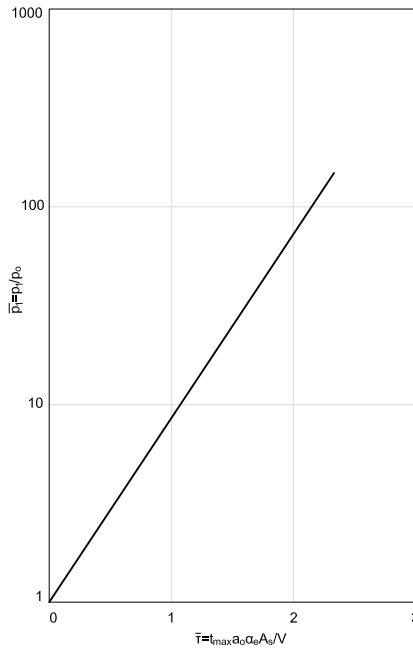
$$p_1 = p_{QS} + p_0 \quad (3-33)$$

$$C = \frac{2.13 \cdot \alpha_g \cdot A_g \cdot \alpha_0}{V} \quad (3-34)$$

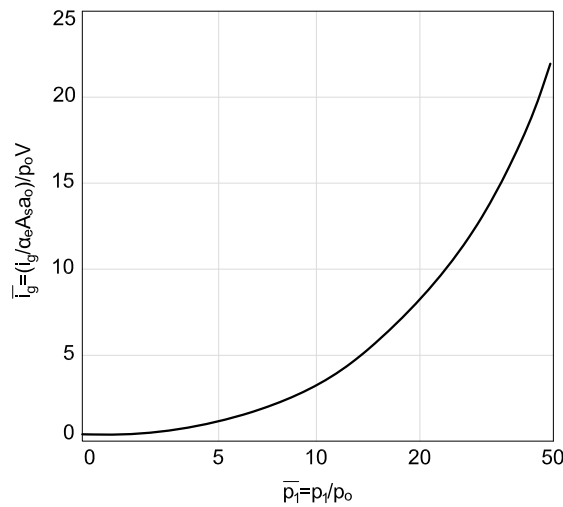
Η εξίσωση του i_g στην πραγματικότητα υπολογίζει το εμβαδόν συμπεριλαμβάνοντας το αρχικό στάδιο όπου ενεργούν κυρίως οι κρουστικές πιέσεις των ανακλώμενων κυμάτων. Το γεγονός αυτό, όμως, δεν δημιουργεί πρόβλημα διότι αυτή η αρχική χρονική διάρκεια των $5t_a+t_d$ είναι πολύ μικρή και μόνο στην περίπτωση ενός κτιρίου με πολύ καλό εξαερισμό δύναται να οδηγήσει σε ανακόλουθα αποτελέσματα.



Σχήμα 3.21: Διάγραμμα ανάμεσα στην πίεση p_{QS} και στον λόγο W/V [Ιωάννου Ο.].



Σχήμα 3.22: Διάγραμμα ανάμεσα στην κλιμακωτή πίεση και στην κλιμακωτή διάρκεια [Ιωάννου Ο.].



Σχήμα 3.23: Διάγραμμα ανάμεσα στην κλιμακωτή ώθηση πίεσης αερίου και την κλιμακωτή πίεση [Ιωάννου Ο.].

Συνολικά, οι εκρήξεις εντός των κατασκευών εν αντιθέσει με τις εκρήξεις στα όρια της κατασκευής ή απομακρυσμένα από την κατασκευή προκαλούν μεγαλύτερη ή και πολλαπλάσια ζημιά στις κατασκευές, γι' αυτό και έχουν ιδιαίτερη σημασία.

3.6 Ζημιές του κτιρίου

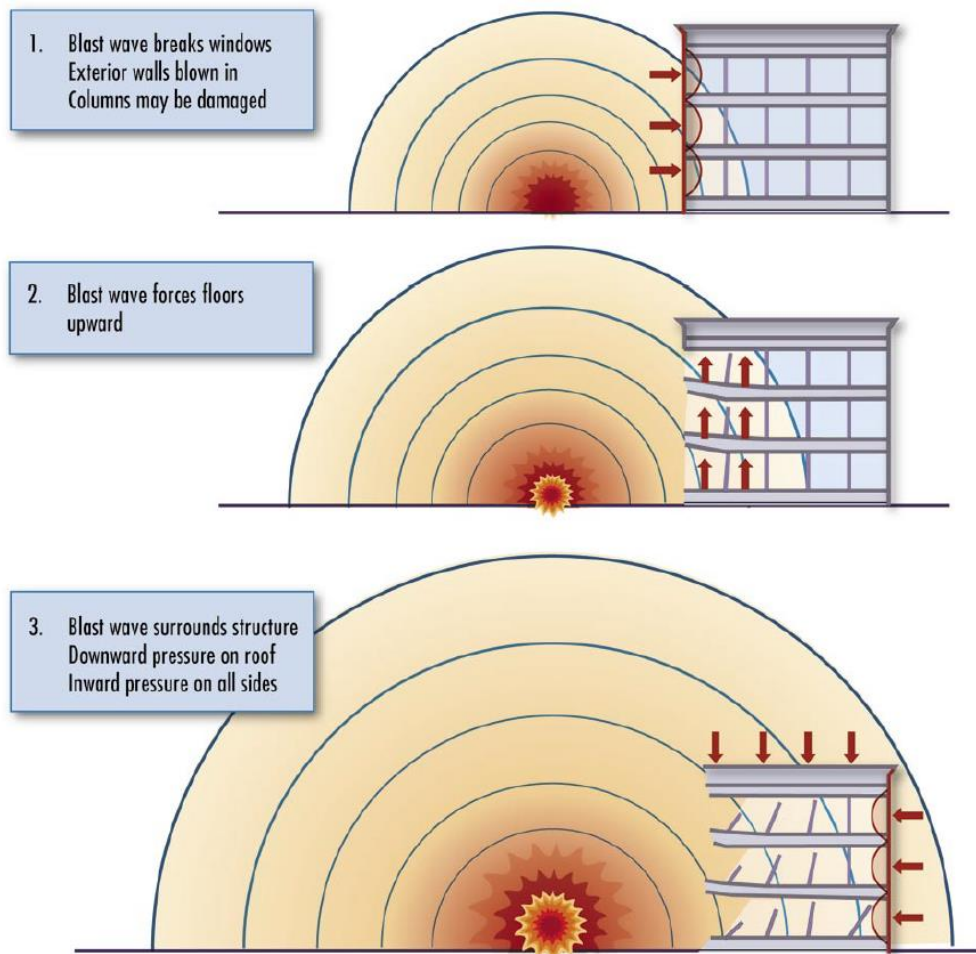
Η έκταση της ζημιάς και των τραυματισμών σε μια έκρηξη δεν μπορούν να προβλεφθούν με ακρίβεια. Βέβαια, είναι δυνατόν να δοθούν γενικές ενδείξεις για το

επίπεδο των ζημιών και των τραυματισμών που πρέπει αναμένονται σε μια έκρηξη, σύμφωνα με το μέγεθος της έκρηξης, την απόσταση, και τα χαρακτηριστικά του κτιρίου.

Το κύμα της έκρηξης είναι ο πιο σημαντικός μηχανισμός καταστροφών σε μια έκρηξη. Οι πιέσεις που ασκεί στις επιφάνειες του κτιρίου μπορεί να είναι αρκετές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες από τα φορτία για τα οποία έχει σχεδιαστεί το κτίριο. Το εκρηκτικό κύμα επίσης δρα σε διευθύνσεις για τις οποίες το κτίριο μπορεί να μην έχει σχεδιαστεί, όπως προς τα πάνω στο δάπεδο κάθε ορόφου. Όσον αφορά την ακολουθία της απόκρισης, το εκρηκτικό κύμα προσκρούει πρώτα στο πιο αδύναμο σημείο κοντινότερα στην έκρηξη, συνήθως στο εξωτερικό περίβλημα του κτιρίου. Η έκρηξη σπρώχνει τους εξωτερικούς τοίχους στους χαμηλότερους ορόφους και μπορεί να προκαλέσει αστοχία των τοίχων και θρυμματισμό των παραθύρων. Όσο το εκρηκτικό κύμα συνεχίζει να επεκτείνεται, εισέρχεται στο κτίριο, σπρώχνοντας πάνω και κάτω τα πατώματα (Σχήμα 3.24)

Η αστοχία των πατωμάτων είναι σύνηθες φαινόμενο σε μεγάλης κλίμακας μέσω οχημάτων εκρηκτικές επιθέσεις, αφού οι πλάκες των πατωμάτων συνήθως έχουν μεγάλη επιφάνεια για να δράσει η πίεση και συγκριτικά μικρό πάχος. Όσον αφορά με τον χρόνο των γεγονότων, το κτίριο περικλείεται από το εκρηκτικό κύμα και απευθείας συμβαίνουν ζημιές σε εκατοστά μιλιδευτερολέπτων από τη στιγμή της έκρηξης.

Συνήθως το γυαλί είναι το πιο αδύναμο σημείο του κτιρίου, σπάει σε χαμηλές πιέσεις συγκριτικά με άλλα δομικά στοιχεία όπως τα πατώματα, οι τοίχοι ή τα υποστυλώματα. Υψηλής ταχύτητας θραύσματα γυαλιού, έχει φανεί πως είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας στους τραυματισμούς αυτών των περιστατικών.

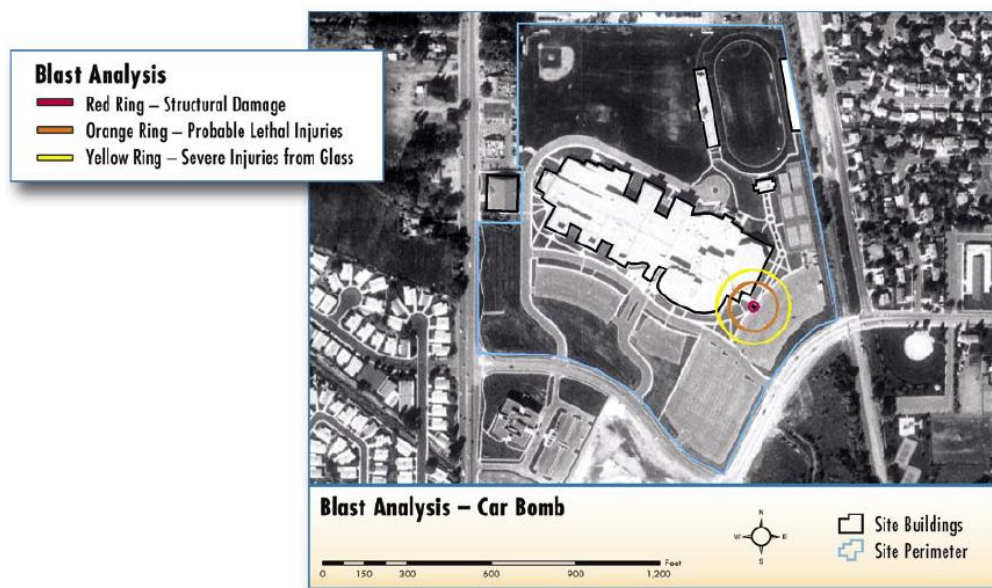


Σχήμα 3.24: . Επίδραση της πίεσης λόγω έκρηξης σε ένα κτίριο [Chipley, M. (2003)].

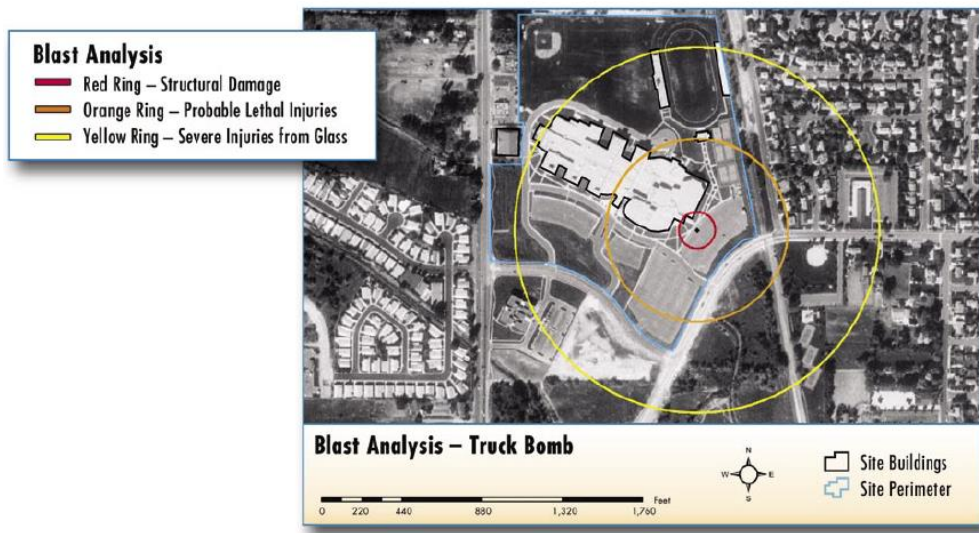
Τα σχήματα 3.25 και 3.26 δείχνουν τις προβλέψεις για τα αποτελέσματα του κτιρίου σε έκρηξη, η οποία πυροδοτείται με αυτοκίνητο και με μεγάλο φορτηγό, στο χώρο στάθμευσης του κτιρίου, αντίστοιχα. Χρησιμοποιήθηκε ένα λογισμικό γεωγραφικών πληροφοριών (GIS) για την ανάλυση του μοτίβου πρόσβασης και κυκλοφορίας του κτιρίου για να προσδιοριστεί ένα λογικό σημείο έκρηξης για μια βόμβα με χρήση οχήματος. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ανάλυση της έκρηξης χρησιμοποιώντας πλασματικά εκρηκτικά βάρη και πλασματική δομή κτιρίου. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 3.25 και 3.26.

Ο κόκκινος δακτύλιος υποδηλώνει την περιοχή όπου προβλέπεται πλήρης αστοχία. Ο πορτοκαλί και ο κίτρινος δακτύλιος υποδηλώνουν προβλέψεις για θανατηφόρους τραυματισμούς και σοβαρούς τραυματισμούς, αντίστοιχα από γυαλί.

Στην περίπτωση σταθμευμένου οχήματος, γνωρίζοντας το μέγεθος της βόμβας (αντιστοιχία σε TNT κατά βάρος), την απόσταση από το κτίριο, τη δομή του κτιρίου, και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τους τοίχους, τα πλαίσια, τα τζάμια, είναι δυνατόν ο σχεδιαστής να καθορίσει το μέγεθος των ζημιών που θα συμβεί και τα μέτρα προστασίας που απαιτούνται.

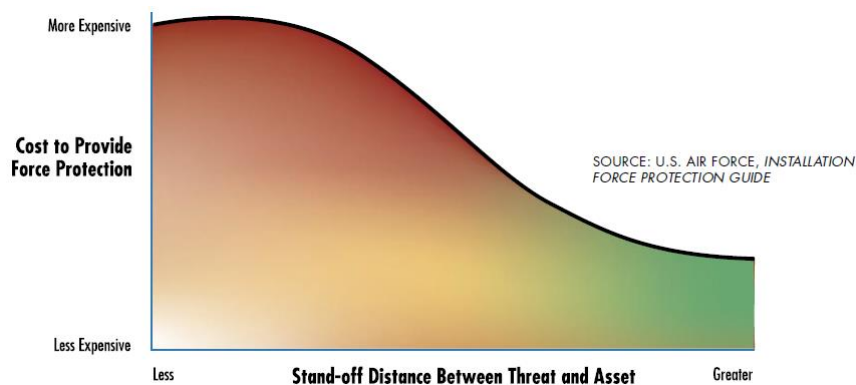


Σχήμα 3.25: Ανάλυση έκρηξης ενός κτιρίου για μια τυπική βόμβα σε αυτοκίνητο που πυροδοτείται στο χώρο στάθμευσης του κτιρίου [Chipley, M. (2003)].



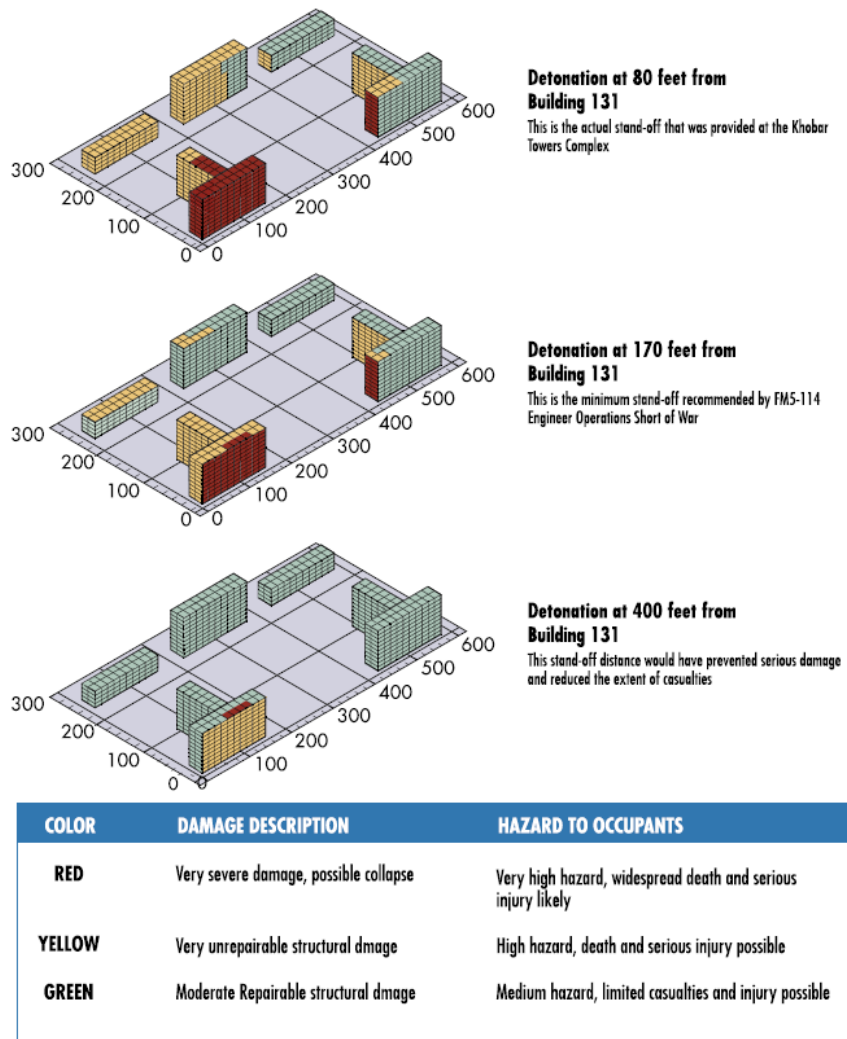
Σχήμα 3.26: Ανάλυση έκρηξης ενός κτιρίου για μια τυπική βόμβα σε μεγάλο φορηγό που πυροδοτείται στο χώρο στάθμευσης του κτιρίου [Chipley, M. (2003)].

Η ενέργεια από μια έκρηξη μειώνεται δραματικά με την απόσταση. Γενικά, το κόστος για να παρέχεται προστασία στο κτίριο μειώνεται όσο η απόσταση από το πιθανό σημείο έκρηξης μεγαλώνει, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.27. Ωστόσο, η αύξηση της απόστασης απαιτεί περισσότερη έκταση και περίμετρο να διασφαλιστεί με φράχτες, ώστε να παρέχεται η απαραίτητη προστασία.



Σχήμα 3.27: Σχέση κόστους – απόσταση από έκρηξη [Chipley, M. (2003)].

Το σχήμα 3.28 δείχνει πως η επίδραση της έκρηξης μειώνεται όσο η απόσταση αυξάνεται (ανάλυση των Khobar Towers). Αυξάνοντας την απόσταση από 80 σε 400feet θα μειωθεί σημαντικά η ζημιά του κτιρίου και ο κίνδυνος τραυματισμού, το μέγεθος της οποίας υποδηλώνεται από της κίτρινες και κόκκινες περιοχές του σχήματος 3.28.



Σχήμα 3.28: Απόσταση του κτιρίου από το σημείο έκρηξης και η σχέση της με την επίδραση στις ζημιές, όπως μοντελοποιήθηκε για τα Khobar Towers [Chipley, M. (2003)].

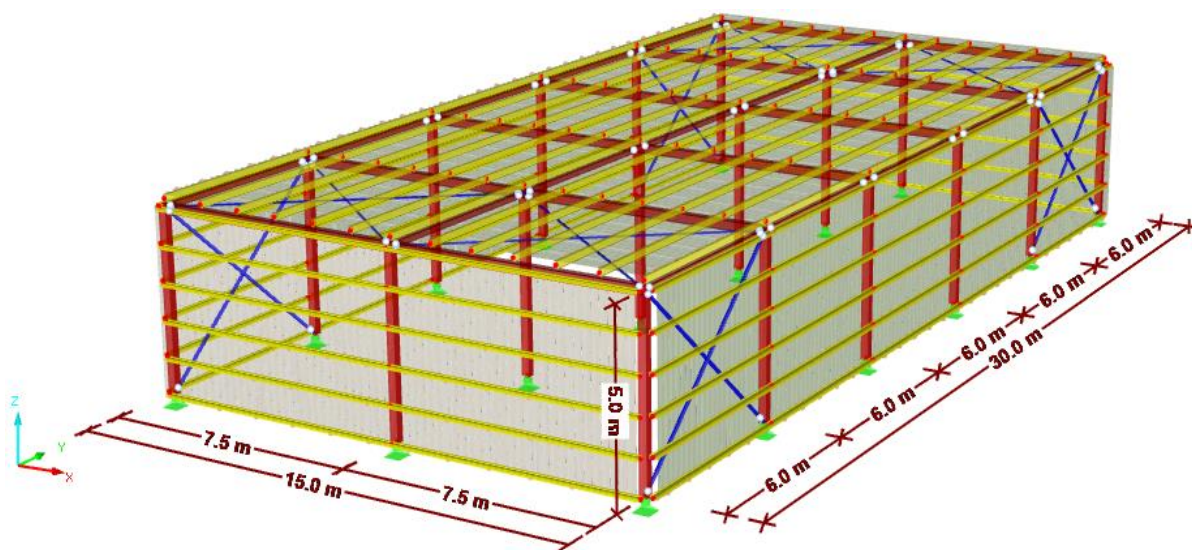
4 Περιγραφή του μεταλλικού κτιρίου

4.1 Γενικά

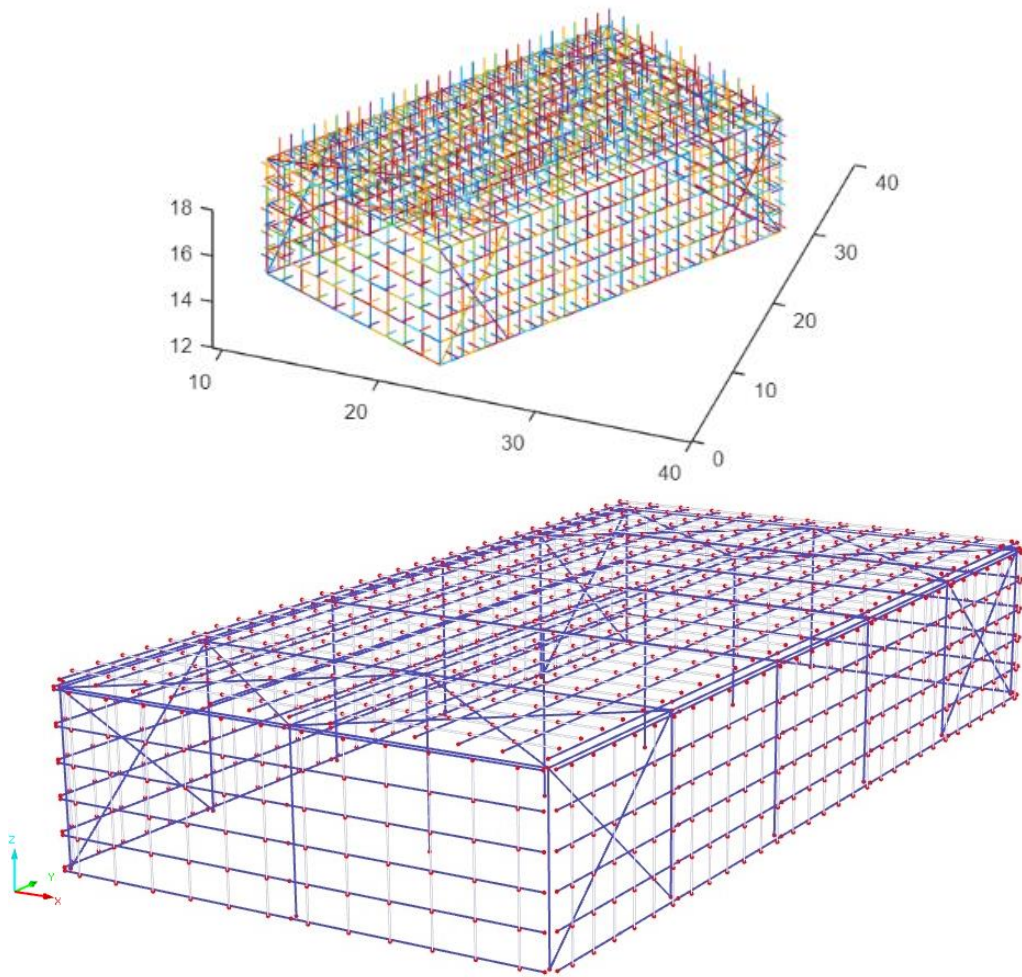
Θα εκτελεστεί πλήρης έλεγχος σε έκρηξη του φορέα τυπικού μεταλλικού κτιρίου (Σχήμα 4.1) που αποτελείται από φύλλα επικάλυψης και πλαγιοκάλυψης (χαλυβδόφυλλα) και συνδέσμους δυσκαμψίας στα ακραία φατνώματα οροφής και στις πλευρικές όψεις. Η κατασκευή έχει διαστάσεις $15\text{m} \times 30\text{m}$ και εκτείνεται σε κάτοψη 450.00m^2 και σε συνολικό ύψος 5m .

Για την πλήρη κατανόηση της αρχιτεκτονικής του κτιρίου, παραθέτονται παρακάτω εικόνες του κτιρίου οι οποίες εξήχθησαν μέσω RFEM (λογισμικό ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων 3D), μέσω MATLAB (περιβάλλον αριθμητικής υπολογιστικής και προγραμματιστική γλώσσα τέταρτης γενιάς), μέσω AutoCAD (εμπορικό λογισμικό σχεδιασμού βοηθούμενο από υπολογιστή) και μέσω Microsoft Paint 3D (εφαρμογή ράστερ γραφικών και 3D μοντελοποίησης). Πιο συγκεκριμένα, παραθέτονται η τρισδιάστατη όψη του φορέα (Σχήμα 4.2) η κάτοψη του κτιρίου (Σχήμα 4.3), η πλευρική όψη (Σχήμα 4.4) και η μετωπική όψη (Σχήμα 4.5). Οι κύριοι φορείς διατάσσονται παράλληλα μεταξύ τους, ανά σταθερές αποστάσεις με βέλτιστη τιμή 6m ή λίγο λιγότερο. Στην περίπτωση μας, οι κύριοι φορείς (Σχήμα 4.6) διατάσσονται ανά 6m . Οι υπολογισμοί έγιναν με χρήση MATLAB αλλά κυρίως μέσω Python (διερμηνεύσιμη, γενικού σκοπού και υψηλού επιπέδου, γλώσσα προγραμματισμού). Για την εισαγωγή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και των συντεταγμένων κάθε στοιχείου στην python, δημιουργήθηκε μέσω MATLAB ένα JSON-exposure αρχείο. Σε αυτό το αρχείο είχε πρόσβαση ο κώδικας, και αφού το διάβαζε είχε πλέον ό,τι στοιχείο ήταν απαραίτητο, ώστε να γίνουν οι απαραίτητοι υπολογισμοί.

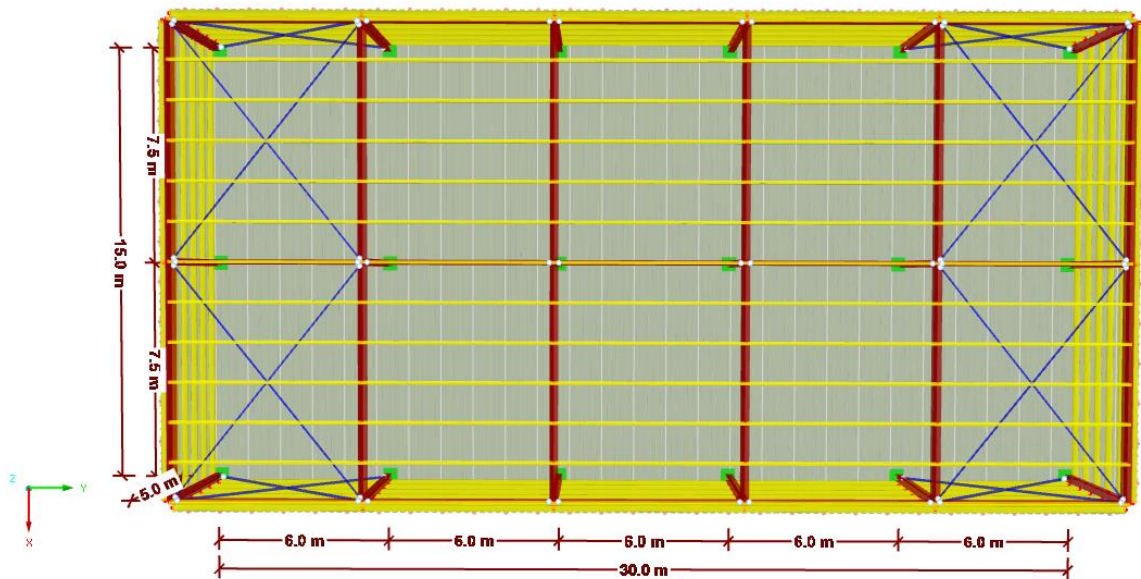
Λόγω της σχετικά λεπτής μεταλλικής επένδυσης, αυτό το κτίριο αποτελεί παράδειγμα φιλοσοφίας ουδέτερου κινδύνου. Η διαδικασία υπολογισμού των φορτίων έκρηξης και των δυναμικών ιδιοτήτων, παρουσιάζεται παρακάτω.

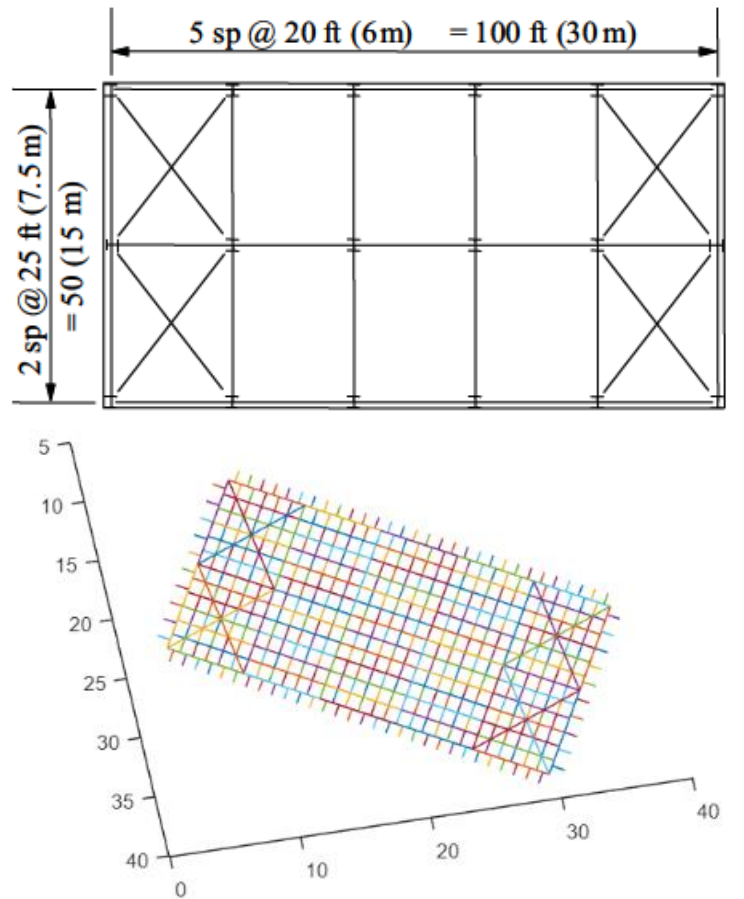


Σχήμα 4.1: Τρισδιάστατη όψη του κτιρίου.

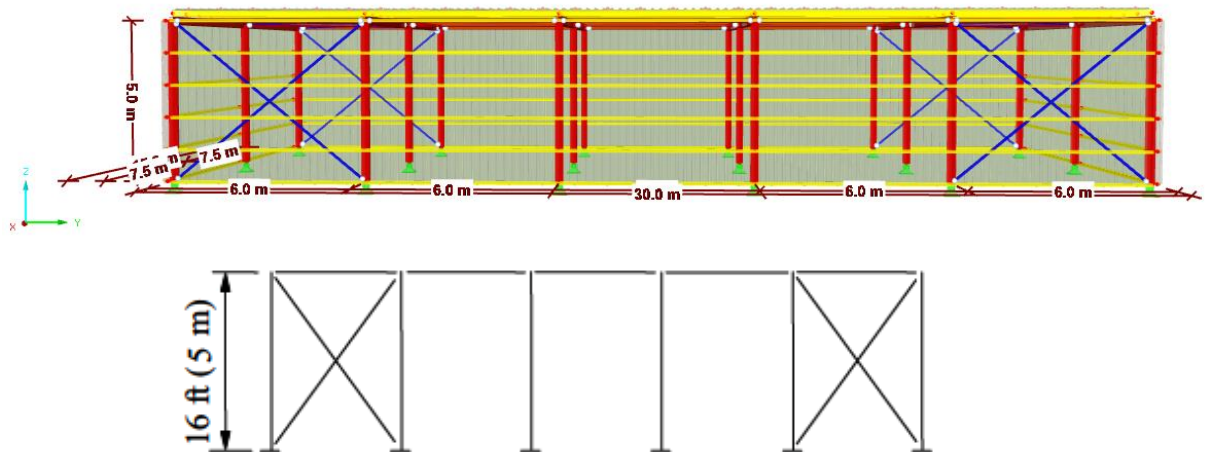


Σχήμα 4.2: Τρισδιάστατη όψη του φορέα μέσω MATLAB (πάνω σχήμα), μέσω RFEM (κάτω σχήμα)

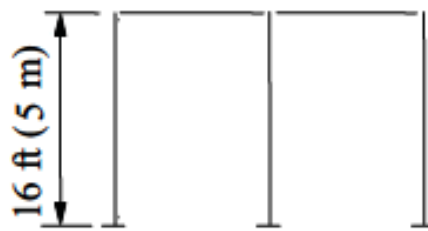
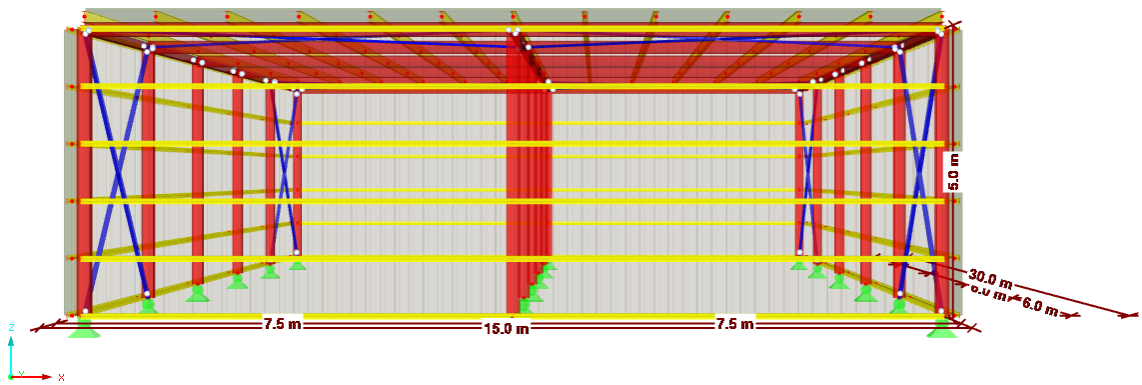




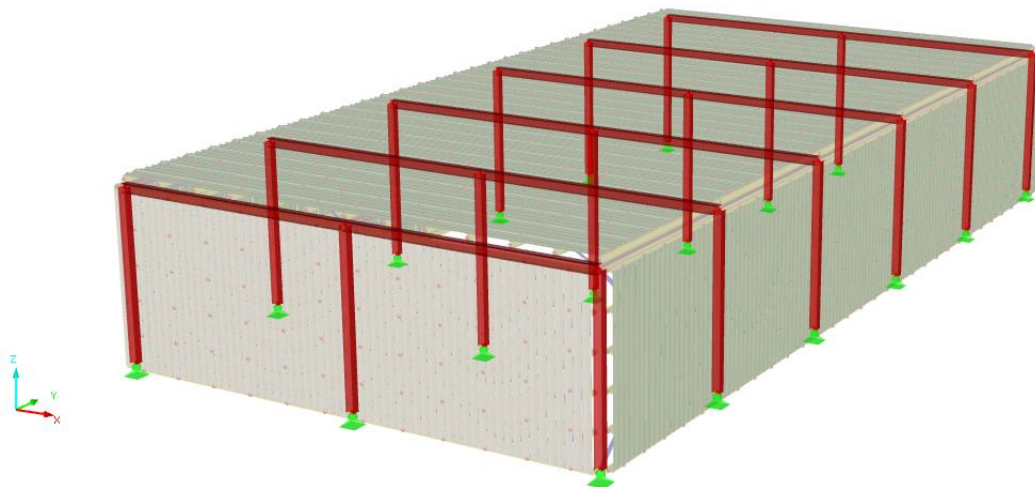
Σχήμα 4.3: Κάτοψη του κτιρίου σε 3D μέσω RFEM (πάνω σχήμα), σε 2D (μεσσαίο σχήμα), σε 2D μέσω matlab (κάτω σχήμα).



Σχήμα 4.4: Πλευρική όψη του κτιρίου σε 3D μέσω RFEM (πάνω σχήμα), σε 2D (κάτω σχήμα).



Σχήμα 4.5: Μετωπική όψη του κτιρίου σε 3D μέσω RFEM (πάνω σχήμα), σε 2D (κάτω σχήμα).



Σχήμα 4.6: Κύριοι φορείς του κτιρίου σε 3D μέσω RFEM

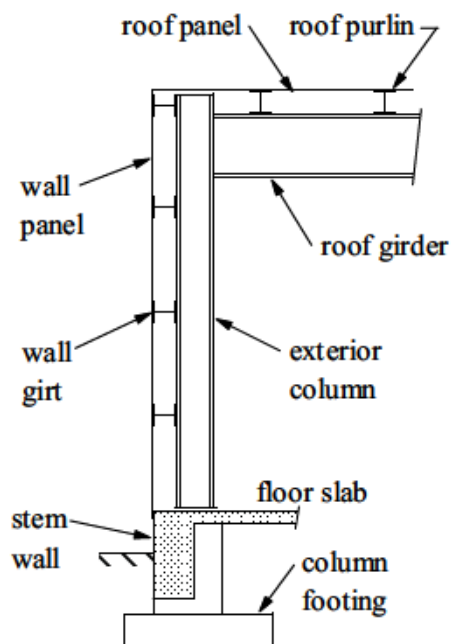
4.2 Διατομές και γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Οι διατομές του φέροντος οργανισμού παραθέτονται στον πίνακα 4.1 ενώ στο σχήμα 4.7 φαίνεται η διάταξη των στοιχείων που μελετήθηκαν:

Πίνακας 4.1: Ταξινόμηση τρομοκρατικών επιθέσεων διεθνώς

Υποστυλώματα / Μετωπικοί στύλοι:	HEA240
----------------------------------	--------

Κατακόρυφοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας:	SHS80×4
Οριζόντιοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας:	SHS50×3
Δοκοί πλαισίου:	HEA260
Κεφαλοδοκοί:	HEA260
Τηγίδες θερμής ελάσεως:	IPE200
Μηκίδες πλευρικών όψεων:	IPE200
Μηκίδες μετωπικών όψεων:	IPE200
Δοκοί πλάκας:	HEA160
Πανέλα τοίχου:	Symdeck 50
Πανέλα οροφής:	Symdeck 50



Σχήμα 4.7: Διάταξη των στοιχείων του κτιρίου

Παρακάτω δίνονται συνοπτικά οι συντεταγμένες και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κτιρίου:

8. Πανέλα (Symdeck 50):

I. Πανέλα τοίχου:

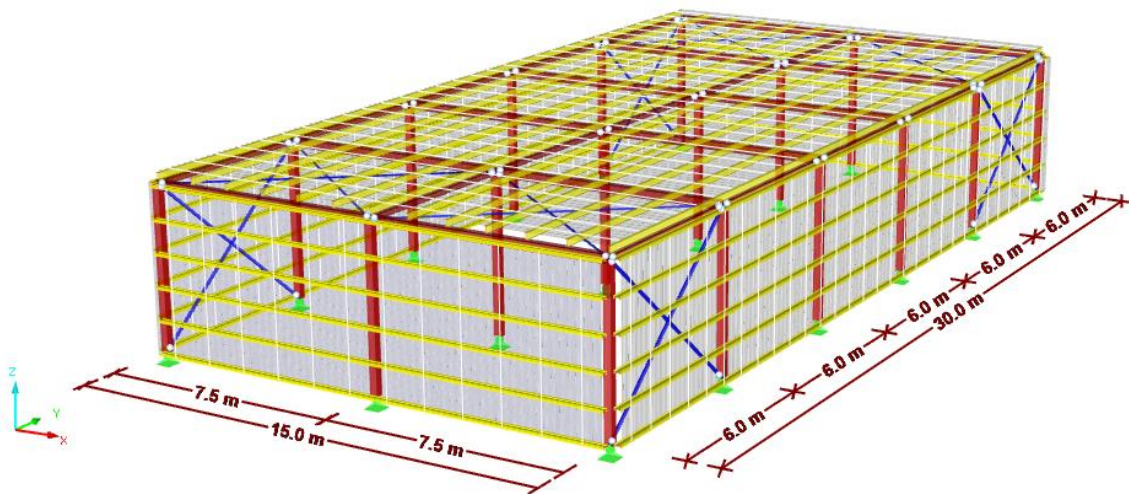
- Αποστάσεις πανέλων (Y-axis) = 1m
- Αποστάσεις πανέλων (X-axis) = 1.5m
- Αριθμός πανέλων (Y-axis) = 30
- Αριθμός πανέλων (X-axis) = 10
- Αριθμός πανέλων καθ' ύψος = 5
- Συνολικός αριθμός πανέλων = $30 \times 5 \times 2_{\text{πλευρές}} + 10 \times 5 \times 2_{\text{πλευρές}} = 400$

II. Πανέλα οροφής:

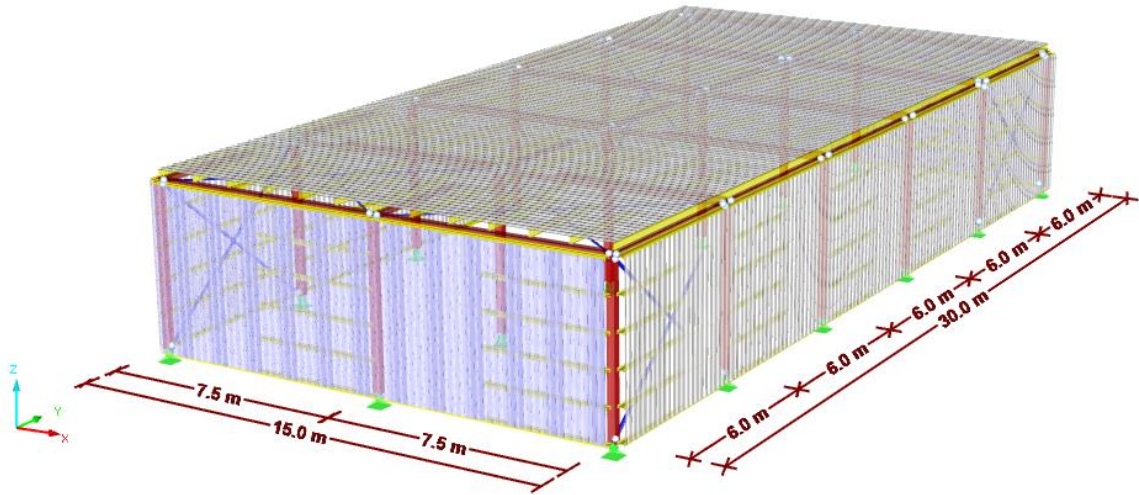
- Αποστάσεις πανέλων = 1.25m
- Αριθμός πανέλων (X-axis) = 12
- Συνολικός αριθμός πανέλων οροφής = $30 \times 12 = 360$
- Συνολικός αριθμός πανέλων = $400 + 360 = 760$

4.3 Περιγραφή πανέλων

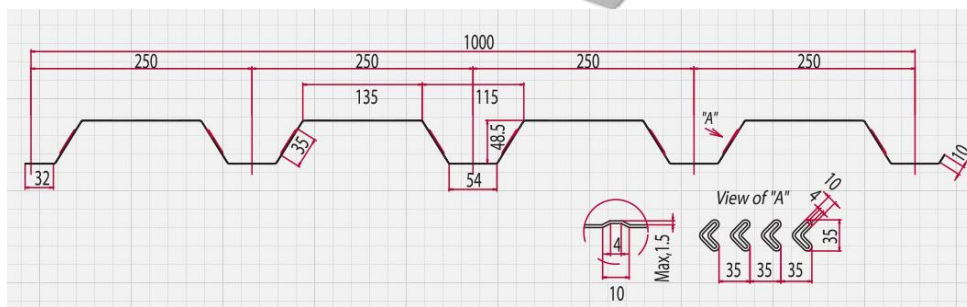
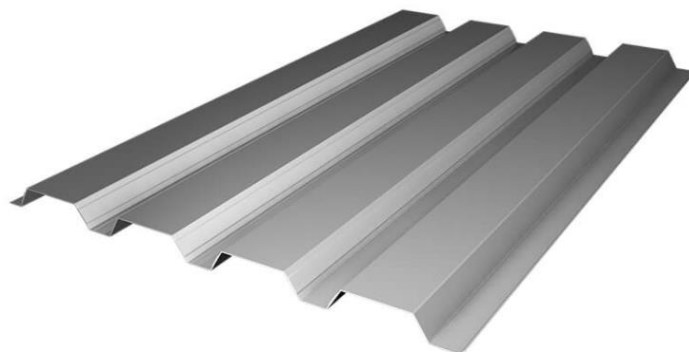
Χρησιμοποιήθηκαν φύλλα επικάλυψης και πλαγιοκάλυψης, τα οποία διακριτοποιήθηκαν στην Rython όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8, ενώ στο σχήμα 4.9 φαίνεται το κτίριο με τα πανέλα. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τραπεζοειδή χαλυβδόφυλλα Symdeck 50, η όψη αλλά και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του φαίνονται στο σχήμα 4.10. Οι τιμές του ύψους, του μήκους και του πάχους κάθε χαλυβδόφυλλου, σε κάθε όψη, παραθέτονται στον πίνακα 4.2.



Σχήμα 4.8: Διακριτοποίηση των πανέλων (άσπρες κατακόρυφες και οριζόντιες γραμμές)



Σχήμα 4.9: Το μεταλλικό κτίριο με την επένδυση



Σχήμα 4.10: Όψη τραπεζοειδούς χαλυβδόφυλλου Symdeck 50 (πάνω) και η γεωμετρία του (κάτω) [‘ΕΛΛΑΣΤΡΟΝ].

Πίνακας 4.2: Γεωμετρία των χαλυβδόφυλλων

Διαστάσεις	Ύψος (<i>pheight</i>)	Μήκος (<i>plength</i>)	Πάχος (<i>pwidth</i>)
Πλευρική όψη	1m	1m	1mm

Μετωπική όψη	1m	1.5m	1mm
Οροφή	1m	1.25m	1mm

Περισσότερα χαρακτηριστικά του τραπεζοειδούς χαλυβδόφυλλου Symdeck 50 φαίνονται στον πίνακα 4.3. Ακόμη, $E=210\text{GPa}$, $G=80769\text{Mpa}$, $\nu=0.3$, $\rho=7850\text{kg/m}^3$ με όριο διαρροής $f_y = 355\text{Mpa}$ και $f_u = 490\text{Mpa}$ (Πίνακας 4.4).

Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά χαλυβδόφυλλου Symdeck 50 [ΕΛΛΑΣΤΡΟΝ].

Πάχος	t (mm)	0,75	1,00	1,25
Βάρος	G (kg/m)	7,36	9,81	12,27
Επιφάνεια	A(cm ²)	9,07	12,10	15,12
Ροπή αδρανείας	Iy(cm ⁴)	36,32	48,45	60,56
Ροπή αντίστασης	Wy(cm ³)	11,84	15,79	19,74

Πίνακας 1: Γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά του τραπεζοειδούς χαλυβδόφυλλου SYMDECK 50.

Πάχος	t (mm)	0,75	1,00	1,25
Βάρος	G (kg/m ²)	7,36	9,81	12,27
Επιφάνεια	A(cm ² /m)	9,07	12,10	15,12
Ροπή αδρανείας	Iy(cm ⁴ /m)	36,32	48,45	60,56
Ροπή αντίστασης	Wy(cm ³ /m)	11,84	15,79	19,74

Πίνακας 1: Γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά του τραπεζοειδούς χαλυβδόφυλλου SYMDECK 50 ανά μέτρο πλάτους διατομής.

Πίνακας 4.4: Αντοχή χάλυβα για στοιχεία με ονομαστικό πάχος $t \leq 40\text{mm}$ [EUROCODE 3].

Structural Steel Strength Properties for elements with nominal thickness $t \leq 40\text{ mm}$

Symbol	Description	EN10025-2 Hot rolled products - Non-alloy structural steels				EN10025-3 Hot rolled products - Normalized/normalized rolled weldable fine grain structural steels				EN10025-4 Hot rolled products - Thermomechanical rolled weldable fine grain structural steels				EN10025-5 Hot rolled products - Structural steels with improved atmospheric corrosion resistance	
		S235	S275	S355	S450	S275 N/NL	S355 N/NL	S420 N/NL	S460 N/NL	S275 M/ML	S355 M/ML	S420 M/ML	S460 M/ML	S235 W	S355 W
f_y (MPa)	Yield strength	235	275	355	440	275	355	420	460	275	355	420	460	235	355
f_u (MPa)	Ultimate strength	360	430	490	550	390	490	520	540	370	470	520	540	360	490

5 Διαδικασία υπολογισμού

5.1 Γενικά

Τα επενδυμένα μεταλλικά κτίρια χρησιμοποιούν συμβατικό σχεδιασμό και χρησιμοποιούν θερμής έλασης δομικά στοιχεία για το πλαίσιο, τις μηκίδες και τις τεγίδες. Για τους εξωτερικούς τοίχους χρησιμοποιούνται μεταλλικά πάνελ ή μονωμένα πάνελ τύπου «σάντουιτς», με παχύτερο μέταλλο και περισσότερα στοιχεία σύνδεσης. Όσον αφορά τα προκατασκευασμένα μεταλλικά κτίρια, το μεταλλικό πλαίσιο αντέχει σε κάθετα και πλευρικά φορτία. Οι συνδέσεις ενισχύονται για την ανάπτυξη της πλήρους πλαστικής αντοχής (τελική ροπή και / ή ικανότητα διάτμησης) των δομικών μελών. Αυτός ο τύπος κτιρίου μπορεί να σχεδιαστεί οικονομικά για να αντέχει σε φορτία έκρηξης της τάξης των 3 psi (21 kPa) πλευρικής υπερπίεσης.

Πρώτο βήμα στην επίλυση, ήταν η δημιουργία ενός JSON-exposure αρχείου το οποίο περιείχε τις συντεταγμένες και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά κάθε στοιχείου του κτιρίου. Έτσι, το κτίριο είχε μοντελοποιηθεί και ήταν βάσιμο να γίνουν οι υπολογισμοί που ακολουθούν στα παρακάτω υποκεφάλαια. Εξίσου σημαντικό στην αρχή, ήταν η δημιουργία συνάρτησης, η οποία, με χρήση γεωμετρίας, υπολόγιζε τη γωνία πρόσπτωσης (angle of incidence) καθώς και την απόσταση του κέντρου βάρους του κτιρίου από το σημείο της έκρηξης (stand-off distance).

5.2 Πιέσεις και ωθήσεις

Για τον υπολογισμό της ευθραυστότητας των δομικών στοιχείων, υπολογίστηκε:

- η ανακλώμενη πίεση ref_P (MPa),
- η ανακλώμενη ώθηση ref_I (MPa/ms),
- η προσπίπτουσα πίεση inc_P (MPa) και
- η προσπίπτουσα ώθηση inc_I (MPa/ms)

που δρούσε στα στοιχεία καθώς και ο χρόνος άφιξης του κύματος T_a (ms) στα εκάστοτε στοιχεία, χρησιμοποιώντας τις πολυωνμικές εξισώσεις των Kingery και Bulmash από το IATG 01.80 [2015], η γενική πολυωνμική μορφή των οποίων φαίνεται στον πίνακα 5.1.

Οι αριθμητικές τιμές για τις σταθερές 'C' και 'K' είναι αυτές για 1kg ισοδύναμη φόρτιση TNT. Προβλέψεις για άλλες εκρήξεις, απαιτούν πρώτα τον υπολογισμό της ισοδυναμίας σε TNT.

Πίνακας 5.1: Γενική πολυωνμική μορφή [IATG 01.80].

$Y = C_0 + C_1U + C_2U^2 + C_3U^3 \dots\dots\dots C_nU^n$	<p>Y = Common Logarithm of the Air Blast Parameter (metric) (Pressure or Impulse) $C_{0,1,2 \text{ etc}} = \text{Constant}$ $U = K_0 + K_1T$ $K_{0,1 \text{ etc}} = \text{Constant}$ T = Common Logarithm of the Distance (m)</p>
---	--

Οι εξισώσεις συνοψίζονται στους πίνακες 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, όπου φαίνονται οι συναρτήσεις που αντιπροσωπεύουν τις παραμέτρους της έκρηξης στον αέρα συναρτήσει της απόστασης σε μέτρα για 1kg TNT ημισφαιρικής επιφάνειας εκρήξεως για:

i) Προσπίπτουσα υπερπίεση:

Οι εξισώσεις του πίνακα 5.2 έχουν δυνατότητα εφαρμογής για 0.05 – 40m.

Πίνακας 5.2: Πολυώνυμο για προσπίπτουσα υπερπίεση [IATG 01.80].

$U = -0.214362789151 + 1.35034249993T$ <p style="text-align: center;"><i>Then substitute U into</i></p> $Y = 2.78076916577 - 1.6958988741U + 0.154159376846U_2 + 0.514060730593U_3 - 0.0988534365274U_4 - 0.293912623038U_5 - 0.0268112345019U_6 + 0.109097496421U_7 + 0.00162846756311U_R$	$U = K_0 + K_1T$ $T = \text{Common Logarithm of the Distance (m)}$ $Y = \text{Common Logarithm of the Air Blast Parameter (metric) (Pressure or Impulse)}$
---	--

ii) Προσπίπτουσα ώθηση:

Οι εξισώσεις του πίνακα 5.3 έχουν δυνατότητα εφαρμογής για κλιμακωτές αποστάσεις μεταξύ 0.0674 και 0.955m.

Πίνακας 5.3: Πολυώνυμο για προσπίπτουσα ώθηση (πολύ κοντινό πεδίο) [IATG 01.80].

$U = 2.06761908721 + 3.0760329666T$ <p style="text-align: center;"><i>Then substitute U into</i></p> $Y = 2.52455620925 - 0.502992763686U + 0.171335645235U_2 + 0.0450176963051U_3 - 0.0118964626402U_4$	$U = K_0 + K_1T$ $T = \text{Common Logarithm of the Distance (m)}$ $Y = \text{Common Logarithm of the Air Blast Parameter (metric) (Pressure or Impulse)}$
--	--

Οι εξισώσεις του πίνακα 5.4 έχουν εφαρμογή για εύρη όσο το κύμα της έκρηξης απομακρύνεται από το φορτίο της έκρηξης (σε κλιμακωτή απόσταση 0.955 ως 40m.)

Πίνακας 5.4: Πολυώνυμο για προσπίπτουσα ώθηση [IATG 01.80].

$U = -1.94708846747 + 2.40697745406T$ <p style="text-align: center;"><i>Then substitute U into</i></p> $Y = 1.67281645863 - 0.384519026965U - 0.0260816706301U_2 + 0.00595798753822U_3 - 0.014544526107U_4 - 0.00663289334734U_5 - 0.00284189327204U_6 + 0.0013644816277U_7$	$U = K_0 + K_1T$ $T = \text{Common Logarithm of the Distance (m)}$ $Y = \text{Common Logarithm of the Air Blast Parameter (metric) (Pressure or Impulse)}$
--	--

iii) Ανακλώμενη πίεση:

Οι εξισώσεις του πίνακα 5.5 έχουν εφαρμογή για εύρη μεταξύ 0.05-40m

Πίνακας 5.5: Πολυώνυμο για ανακλώμενη υπερπίεση [IATG 01.80].

$U = -0.240657322658 + 1.36637719229T$ <p style="text-align: center;"><i>Then substitute U into</i></p> $Y = 3.40283217581 - 2.21030870597U + 0.218536586295U_2 + 0.895319589372U_3 + 0.24989009775U_4 - 0.569249436807U_5 - 0.11791682383U_6 + 0.224131161411U_7 + 0.0245620259375U_8 - 0.455116002694U_9$	$U = K_0 + K_1T$ $T = \text{Common Logarithm of the Distance (m)}$ $Y = \text{Common Logarithm of the Air Blast Parameter (metric) (Pressure or Impulse)}$
---	--

iv) Ανακλώμενη ώθηση

Οι εξισώσεις του πίνακα 5.6 έχουν δυνατότητα εφαρμογής για 0.05 – 40m.

Πίνακας 5.6: Πολυώνυμο για ανακλώμενη ώθηση [IATG 01.80].

$U = -0.246208804814 + 1.33422049854T$ <p style="text-align: center;"><i>Then substitute U into</i></p> $Y = 2.70588058103 - 0.949516092853U + 0.112136118689U_2 - 0.0250659183287U_3$	$U = K_0 + K_1 T$ $T = \text{Common Logarithm of the Distance (m)}$ $Y = \text{Common Logarithm of the Air Blast Parameter (metric) (Pressure or Impulse)}$
--	---

Οι συναρτήσεις για την πίεση (σχέση 5.1) και την ώθηση (σχέση 5.2), τα αποτελέσματα των οποίων χρησιμοποιήθηκαν έπειτα στην συνάρτηση SDOF του κώδικα, υπολογίστηκαν ως εξής:

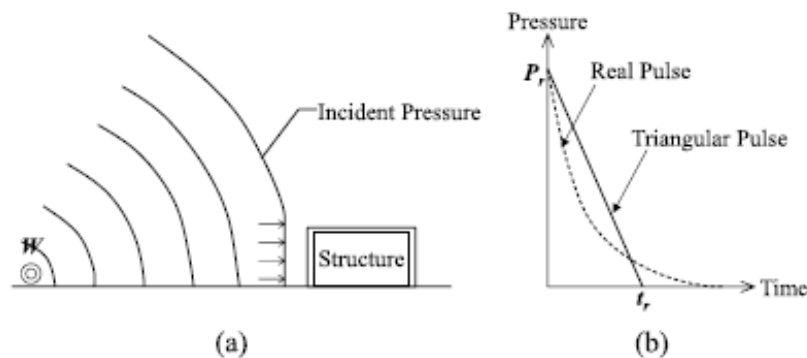
$$p_s = \text{ref}_p \times \cos\alpha^2 + \text{inc}_p \times (1 + \cos\alpha - 2 \times \cos\alpha^2), \quad (5.1)$$

$$i_s = \text{ref}_I \times \cos\alpha^2 + \text{inc}_I \times (1 + \cos\alpha - 2 \times \cos\alpha^2), \quad (5.2)$$

όπου ref_p , ref_I είναι η ανακλώμενη πίεση και ώθηση αντίστοιχα, inc_p , inc_I είναι η προσπίπτουσα πίεση και ώθηση αντίστοιχα, ενώ α είναι η γωνία πρόσπτωσης. Η διάρκεια της ανακλώμενης πίεσης δίνεται από την σχέση 5.3:

$$t_d = 2 \times \frac{i_s}{p_s}, \quad (5.3)$$

Ο χρόνος φόρτισης t_d υπολογίστηκε, σύμφωνα με τους Nagata et al. (2017), χρησιμοποιώντας τη μέγιστη ανακλώμενη υπερπίεση και την ώθηση, θεωρώντας γραμμικοποίηση, αμελώντας την αρνητική φάση όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1.



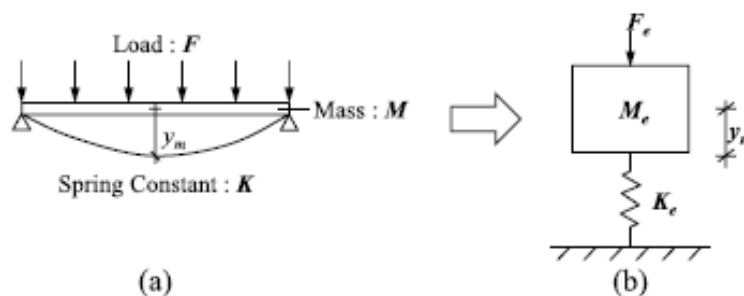
Σχήμα 5.1: Εξιδανικευμένη χρονοϊστορία πίεσης: (a) γραφική απεικόνιση έκρηξης που δρα στο κτίριο και (b) χρονοϊστορία πίεσης [Nagata et al. (2017)].

5.3 Ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα (SDOF)

Διεθνώς, η βασική διαδικασία εφαρμογής που τυγχάνει ευρείας αποδοχής είναι η μέθοδος του ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή (SDOF). Ένα στοιχείο που φορτίζεται από έκρηξη, μπορεί να μοντελοποιηθεί κατά προσέγγιση ως ένα ελαστοπλαστικό δυναμικό σύστημα με έναν βαθμό ελευθερίας (SDOF) ο οποίος αντιστοιχεί στη μέγιστη

παραμόρφωση (y_{max}) λόγω έκρηξης. Στην ουσία μετατρέπονται τα στοιχεία του φορέα σε ισοδύναμους μονοβάθμιους ταλαντωτές και είτε επιλύονται απλοποιητικά μέσω διαγραμμάτων (βλ. σελ. 31 σχ. 3.9 - 3.12) είτε εκτελούνται χρονικές αναλύσεις. Στην παρούσα εργασία για την επίλυση, έγιναν χρονικές αναλύσεις, σύμφωνα με Chorga. A (1981). Ωστόσο, αυτή η διαδικασία για λόγους εσωτερικής ασφάλειας προστατεύεται ερευνητικά και σχεδιαστικά στις εκάστοτε χώρες που έχουν προάγει την έρευνα γύρω από τη μέθοδο (Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής και Ηνωμένο Βασίλειο). Έτσι, έχει καταστεί δυσχερής η διαδικασία ανάλυσης μιας κατασκευής σε έκρηξη.

Η μέγιστη μετακίνηση y_{max} λόγω του φορτίου έκρηξης υπολογίστηκε, σύμφωνα με τους Nagata et al. (2017), χρησιμοποιώντας μοντέλο ενός βαθμού ελευθερίας (SDOF) όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2. Στο μοντέλο, λαμβάνονται η μέγιστη αντίσταση R_m , η ιδιοπερίοδος T , και το όριο ελαστικής παραμόρφωσης y_{el} . Η συνολική διάρκεια της ανάλυσης ορίστηκε 200ms με χρονικό βήμα 0.1ms.



Σχήμα 5.2: Ανάλυση απόκρισης του SDOF μοντέλου: (α) Δοκάρι που υποβάλλεται σε ομοιόμορφη φόρτιση και (β) SDOF μοντέλο [Nagata et al. (2017)].

Σύμφωνα με Jon A. Schmidt (2007), η ενεργός μάζα (m_e), η ελαστική και ελαστοπλαστική δυσκαμψία (k_1 και k_2), η υπολειπόμενη διαρροή και η αντοχή μετά την εφαρμογή άλλων φορτίων (R_y και R_n) του στοιχείου, προέρχονται από τις φυσικές διαμορφώσεις και τα χαρακτηριστικά του. Ο πίνακας 5.7 συνοψίζει αυτές τις παραμέτρους για ένα στοιχείο μιας διεύθυνσης οποιουδήποτε υλικού για διάφορες συνθήκες στα άκρα όσον αφορά την ομοιόμορφα κατανομημένη μάζα του (m), το μέτρο ελαστικότητας (E), τη ροπή αδρανείας (I), το μήκος ανοίγματος (L) και τις υπολειπόμενες ροπές στο μέσο του ανοίγματος (M_{nm}) και στα πακτωμένα άκρα.

Πίνακας 5.7: Ενεργές ιδιότητες στοιχείων μιας διεύθυνσης [Jon A. Schmidt (2007)].

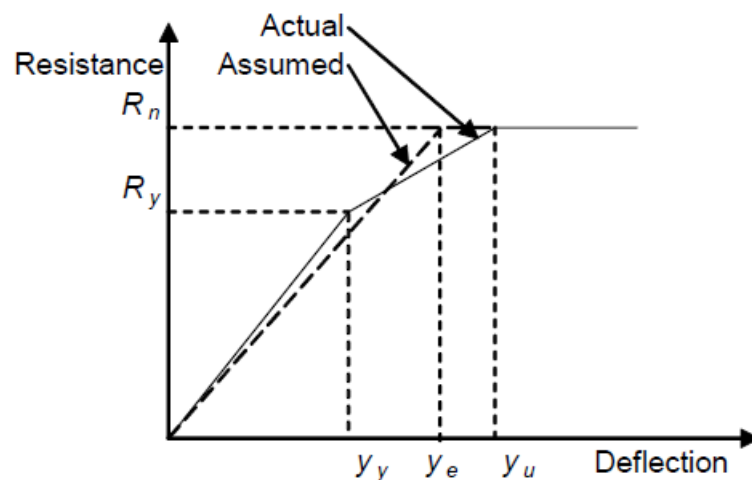
End Conditions	Mass m_e	Elastic Stiffness k_1	Ratio M_{nm}/M_{nae}	Elastic-Plastic Stiffness k_2	Yield Strength R_y	Ultimate Strength R_n
Fixed/Fixed	$0.78m$	$384EI/L^3$	$>1/2$	$76.8EI/L^3$	$12M_{nae}/L$	$8(M_{nm}+M_{nae})/L$
			$\leq 1/2$	$128EI/L^3$	$24M_{nm}/L$	$8(M_{nm}+M_{nae})/L$
Fixed/Pinned	$0.78m$	$185EI/L^3$	$>9/16$	$76.8EI/L^3$	$8M_{nae}/L$	$4(2M_{nm}+M_{nae})/L$
			$\leq 9/16$	$32.8EI/L^3$	$14.2M_{nm}/L$	$3.2(2.67M_{nm}+M_{nae})/L$
Fixed/Free	$0.65m$	$8EI/L^3$	N/A	0	$2M_{nae}/L$	$2M_{nae}/L$
Pinned/Pinned	$0.78m$	$76.8EI/L^3$	N/A	0	$8M_{nm}/L$	$8M_{nm}/L$

Σύμφωνα με τον Jon A. Schmidt (2007), όπως φαίνεται στο σχήμα 5.3, η απλοποιημένη συνάρτηση αντίστασης των αμφίπακτων η μονόπακτων στοιχείων είναι τριγραμμική. Η παραμόρφωση αυξάνεται γραμμικά με την ελαστική δυσκαμψία k_1 μέχρι

να σχηματιστεί η αρχική πλαστική άρθρωση στη διαρροή R_y , έπειτα η ελαστοπλαστική δυσκαμψία k_2 κυριαρχεί έως τη μέγιστη R_n . Παρόλο που είναι δυνατόν να αναλυθεί το στοιχείο χρησιμοποιώντας αυτή τη συνάρτηση αντίστασης, μια κοινή απλοποίηση είναι η χρήση ισοδύναμης ελαστικής δυσκαμψίας προσαρμοσμένη έτσι ώστε να παρέχει το ίδιο εμβαδόν κάτω από την καμπύλη και επομένως την ίδια απορρόφηση ενέργειας:

$$k_e = \frac{k_2}{1 - \left(1 - \frac{k_2}{k_1}\right) \left(\frac{R_y}{R_n}\right) \left(2 - \frac{R_y}{R_n}\right)}, \quad (5.4)$$

Όταν οι ροπές στο μέσο και στα άκρα είναι ίσες, τότε έχουμε $k_e = 307EI/L^3$ για αμφίπακτα στοιχεία και $k_e = 160EI/L^3$ για μονόπακτα στοιχεία.



Σχήμα 5.3: Απλοποιημένη συνάρτηση αντίστασης των αμφίπακτων η μονόπακτων στοιχείων [Jon A. Schmidt (2007)].

Συνολικά, ο κώδικας δύναται να υπολογίσει τις δυναμικές αντιδράσεις των:

- i. πανέλων οροφής,
- ii. πανέλων τοίχου σε όλες τις πλευρές,
- iii. μηκίδων και
- iv. τεγίδων,

για τις παραπάνω συνθήκες στήριξης, όπως επίσης και τις χρονοϊστορίες:

1. μετακίνησης,
2. ταχύτητας,
3. επιτάχυνσης,
4. αντίστασης και
5. πίεσης.

Ωστόσο, στο παρόν τεύχος, παρουσιάζονται μόλις τα αποτελέσματα και η απόκριση των πανέλων τοίχου σε όλες τις πλευρές.

Η ιδιοπερίοδος και η απόσβεση υπολογίστηκαν σύμφωνα με τις σχέσεις 5.5 και 5.6 αντίστοιχα:

$$T = 2\pi \times \sqrt{\frac{K_{LM} \times m_e}{k_1}}, \quad (5.5)$$

όπου K_{LM} είναι ο συντελεστής μετασχηματισμού φορτίου – μάζας, m_e η ισοδύναμη μάζα και k_I η δυσκαμψία του 1^{ου} κλάδου. Στο υποκεφάλαιο 5.4 αναλύεται ο τρόπος υπολογισμού τους, ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες στήριξης.

Ο συντελεστής απόσβεσης θεωρήθηκε $\zeta = 3\%$, επομένως η απόσβεση:

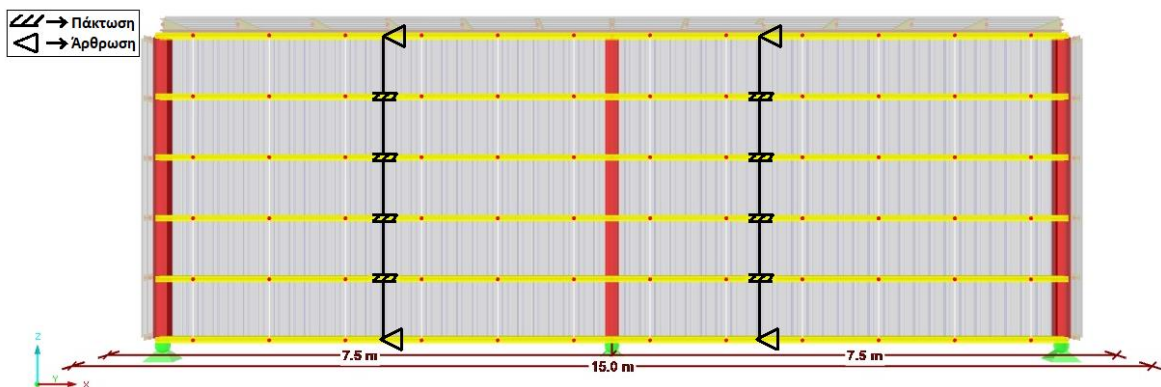
$$C = 2 \times \zeta \times m_e \times \omega = 0.06 \times m_e \times \omega \quad (5.6)$$

5.4 Συνθήκες στήριξης

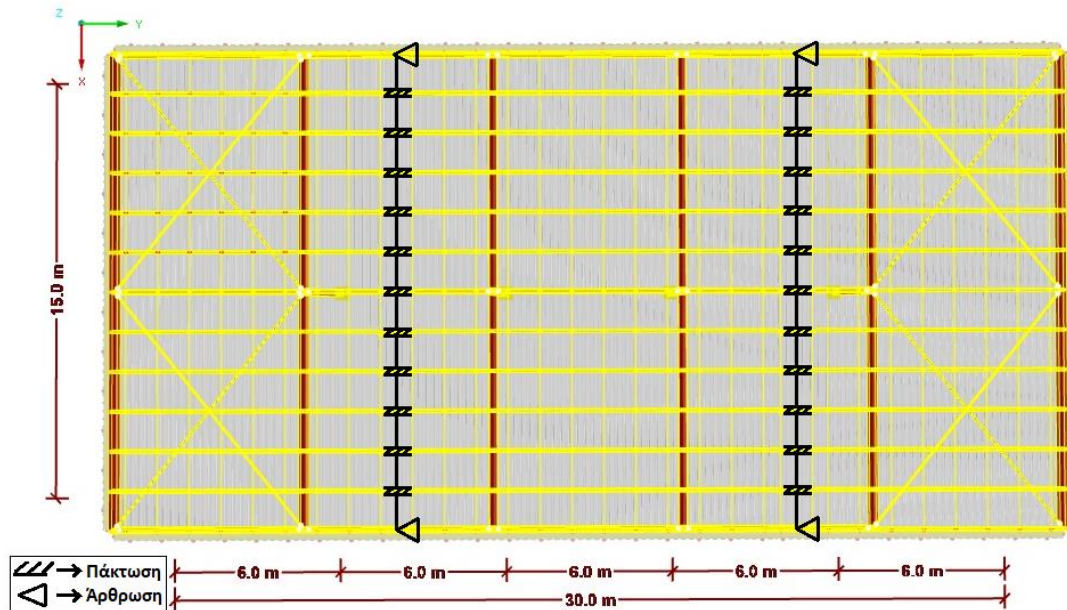
Βασική προϋπόθεση για τον υπολογισμό των παραπάνω, καθώς και για όποιον υπολογισμό ήταν απαραίτητος στην πορεία, ήταν η θεώρηση συγκεκριμένων συνθηκών στήριξης. Σε αυτό το υπο-κεφάλαιο περιγράφονται οι συνθήκες στήριξης που ορίστηκαν, καθώς και οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των δυναμικών αντιδράσεων για όλα τα πανέλα τοίχου και οροφής, για τις μηκίδες και τις τεγίδες.

5.4.1 Πανέλα τοίχου και οροφής

Στα ακραία πανέλα τοίχου, δηλαδή σε αυτά που βρίσκονταν στη βάση ή σε αυτά στην κορυφή του κτιρίου, στην πλευρά που δεν συνδέονται με κάποιο πανέλο τοίχου, υπάρχει άρθρωση ενώ στα υπόλοιπα σημεία στήριξης, θεωρήθηκε πάκτωση (Σχήμα 5.4). Ομοίως και στα πανέλα οροφής (Σχήμα 5.5).



Σχήμα 5.4: Συνθήκες στήριξης πανέλων τοίχου.



Σχήμα 5.5: Συνθήκες στήριξης πανέλων οροφής.

Πιο συγκεκριμένα, αφού κατανεμήθηκε ομοιόμορφα το φορτίο πίεσης πάνω στην επιφάνειά των πανέλων, ανάλογα με τη θέση τους στο κτίριο και κατ'επέκταση, τις συνθήκες στήριξής τους, υπολογίστηκαν οι παραπάνω δυναμικές αντιδράσεις και οι χρονοϊστορίες. Από τον πίνακα 4.3 έχουμε για τη μάζα του πανέλου ανά επιφάνεια $m = 9.81 \text{ kg} / \text{m}^2$. Η σχέση 5.7, δίνει την μάζα του πανέλου:

$$m_{pan} = m \times (plength \times pheight), \quad (5.7)$$

όπου, $plength$ είναι το μήκος των πανέλων και $pheight$ είναι το ύψος των πανέλων και δίνονται στον πίνακα 4.2 για κάθε επιφάνεια.

Η ισοδύναμη μάζα υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση 5.8:

$$m_e = K_{LM} \times m_{pan}, \quad (5.8)$$

όπου K_{LM} είναι ο συντελεστής μετασχηματισμού φορτίου – μάζας.

Η μέγιστη αντίσταση δίνεται από την σχέση 5.9

$$R_m = W_y \times f_y, \quad (5.9)$$

όπου W_y είναι η πλαστική ροπή αντίστασης ως προς y - y .

5.4.1.1 Μονόπακτα πανέλα

Οι παρακάτω υπολογισμοί έγιναν σύμφωνα με τον πίνακα 5.8 για μήκος L , ίσο με $pheight$ ($=1\text{m}$). Πιο συγκεκριμένα, ο υπολογισμός της αντοχής του 1^{ου} κλάδου r_1 και 2^{ου} κλάδου r_2 (Σχήμα 5.3) της απλοποιημένης συνάρτησης αντίστασης μονόπακτων στοιχείων, δίνεται από τις σχέσεις 5.10 και 5.11 αντίστοιχα, ενώ για τον υπολογισμό της δυσκαμψίας

του 1^{ου} κλάδου k_1 και 2^{ου} κλάδου k_2 ισχύουν οι σχέσεις 5.12 και 5.13 αντίστοιχα (θεωρήθηκε $M_{ps} = M_{pm}$). Για τον υπολογισμό του συντελεστή μετασχηματισμού φορτίου – μάζας K_{LM} , χρησιμοποιήθηκε η σχέση 5.14.

$$r_1 = 8 \times \frac{R_m}{plength}, \quad (5.10)$$

$$r_2 = 12 \times \frac{R_m}{plength}, \quad (5.11)$$

$$k_1 = \frac{185 \times E \times I_y}{plength^3}, \quad (5.12)$$

$$k_2 = \frac{384 \times E \times I_y}{5 \times plength^3}, \quad (5.13)$$

$$K_{LM} = \frac{(K_{elastic} + K_{elastoplastic})/2 + K_{plastic}}{2}, \quad (5.14)$$

Οι δυναμικές αντιδράσεις στην άρθρωση ($reacp$) και στην πάκτωση ($reacf$) του πανέλου υπολογίστηκαν σύμφωνα με τις σχέσεις 5.15 - 5.20 για κάθε περίπτωση, όπου R είναι η αντίσταση και F το φορτίο:

Για $-r_1 < R < r_1$:

$$reacp = 0.26 \times R + 0.12 \times F, \quad (5.15)$$

$$reacf = 0.43 \times R + 0.19 \times F, \quad (5.16)$$

Για $-r_2 < R < r_2$:

$$reacp = 0.39 \times R + 0.11 \times F - \frac{r_1}{8}, \quad (5.17)$$

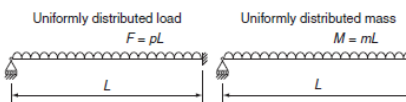
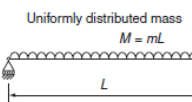
$$reacf = 0.39 \times R + 0.11 \times F + \frac{r_1}{8}, \quad (5.18)$$

Αλλιώς:

$$reacp = 0.38 \times R + 0.12 \times F - \frac{r_1}{8}, \quad (5.19)$$

$$reacf = 0.38 \times R + 0.12 \times F + \frac{r_1}{8}, \quad (5.20)$$

Πίνακας 5.8: Συντελεστές ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή για μονόπακτα στοιχεία [Cormie D. et al. (2009)].

Loading diagram	Mass diagram	Strain range	Load factor, K_L	Mass factor, K_M	Load-mass factor, K_{LM}	Maximum resistance, R_m	Stiffness, k	Equivalent stiffness, $k_e^{[c]}$	Support shear, V_s	Ultimate shear stress, v	Dynamic reaction, V
		Elastic	0.58	0.45	0.78	$\frac{8M_{ps}}{L}$	$\frac{185EI}{L^3}$	$\frac{160EI}{L^3}$	$V_{s1} = \frac{3R_m}{8}$	$v_1 = R_m \left(\frac{3}{8d_k} - \frac{1}{L} \right)$	$V_1 = 0.26R + 0.12F$ $V_2 = 0.43R + 0.19F$
		Elasto-plastic	0.64	0.50	0.78	$\frac{4(M_{ps} + 2M_{pm})}{L}$	$\frac{384EI}{5L^3}$		$V_{s2} = \frac{5R_m}{8}$	$v_2 = R_m \left(\frac{5}{8d_k} - \frac{1}{L} \right)$	$V = 0.39R + 0.11F$ $\pm M_B/L$
		Plastic	0.50	0.33	0.66	$\frac{4(M_{ps} + 2M_{pm})}{L}$	0				

5.4.1.2 Αμφίπακτα πανέλα

Οι παρακάτω υπολογισμοί έγιναν σύμφωνα με τον πίνακα 5.9 για μήκος L , ίσο με $height (=1m)$. Πιο συγκεκριμένα, ο υπολογισμός της αντοχής του 1^{ου} κλάδου r_1 και 2^{ου} κλάδου r_2 (Σχήμα 5.3) της απλοποιημένης συνάρτησης αντίστασης αμφίπακτων στοιχείων, δίνεται από τις σχέσεις 5.21 και 5.22 αντίστοιχα, ενώ για τον υπολογισμό της δυσκαμψίας του 1^{ου} κλάδου k_1 και 2^{ου} κλάδου k_2 ισχύουν οι σχέσεις 5.23 και 5.13 αντίστοιχα (θεωρήθηκε $M_{ps} = M_{pm}$). Για τον υπολογισμό του συντελεστή μετασχηματισμού φορτίου – μάζας K_{LM} , χρησιμοποιήθηκε η σχέση 5.14.

$$r_1 = 12 \times \frac{R_m}{plength}, \quad (5.21)$$

$$r_2 = 16 \times \frac{R_m}{plength}, \quad (5.22)$$

$$k_1 = \frac{384 \times E \times I_y}{plength^3}, \quad (5.23)$$

Οι δυναμικές αντιδράσεις στην πάκτωση ($reactf$) του πανέλου υπολογίστηκαν σύμφωνα με τις σχέσεις 5.24 - 5.26 για κάθε περίπτωση, όπου R είναι η αντίσταση και F το φορτίο:

$$Av - r_1 < R < r_1:$$

$$reactf = 0.36 \times R + 0.14 \times F, \quad (5.24)$$

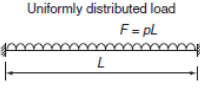
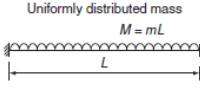
$$Av - r_2 < R < r_2:$$

$$reactf = 0.39 \times R + 0.11 \times F, \quad (5.25)$$

Αλλιώς:

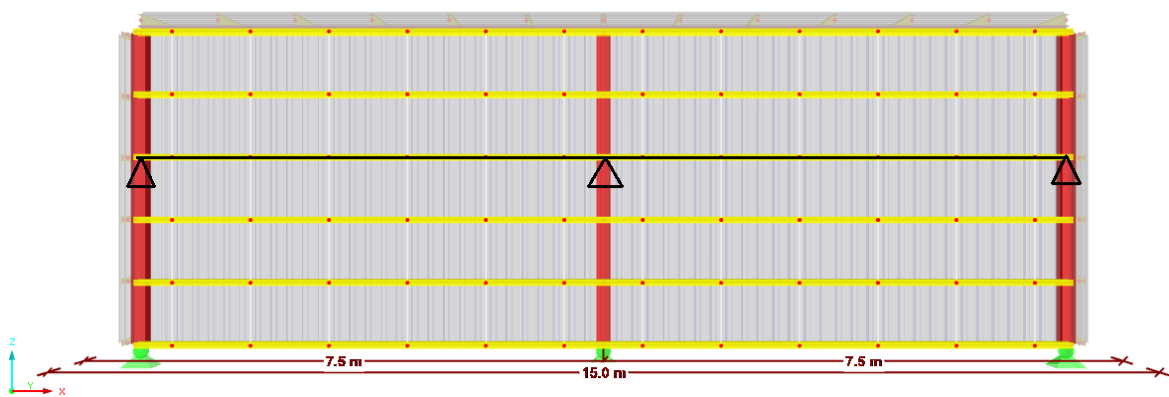
$$reactf = 0.38 \times R + 0.12 \times F, \quad (5.26)$$

Πίνακας 5.9: Συντελεστές ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή για αμφίπακτα στοιχεία [Cormie D. et al. (2009)].

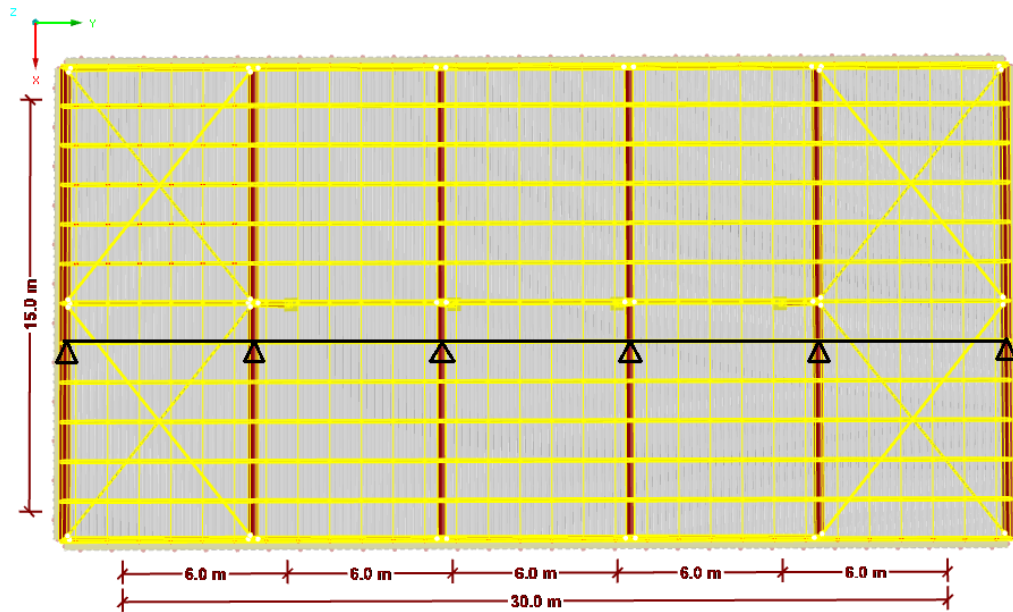
Loading diagram	Mass diagram	Strain range	Load factor, K_L	Mass factor, K_M	Load-mass factor, K_{LM}	Maximum resistance, R_m	Stiffness, Equivalent stiffness, k	Support shear, V_s	Ultimate shear stress, v	Dynamic reaction, V
		Elastic	0.53	0.41	0.77	$\frac{12M_{ps}}{L}$	$\frac{384EI}{L^3}$	$\frac{307EI}{L^3}$		$0.36R + 0.14F$
		Elasto-plastic	0.64	0.50	0.78	$\frac{8(M_{ps} + M_{pm})}{L}$	$\frac{384EI}{5L^3}$	$\frac{R_m}{2}$	$R_m \left(\frac{1}{2d_e} - \frac{1}{L} \right)$	$0.39R + 0.11F$
		Plastic	0.50	0.33	0.66	$\frac{8(M_{ps} + M_{pm})}{L}$	0			$0.38R_m + 0.12F$

5.4.2 Μηκίδες και τεγίδες

Οι μηκίδες θεωρήθηκαν αμφιαρθρωτά μέλη όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.6. Οι ίδιες συνθήκες στήριξης θεωρήθηκαν και στις τεγίδες (Σχήμα 5.7). Οι παρακάτω υπολογισμοί έγιναν σύμφωνα με τον πίνακα 5.10. Πιο συγκεκριμένα, ο υπολογισμός της αντοχής, r_1 , δίνεται από την σχέση 5.27, ενώ για τον υπολογισμό του συντελεστή μετασχηματισμού φορτίου – μάζας K_{LM} , χρησιμοποιήθηκε η σχέση 5.28.

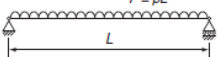
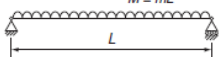


Σχήμα 5.6: Συνθήκες στήριξης μηκίδων.



Σχήμα 5.7: Συνθήκες στήριξης τεγίδων.

Πίνακας 5.10: Συντελεστές ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή για αμφιέριστα στοιχεία.

Loading diagram	Mass diagram	Strain range	Load factor, K_L	Mass factor, K_M	Load-mass factor, K_{LM}	Maximum resistance, R_m	Stiffness, k	Support shear, V_s	Ultimate shear stress, v	Dynamic reaction V
Uniformly distributed load $F = \rho L$ 	Uniformly distributed mass $M = mL$ 	Elastic	0.64	0.50	0.78	$\frac{8M_p}{L}$	$\frac{384EI}{5L^3}$	$\frac{R_m}{2}$	$R_m \left(\frac{1}{2d_c} - \frac{1}{L} \right)$	$0.39R + 0.11F$
		Plastic	0.50	0.33	0.66	$\frac{8M_p}{L}$	0			$0.38R_m + 0.12F$

$$r_1 = R_m = E \times f_y, \quad (5.27)$$

$$K_{LM} = \frac{K_{elastic} + K_{plastic}}{2}, \quad (5.28)$$

Οι δυναμικές αντιδράσεις στις αρθρώσεις (reacp) του πάνελου υπολογίστηκαν σύμφωνα με τις σχέσεις 5.29 και 5.30 για κάθε περίπτωση, όπου F είναι το φορτίο:

Αν $-r_1 < R < r_1$:

$$reacp = 0.38 \times R + 0.12 \times F, \quad (5.29)$$

Αλλιώς:

$$reacp = 0.39 \times R + 0.11 \times F, \quad (5.30)$$

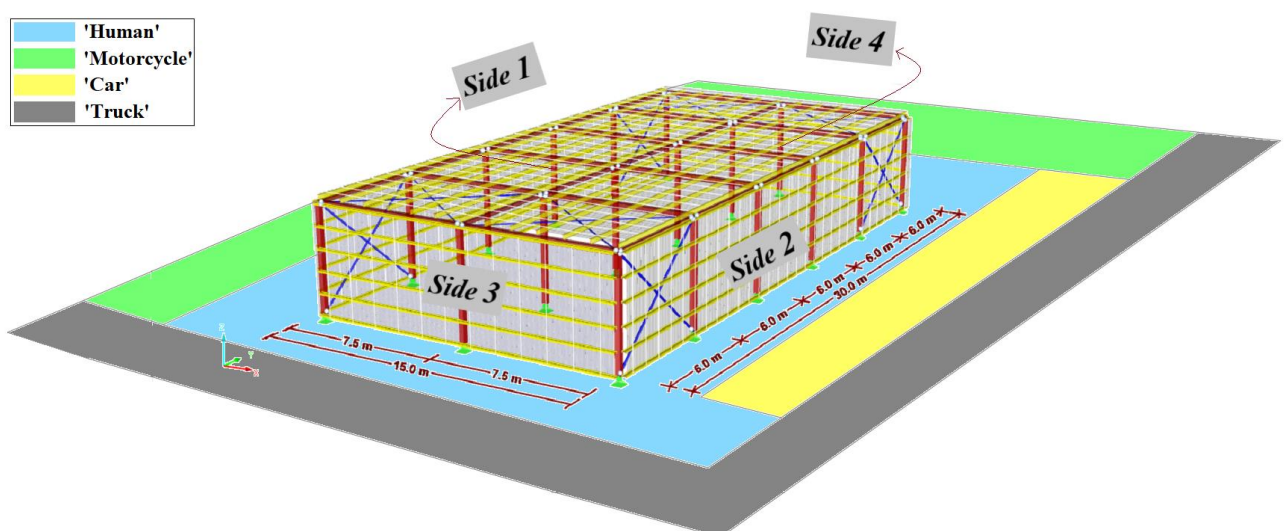
6 Απόκριση πανέλων

6.1 Γενικά

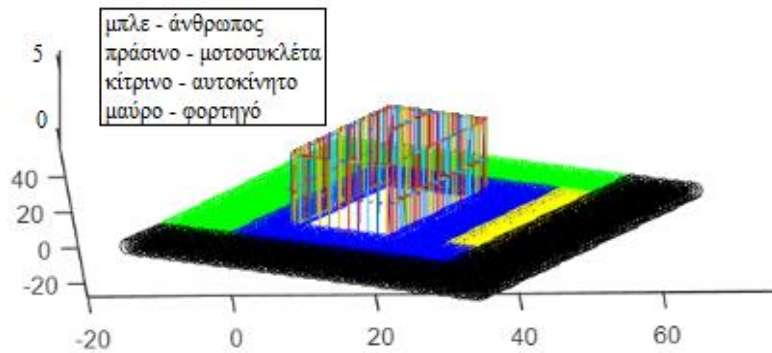
Με τη διεκπεραίωση της συγγραφής του κώδικα στην Python, αφού δηλαδή είχαν δημιουργηθεί οι απαραίτητες συναρτήσεις για τον υπολογισμό ωθήσεων και πιέσεων, καθώς και η μετατροπή των στοιχείων του φορέα σε ισοδύναμους μονοβάθμιους ταλαντωτές για την εκτέλεση χρονικών αναλύσεων σε πάνελα τοίχου και οροφής, καθώς και σε μηκίδες και τεγίδες, ήταν χρήσιμη η δημιουργία ενός αρχείου JSON-blast source, το οποίο αποτελούταν από πολλαπλά σημεία συντεταγμένων (grid points) τα οποία αποτελούν αντίστοιχα πολλαπλά σενάρια εκρήξεων για κάθε ζώνη. Πιο συγκεκριμένα, το αρχείο αυτό αποτελείται από 4 κατηγορίες/ζώνες, από τις οποίες ήταν δυνατή η πυροδότηση της έκρηξης:

- i) «άνθρωπος» – ‘human’ (ζώνη 1),
- ii) «μοτοσυκλέτα» – ‘motorcycle’ (ζώνη 2),
- iii) «αυτοκίνητο» – ‘car’ (ζώνη 3),
- iv) «φορτηγό» – ‘truck’ (ζώνη 4),

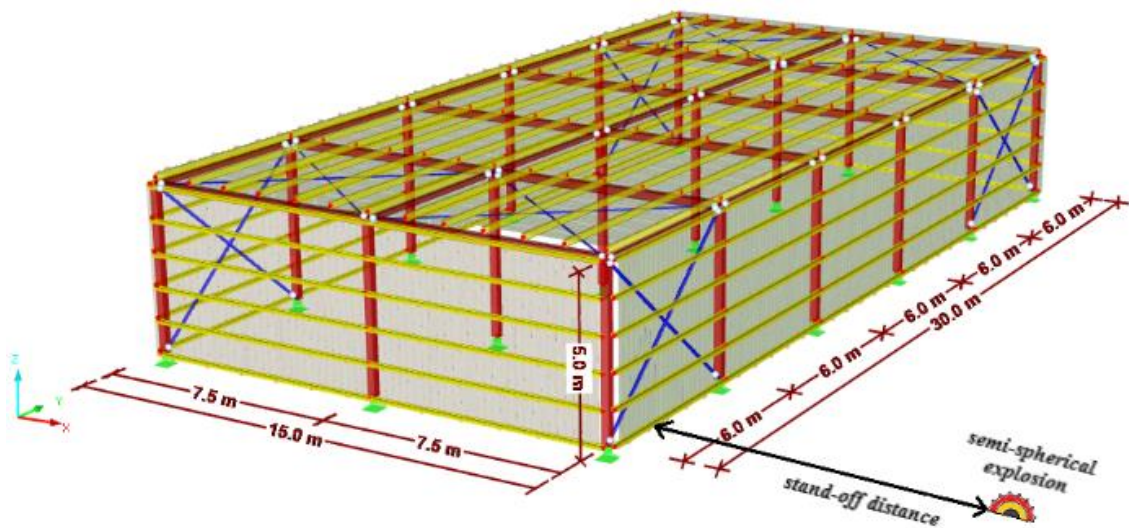
όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.1, στο οποίο είναι χωρισμένες χρωματικά οι δυνατές θέσεις ημισφαιρικής εκρήξεως (Σχήμα 6.3 και Σχήμα 6.4) για κάθε ζώνη και έχει γίνει και η αρίθμηση των πλευρών. Πιο συγκεκριμένα με μαύρο χρώμα είναι η ζώνη που αφορά έκρηξη με φορτηγό, με κίτρινο έκρηξη με αυτοκίνητο, με πράσινο έκρηξη με μοτοσυκλέτα και με μπλε έκρηξη με άνθρωπο. Επίσης αποτελείται από το μέγιστο δυνατό εκρηκτικό φορτίο (maxcutoff) κάθε κατηγορίας (άνθρωπος-10kg, μοτοσυκλέτα-50kg, αυτοκίνητο-200kg, φορτηγό-10000kg) καθώς και από 3200 διαφορετικά σενάρια σημείων πιθανής έκρηξης για κάθε ζώνη.



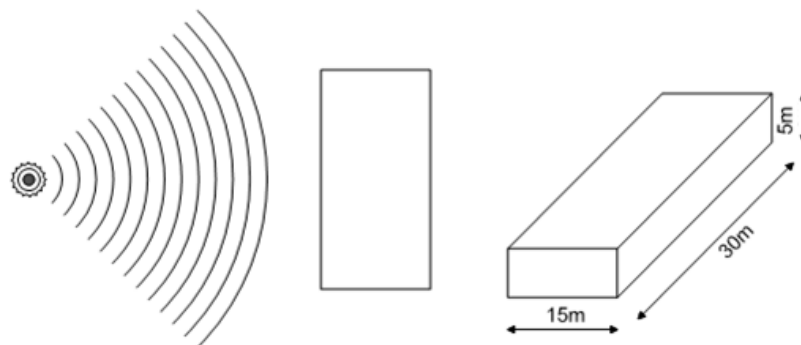
Σχήμα 6.1: Διαχωρισμός ζωνών εκρήξεως ανά κατηγορία και αρίθμηση πλευρών του κτιρίου (με χρήση AutoCAD και RFEM).



Σχήμα 6.2: Διαχωρισμός ζωνών εκρήξεως ανά κατηγορία (με χρήση MATLAB).



Σχήμα 6.3: Ημισφαιρικής μορφής έκρηξη στο υπό μελέτη κτίριο



Σχήμα 6.4: Κάτοψη ημισφαιρικής μορφής έκρηξης στο υπό μελέτη κτίριο.

Έγιναν υπολογισμοί για πολλαπλά σενάρια, για κάθε σημείο κάθε κατηγορίας, για ένα μόνο πανέλο, με βάρος εκρηκτικού 25%, 50%, 75%, και 100% του μέγιστου βάρους έκρηξης της κάθε κατηγορίας. Δηλαδή υπολογίστηκαν για ένα συγκεκριμένο πανέλο $3200 * 4 = 12800$ σενάρια τα οποία αποθηκεύονται αυτόματα σε txt αρχεία. Το χρονικό βήμα έπρεπε να είναι αρκετά μικρό, ώστε να μην επηρεάζει τα αριθμητικά αποτελέσματα. Επιλέχθηκε, χρονικό βήμα (dt) ίσο με το 1/10 της ιδιοπεριόδου δηλαδή περίπου 0.22ms. Για την κατανόηση της δομής των αρχείων αυτών, το σχήμα 6.5 δείχνει ένα τυχαίο αρχείο

που δίνει τα αποτελέσματα που προκύπτουν για ένα πάνελ τοίχου της πλευράς 1 (Side(i2)=1), για εκρηκτικό φορτίο (Explosive charge mass)=10kg, το οποίο πυροδοτείται από την κατηγορία (Category) = 'Human', που βρίσκεται εκτός του κτιρίου. Δείχνει επίσης στον χρήστη, τις συντεταγμένες του σημείου της έκρηξης, του κτιρίου καθώς και του πάνελου που μελετάται. Ανάμεσα από τις διακεκομμένες γραμμές, δίνονται τα αποτελέσματα που μας ενδιαφέρουν από τις τρεις βασικές συναρτήσεις του κώδικα.

Πιο συγκεκριμένα, στο πρώτο κομμάτι δίνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη συνάρτηση 'LOAD', όπως περιγράφεται στο υπό-κεφάλαιο 5.1. Εκεί φαίνεται πως η απόσταση της έκρηξης από το κέντρο βάρους του κτιρίου (stand-off distance) είναι ίση με 15.8m και πως το συνημίτονο γωνίας πρόσπτωσης (cosa) ισούται με 0.13 ($\alpha=83^\circ$), δηλαδή ο άνθρωπος είναι σχεδόν κάθετα με το πάνελο.

Στο δεύτερο κομμάτι δίνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη συνάρτηση 'BLAST PARAMETERS', όπως περιγράφεται στο υπό-κεφάλαιο 5.2. Εκεί φαίνεται πως ο χρόνος άφιξης του εκρηκτικού κύματος (Arrival time) ισούται με 31ms, η προσπίπτουσα ώθηση και πίεση ισούται με 0.09 MPa-ms και 0.023 MPa αντίστοιχα, ενώ η ανακλώμενη ώθηση και πίεση ισούται με 0.178 MPa-ms και 0.051 MPa αντίστοιχα.

Στο τρίτο κομμάτι δίνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη συνάρτηση 'SDOF', όπως περιγράφεται στα υπό-κεφάλαια 5.3 και 5.4. Συγκεκριμένα στην εικόνα φαίνεται η μέγιστη μετακίνηση του πάνελου από τις χρονικές αναλύσεις (Max displacement) η οποία ισούται με 4.86mm. Ο κώδικας εκτυπώνει επιπλέον και τις χρονοϊστορίες μετακίνησης, ταχύτητας, επιτάχυνσης, αντίστασης και πίεσης καθώς και τις δυναμικές αντιδράσεις.


```

*****
Explosive charge mass: 10.0 kg
Category: 'Human'
Point of explosion:
x0 = 7767.949192431123 mm, y0 = 11133.974596215561 mm, z0 = 12000 mm
(Point out of the building)
Building's coordinates (mm):
x1 = 10000                y1 = 11000                z1 = 12000
x2 = 28490.38105676658   y2 = 13026.279441628827   z2 = 12000
x3 = 43490.38105676658   y3 = 39007.04155516199    z3 = 12000
x4 = 33660.25403784438   y4 = 31980.76211353316    z4 = 12000
*****
WALLPANEL (Side(i2) = 1, i3 = 15, i4 = 3) with coordinates (mm):
x1 = 17000.0              y1 = 23124.355652982144   z1 = 14000.0
x2 = 17000.0              y2 = 23124.355652982144   z2 = 15000.0
x3 = 17500.0              y3 = 23990.38105676658    z3 = 15000.0
x4 = 17500.0              y4 = 23990.38105676658    z4 = 14000.0
*****
-----
LOAD results:
Stand-off distance:  distance = 15827.19 mm
Cosine of a:         cosa = 0.13
Panel's area:        Apanel = 1000000.0 mm2
-----
BLAST PARAMETERS results:
Arrival time:       Ta = 31.052 ms
Incident impulse:   IncI = 0.09 MPa-ms
Incident pressure:  IncP = 0.023 MPa
Reflected pressure: RefP = 0.051 MPa
Reflected impulse: RefI = 0.178 MPa-ms
-----
SDOF results:
Max displacement = 4.864382452 mm
*****|

```

Σχήμα 6.5: Ενδεικτικό παράδειγμα txt αρχείου, που αφορά την απόκριση ενός πανέλου για έκρηξη 50kg-TNT.

6.2 Οριακές καταστάσεις και στάθμες βλαβών

Για την εξαγωγή των συμπερασμάτων σχετικά με την τελική κατάσταση των πανέλων ως αποτέλεσμα κάθε έκρηξης, ήταν απαραίτητος ο προσδιορισμός οριακών καταστάσεων μετακίνησης. Για τον υπολογισμό των οριακών αυτών καταστάσεων (Limit States), χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω σχέση:

$$\Delta_{LSi} = \frac{pheight}{2} \times \tan \theta_i, \quad (6.1)$$

Ακόμη, σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση, υπολογίστηκαν οι στάθμες βλαβών (Damage States):

$$\Delta_{DSi} = \Delta_{LSi+1} - \Delta_{LSi}, \quad (6.2)$$

όπου $height$ είναι το ύψος του πανέλου και θ είναι η γωνία που θα επιφέρει στο πανέλο, την εκάστοτε οριακή κατάσταση i . Πιο συγκεκριμένα, στον πίνακα 6.1, δίνονται οι τιμές των οριακών καταστάσεων, βασισμένες από το σχήμα 6.6.

Πίνακας 6.1: Οριακές καταστάσεις και γωνίες αστοχίας που επιλέχθηκαν.

Limit States i	Angle θ , (°)	Δ_{LSi} , (mm)
Limit State 1	1	8.73 mm
Limit State 2	3	26.2 mm
Limit State 3	6	52.55 mm
Limit State 4	10	88.16 mm

Member		B1		B2		B3		B4	
		μ	θ	μ	θ	μ	θ	μ	θ
Girts & Purlins ²	No Tension Membrane Action	1	-	-	3°	-	10°	-	20°
	With Tension Membrane Action	1	-	-	4°	-	12°	-	20°
Metal Studs ^{2,3}	Top slip track studs walls ⁴	0.5	-	0.8	-	0.9	-	1	-
	Studs connected top & bottom ⁵	0.5	-	1	-	2	-	3	-
	Top and bottom of studs anchored to develop full tensile membrane capacity of the stud ⁶	0.5	-	1	0.5°	2	2°	5	5°
One-Way Corrugated Metal Deck	Full tensile membrane capacity ⁷	1	-	3	3°	6	6°	10	12°
	Some tensile membrane capacity ⁸	1	-	-	1°	-	4°	-	8°
	Limited tensile membrane capacity ⁹	1	-	1.8	1.3°	3	2°	6	4°
Standing Seam Metal Deck		1	-	1.8	1.3°	3	2°	6	4°

Σχήμα 6.6: Οριακές αποκρίσεις κάμψης για ψυχρής έλασης χάλυβα [Eurocode 3].

Κατ' αντιστοιχία με άλλες εργασίες, όπως των Basöz et al. (1999), όπου αναλυτικές καμπύλες διακινδύνευσης βαθμονομήθηκαν με αντίστοιχες εμπειρικές που προέκυψαν από την επεξεργασία πραγματικών στοιχείων σεισμικών βλαβών σε γέφυρες, προτείνεται η υιοθέτηση πέντε σταθμών βλάβης βασισμένες από το σχήμα 6.7:

- i) *επιφανειακές βλάβες* (Δ_{DS0}), για απόκριση μικρότερη του Δ_{LS1} ,
- ii) *ήπιες βλάβες* (Δ_{DS1}), για απόκριση μεταξύ του Δ_{LS1} και Δ_{LS2} ,
- iii) *έντονες βλάβες* (Δ_{DS2}), για απόκριση μεταξύ του Δ_{LS2} και Δ_{LS3} ,
- iv) *επικίνδυνες αστοχίες* (Δ_{DS3}), για απόκριση μεταξύ του Δ_{LS3} και Δ_{LS4} ,
- v) *διάτρηση πανέλου* (Δ_{DS4}), για απόκριση μεγαλύτερη του Δ_{LS4} .

Component Damage Level	Relationship to Response Limits
Blowout	Response greater than B4.
Hazardous Failure	Response between B3 and B4
Heavy Damage	Response between B2 and B3.
Moderate Damage	Response between B1 and B2.
Superficial Damage	Response is less than B1.

Σχήμα 6.7: Στάθμες βλαβών ανάλογα με τις οριακές καταστάσεις [Eurocode 3].

Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα στο σχήμα 6.8, αναγράφονται όλα τα πιθανά επίπεδα προστασίας του κτιρίου, ανάλογα της απόκρισης του στοιχείου. Η περίπτωση μας, αφορά πάνελα, δηλαδή μη δομικά στοιχεία (Non-structural elements).

Building Level of Protection	Descriptions of Potential Overall Structural Damage	Component Damage (Response Limits)		
		Primary Components ³	Secondary Components ⁴	Non-Structural Components ⁵
Below AT Standards ²	Severe Damage - Progressive collapse likely. Space in and around damaged area is unusable.	Hazardous ⁶ (B3 – B4)	Blowout ⁷ (> B4)	Blowout ⁷ (> B4)
Very Low	Heavy Damage - Onset of structural collapse. Progressive collapse is unlikely. Space in and around damaged area is unusable.	Heavy ⁸ (B2 – B3)	Hazardous ⁶ (B3 – B4)	Hazardous ⁶ (B3 – B4)
Low	Unrepairable Damage - Progressive collapse will not occur. Space in and around damaged area is unusable.	Moderate ⁹ (B1 – B2)	Heavy ⁸ (B2 – B3)	Heavy ⁸ (B2 – B3)
Medium	Repairable Damage - Space in and around damaged area can be used and is fully functional after cleanup and repairs.	Superficial ¹⁰ (< B1)	Moderate ⁹ (B1 – B2)	Moderate ⁹ (B1 – B2)
High	Superficial Damage - No permanent deformations. The facility is immediately operable.	Superficial ¹⁰ (< B1)	Superficial ¹⁰ (< B1)	Superficial ¹⁰ (< B1)

Σχήμα 6.8: Σχέση επιπέδου προστασίας του κτιρίου – απόκρισης του στοιχείου.

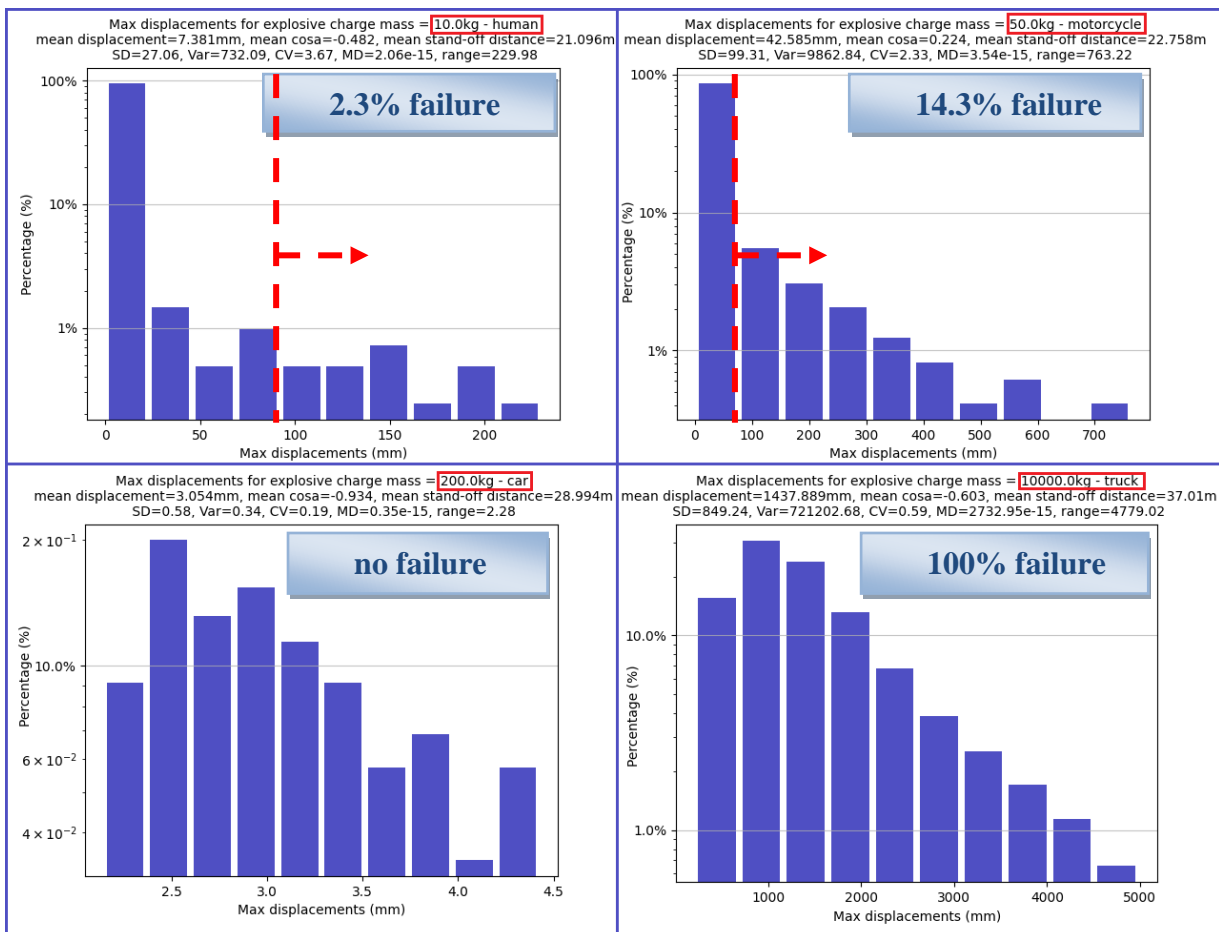
6.3 Μέγιστες μετακινήσεις

Με τη χρήση των αρχείων που προκύπτουν, ακολουθεί η δημιουργία ιστογραμμάτων που αφορούν τις μέγιστες μετακινήσεις των πινέλων για κάποιο συγκεκριμένο βάρος φορτίου για την εκάστοτε ζώνη. Στο σχήμα 6.9 απεικονίζονται τα τέσσερα ιστογράμματα μέγιστων μετακινήσεων του πινέλου που βρίσκεται στην πλευρά 1, για 12800 διαφορετικά σενάρια αποστάσεων και γωνιών προσπτώσεως, για τα μέγιστα εκρηκτικά φορτία κάθε ζώνης. Με διακεκομμένες, υποδηλώνεται η οριακή κατάσταση αστοχίας 4 σε κάθε περίπτωση, ίση με 88.16mm σύμφωνα με τον πίνακα 6.1. Πάνω δεξιά στο σχήμα, δίνεται το ποσοστό των πινέλων που αστόχησαν σε κάθε περίπτωση. Στον τίτλο κάθε ιστογράμματος, εμφανίζονται η μέση τιμή των μέγιστων μετακινήσεων, των γωνιών προσπτώσεως, και της απόστασης του πινέλου από την έκρηξη, καθώς και περαιτέρω

στατιστικά στοιχεία για τις μέγιστες μετακινήσεις (SD-τυπική απόκλιση, Var-διακύμανση, CV-συντελεστής μεταβλητότητας, MD-μέση απόκλιση, range-εύρος). Συγκρίνοντας τα ιστογράμματα του σχήματος 6.9, παρατηρούμε πως η μέγιστη μετακίνηση και κατ'επέκταση, η μετακίνηση των πανέλων, εξαρτάται από:

- i) το εκρηκτικό φορτίο (μεγαλύτερο βάρος → μεγαλύτερες μετακινήσεις),
- ii) την απόσταση του πανέλου από το σημείο της έκρηξης (μεγαλύτερη απόσταση → μικρότερες μετακινήσεις)
- iii) τη γωνία πρόσπτωσης α (για $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ και $270^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$ ($\cos \alpha \geq 0$) → μεγαλύτερες μετακινήσεις ενώ για $90^\circ < \alpha < 270^\circ$ ($\cos \alpha < 0$) → μικρότερες μετακινήσεις.

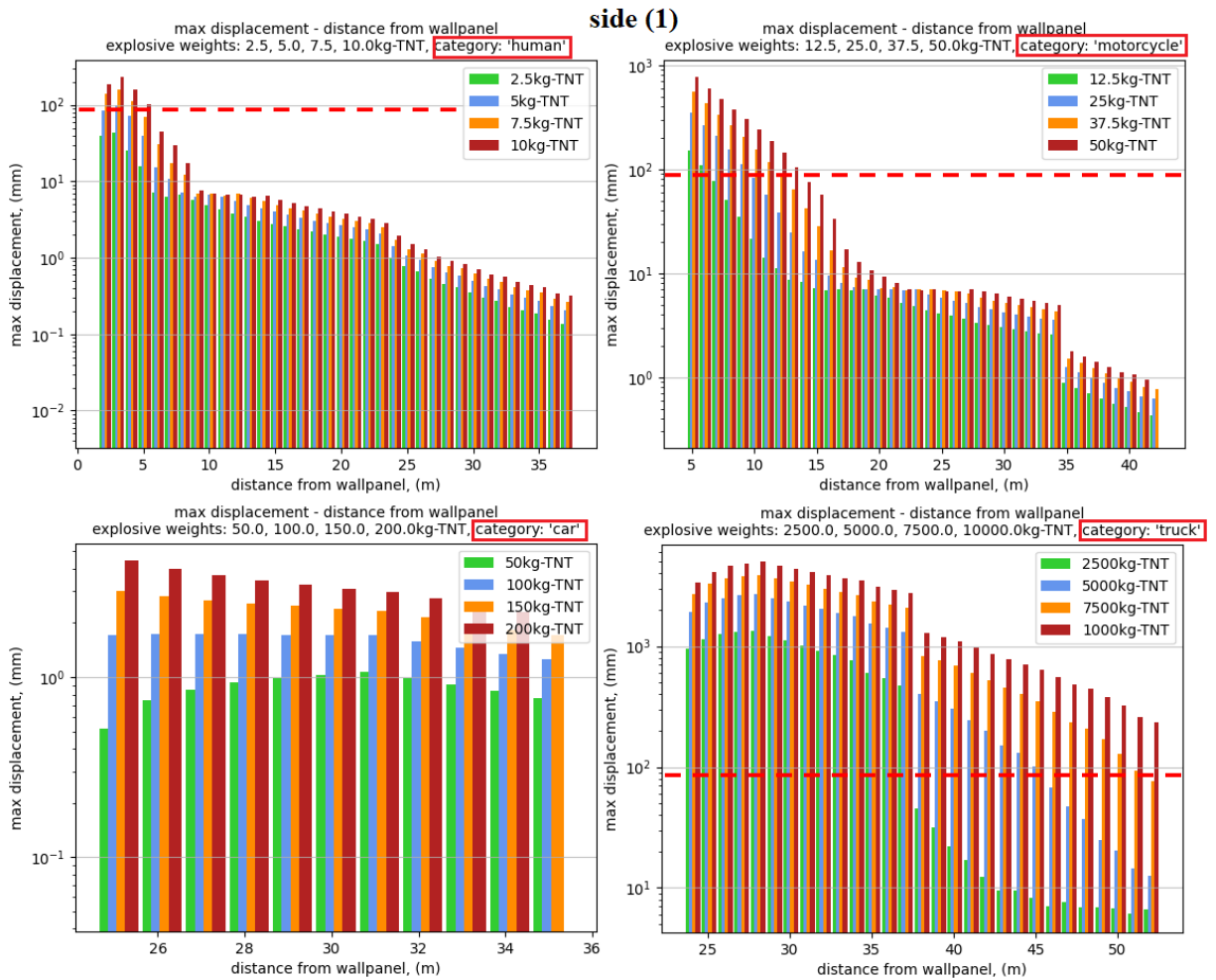
Ενδιαφέρον παρουσιάζει η κατηγορία «Αυτοκίνητο», η οποία παρόλο που αφορά μεγάλα εκρηκτικά φορτία (200kg-TNT), προκαλεί μικρές μετακινήσεις στο πανέλο με μέγιστη μετακίνηση 4.7mm \ll 88.16mm = λ_{Lsi} . Αυτό συμβαίνει κυρίως, διότι όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.1, το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης μεταξύ πανέλου στην πλευρά 1 και ζώνης «αυτοκίνητο» είναι αρνητική.



Σχήμα 6.9: Τέσσερα ιστογράμματα μέγιστων μετακινήσεων του πανέλου, για 12800 διαφορετικά σενάρια αποστάσεων και γωνιών προσπτώσεως, για τα μέγιστα εκρηκτικά φορτία κάθε ζώνης (πάνω: αριστερά – άνθρωπος & δεξιά – μοτοσυκλέτα, κάτω: αριστερά – αυτοκίνητο & δεξιά – φορτηγό).

Με σκοπό να γίνει σύγκριση των μέγιστων μετακινήσεων, για τις 4 διαφορετικές τιμές εκρηκτικού φορτίου κάθε ζώνης, αλλά και η σύγκριση των μέγιστων μετακινήσεων ανά ζώνη, συναρτήσε της απόστασης του πανέλου από την έκρηξη, φτιάχτηκε το σχήμα 6.10.

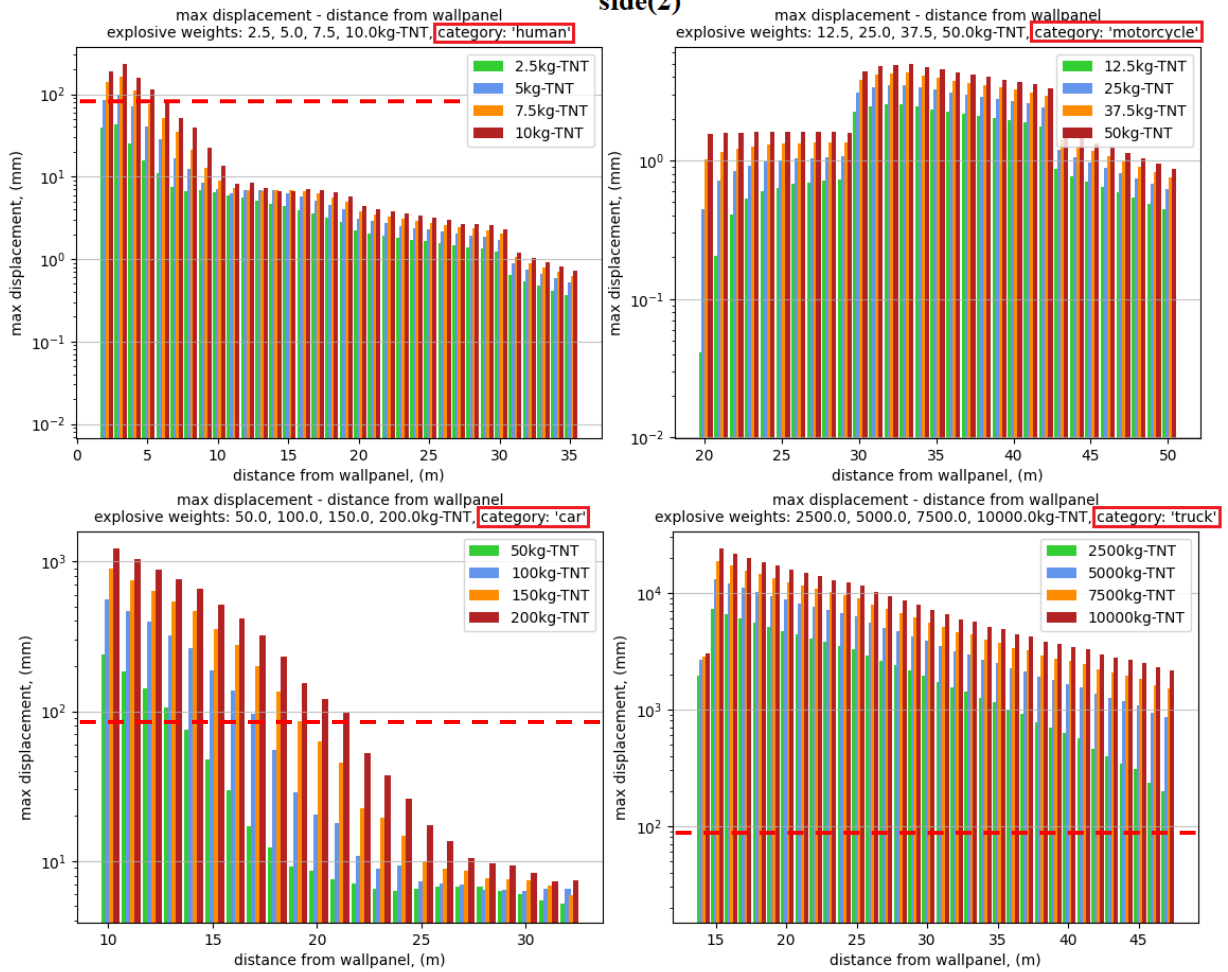
Οι διακεκομμένες κόκκινες γραμμές, αντιστοιχούν στην οριακή κατάσταση 4. Από το σχήμα αυτό, επιβεβαιώνονται τα παραπάνω.



Σχήμα 6.10: Ιστογράμματα μέγιστων μετακινήσεων του πανέλου – απόστασης έκρηξης από το πανέλο στην πλευρά 1, για 12800 διαφορετικά σενάρια αποστάσεων και γωνιών προσπτώσεως, για τα τέσσερα εκρηκτικά φορτία κάθε ζώνης (πάνω: αριστερά – άνθρωπος & δεξιά – μοτοσυκλέτα, κάτω: αριστερά – αυτοκίνητο & δεξιά – φορτηγό).

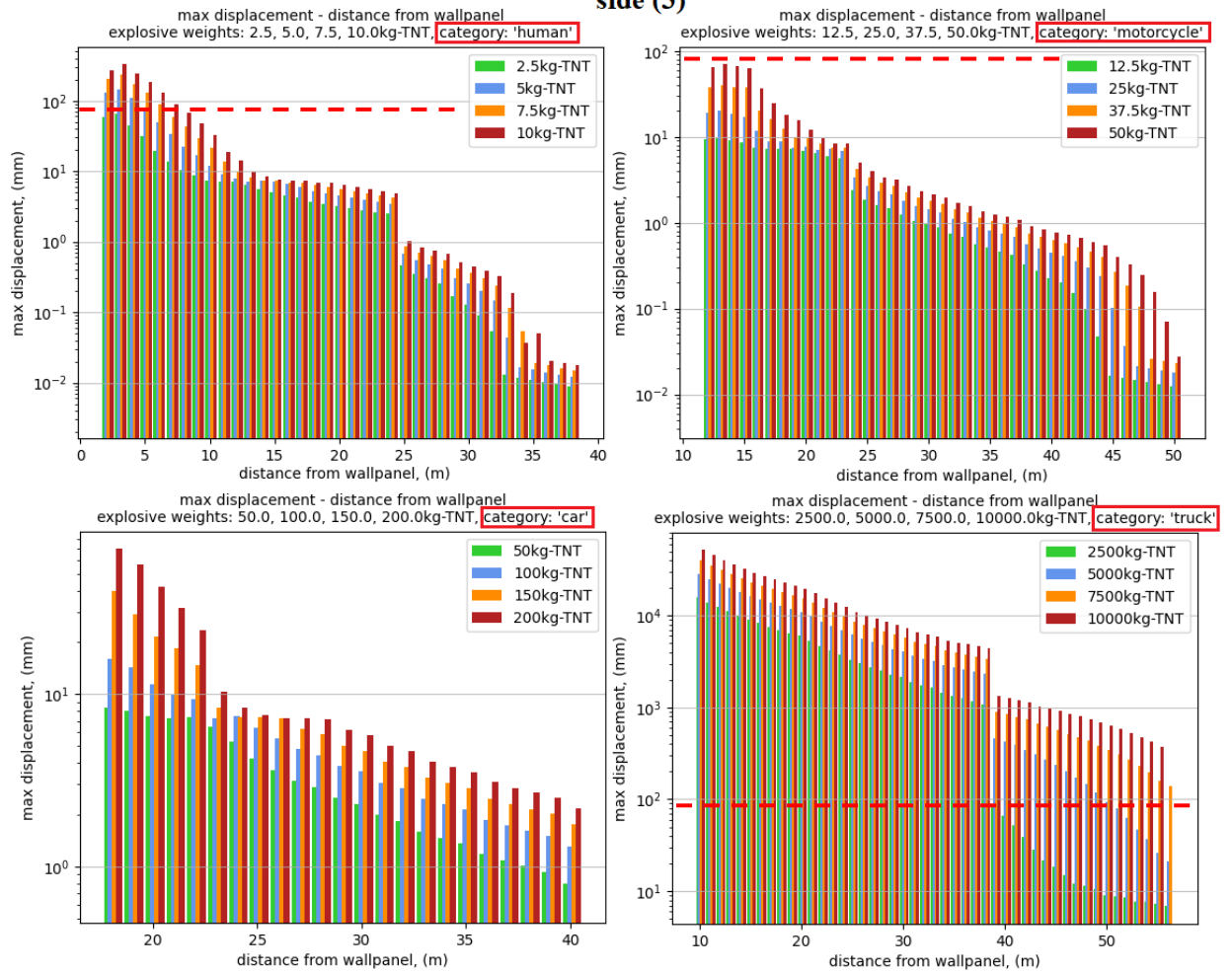
Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για κάθε πλευρά. Τα αποτελέσματα δίνονται στα σχήματα 6.11-6.13.

side(2)

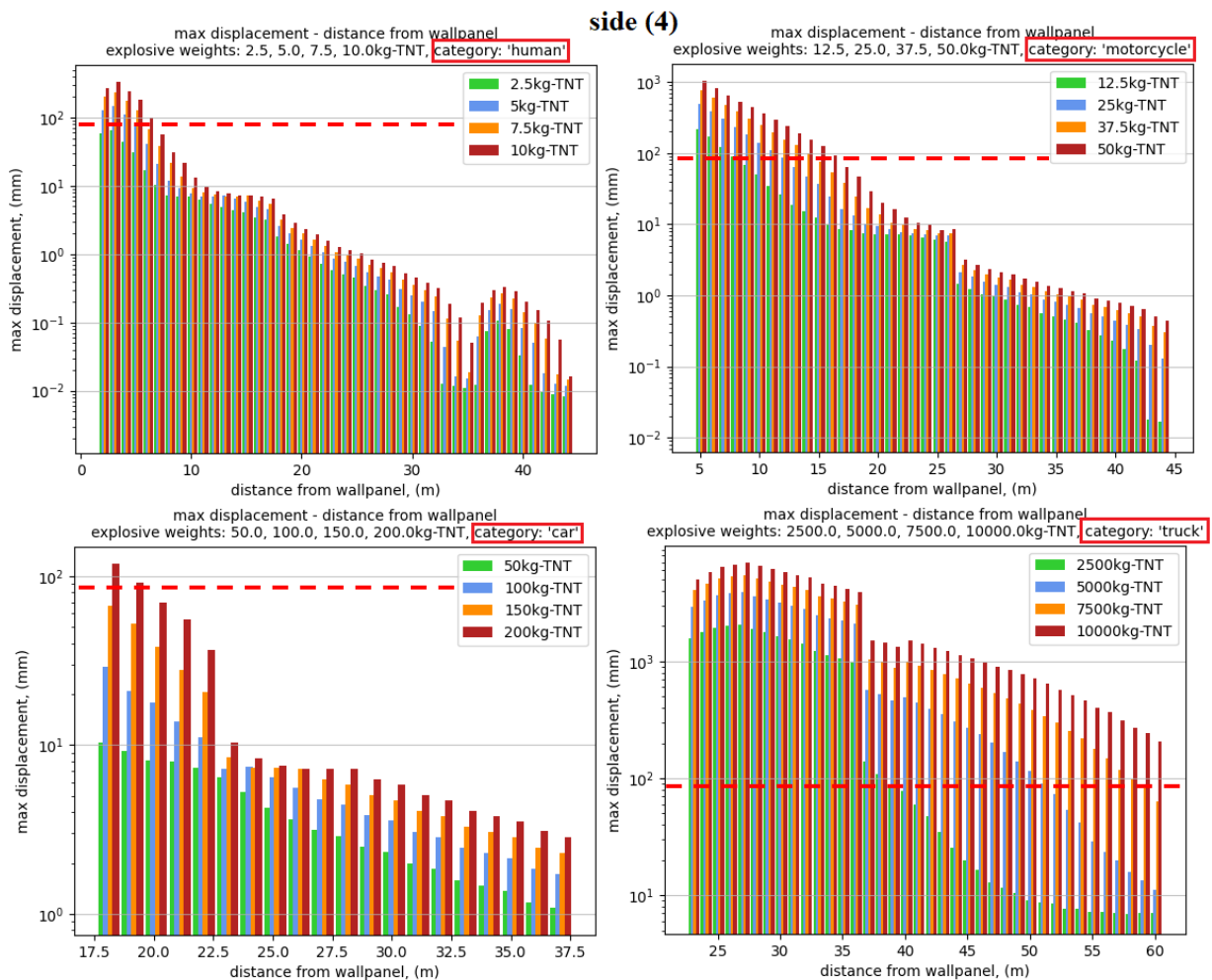


Σχήμα 6.11: Ιστογράμματα μέγιστων μετακινήσεων του πανέλου – απόστασης έκρηξης από το πανέλο στην πλευρά 2, για 12800 διαφορετικά σενάρια αποστάσεων και γωνιών προσπτώσεως, για τα τέσσερα εκρηκτικά φορτία κάθε ζώνης (πάνω: αριστερά – άνθρωπος & δεξιά – μοτοσυκλέτα, κάτω: αριστερά – αυτοκίνητο & δεξιά – φορτηγό).

side (3)



Σχήμα 6.12: Ιστογράμματα μέγιστων μετακινήσεων του πανέλου – απόστασης έκρηξης από το πανέλο στην πλευρά 3, για 12800 διαφορετικά σενάρια αποστάσεων και γωνιών προσπτώσεως, για τα τέσσερα εκρηκτικά φορτία κάθε ζώνης (πάνω: αριστερά – άνθρωπος & δεξιά – μοτοσυκλέτα, κάτω: αριστερά – αυτοκίνητο & δεξιά – φορτηγό).



Σχήμα 6.13: Ιστογράμματα μέγιστων μετακινήσεων του πανέλου – απόστασης έκρηξης από το πανέλο στην πλευρά 4, για 12800 διαφορετικά σενάρια αποστάσεων και γωνιών προσπίπτωσης, για τα τέσσερα εκρηκτικά φορτία κάθε ζώνης (πάνω: αριστερά – άνθρωπος & δεξιά – μοτοσυκλέτα, κάτω: αριστερά – αυτοκίνητο & δεξιά – φορτηγό).

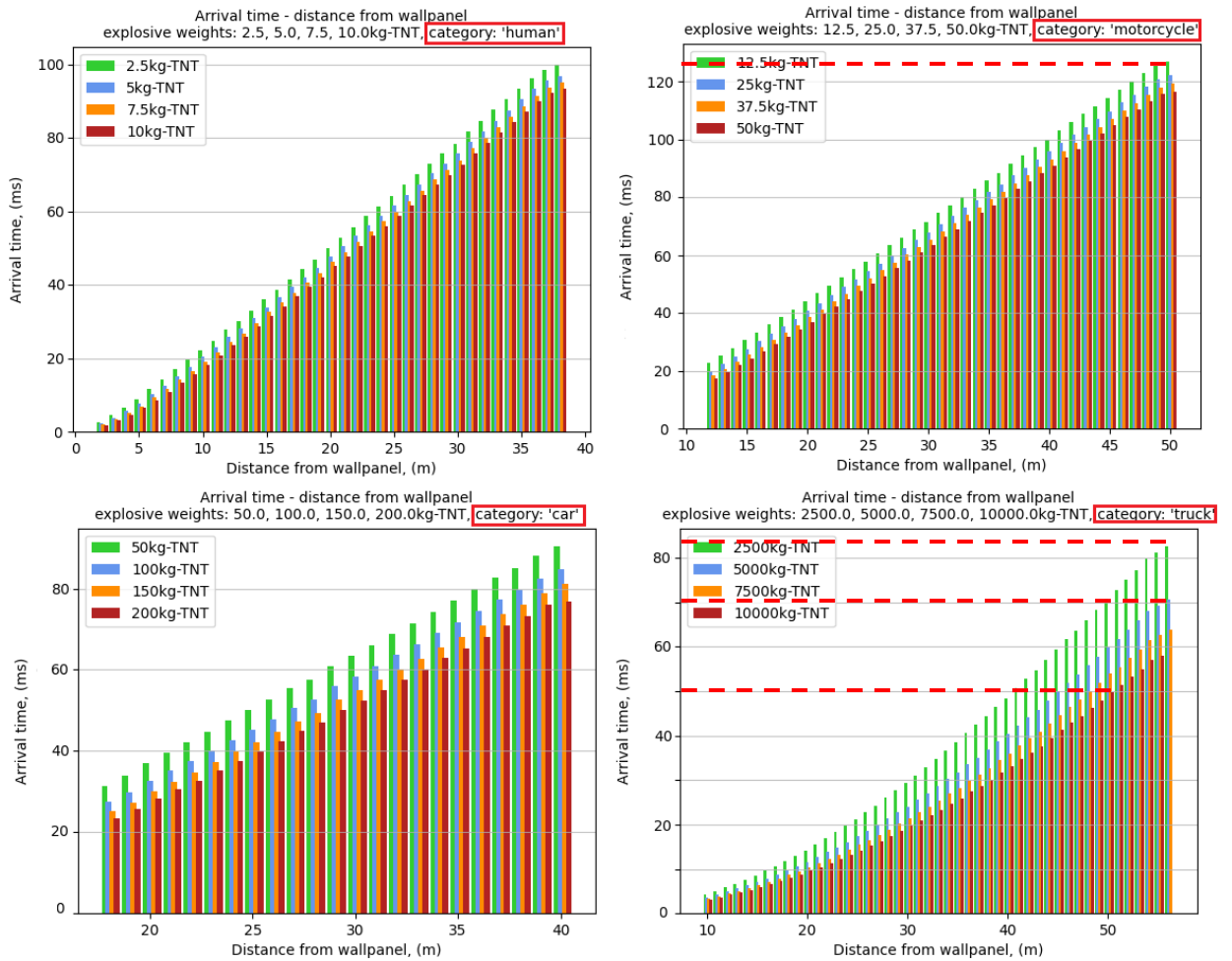
6.4 Χρόνος άφιξης

Όπως είχε αναφερθεί και στο κεφάλαιο 3, σημαντικό ρόλο παίζει, η απόσταση από τον στόχο (Stand-off distance) η οποία καθορίζει σημαντικά το φορτίο που δέχεται η υπόψιν κατασκευή. Στο Σχήμα 3.3, είχε φανεί πως όσο μεγαλώνει η απόσταση από τον στόχο, μεγαλώνει ο χρόνος άφιξης του εκρηκτικού κύματος.

Το παραπάνω συμπέρασμα, επιβεβαιώνεται με τη βοήθεια του σχήματος 6.14, όπου μελετάται ο χρόνος άφιξης του εκρηκτικού κύματος στο πανέλο στην πλευρά 3. Πιο συγκεκριμένα μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Αύξηση της απόστασης της έκρηξης από το πανέλο, οδηγεί σε αύξηση του χρόνου άφιξης του εκρηκτικού κύματος.
- Για μία έκρηξη από ένα συγκεκριμένο σημείο, η αύξηση του εκρηκτικού βάρους, προκαλεί μείωση του χρόνου άφιξης του εκρηκτικού κύματος. Αυτό γίνεται ιδιαίτερα εμφανές στο τελευταίο διάγραμμα, στην κατηγορία «φορτηγό», όπου για απόσταση 60m και εκρηκτικό φορτίο 2500kg-TNT, ο χρόνος άφιξης του εκρηκτικού κύματος ισούται με 83 ms. Ωστόσο, για την ίδια απόσταση και κατηγορία, 25% αύξηση του εκρηκτικού φορτίου, δηλαδή για 5000kg-TNT,

προκαλεί περίπου 15% μείωση του χρόνου άφιξης, ο οποίος ισούται με 70 ms. Αυτή η μείωση γίνεται ακόμα πιο έντονη συγκρίνοντας μεγαλύτερες διαφορές εκρηκτικού φορτίου. Είναι βάσιμη η σύγκριση στα 50m για τις κατηγορίες «μοτοσυκλέτα» και «φορτηγό» αφού όπως φαίνεται στο σχήμα 6.1, σε αυτή την απόσταση έχουν περίπου ίδια γωνία πρόσπτωσης. Επομένως συγκρίνοντας τα διαγράμματα αυτά του σχήματος 6.14, παρατηρούμε πως για 12.5kg-TNT, ο χρόνος άφιξης του εκρηκτικού κύματος ισούται με 125ms, ενώ για 10000kg-TNT, ισούται με 50ms, δηλαδή προκλήθηκε 60% μείωση του χρόνου άφιξης του εκρηκτικού!



Σχήμα 6.14: Ιστογράμματα χρόνου άφιξης του εκρηκτικού κύματος – απόστασης έκρηξης από το πανέλο στην πλευρά 3, για 12800 διαφορετικά σενάρια αποστάσεων και γωνιών πρόσπτωσης, για τα τέσσερα εκρηκτικά φορτία κάθε ζώνης (πάνω: αριστερά – άνθρωπος & δεξιά – μοτοσυκλέτα, κάτω: αριστερά – αυτοκίνητο & δεξιά – φορτηγό).

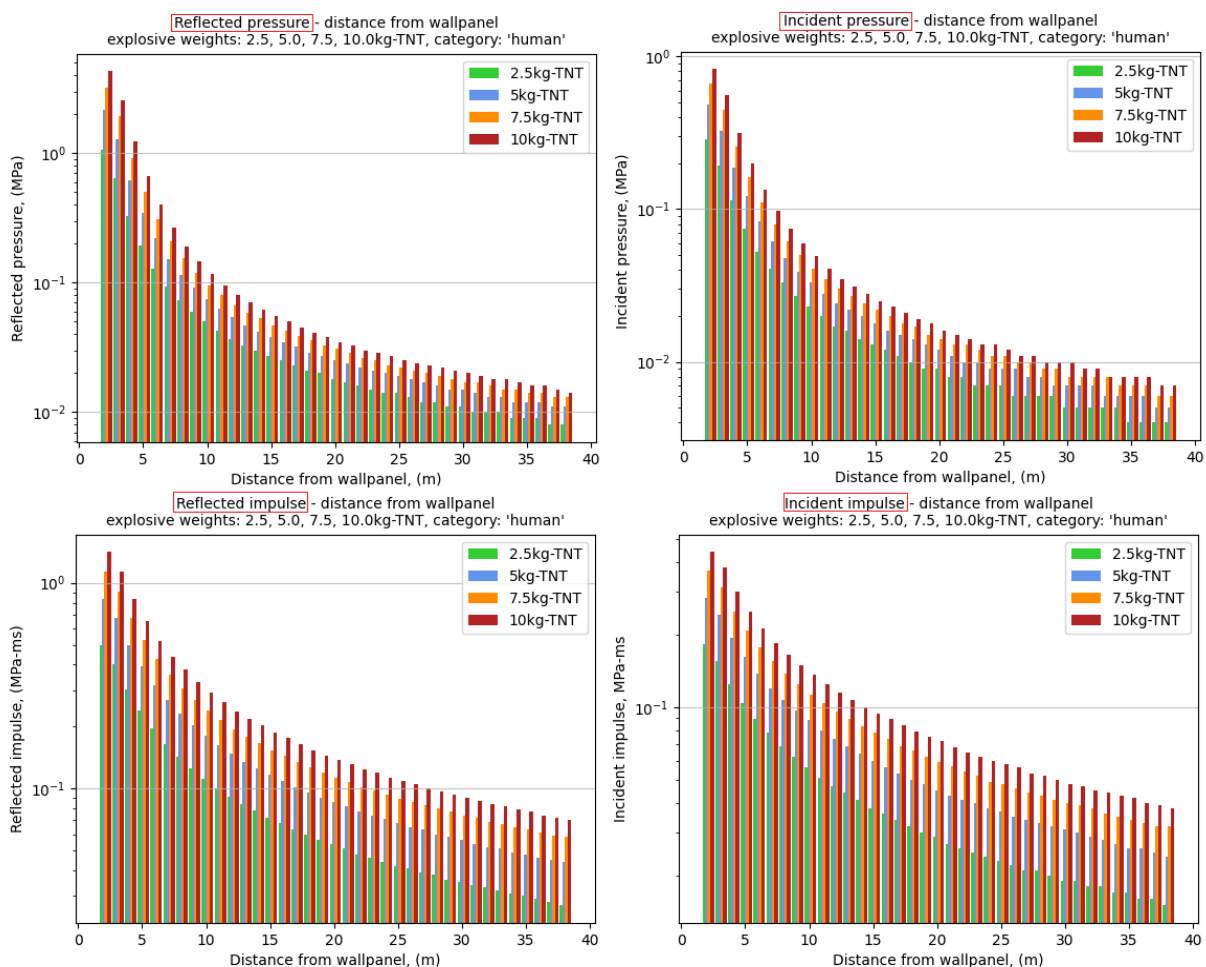
6.5 Πιέσεις και ωθήσεις

Γενικότερα, η ανακλώμενη υπερπίεση, σύμφωνα με Chipley, M. (2003), είναι πάντα μεγαλύτερη από την προσπίπτουσα υπερπίεση, για την ίδια απόσταση από την έκρηξη. Η ανακλώμενη υπερπίεση διαφέρει με τη γωνία πρόσπτωσης του εκρηκτικού κύματος. Όταν το εκρηκτικό κύμα προσκρούει σε μία επιφάνεια που βρίσκεται κάθετα στη διεύθυνσή της, τότε εκεί θα δημιουργηθεί η μέγιστη ανακλώμενη υπερπίεση. Πέρα από τη γωνία

πρόσπτωσης, το μέγεθος της μέγιστης ανακλώμενης υπερπίεσης, εξαρτάται από τη μέγιστη προσπίπτουσα υπερπίεση, η οποία είναι συνάρτηση του καθαρού εκρηκτικού βάρους και της απόστασης από την έκρηξη.

Για τη μελέτη της μεταβολής της πίεσης με την αύξηση της απόστασης από τον στόχο, σχεδιάστηκε το σχήμα 6.15 για τα τέσσερα εκρηκτικά φορτία της ζώνης «άνθρωπος». Συγκεκριμένα, πάνω αριστερά φαίνεται η ανακλώμενη πίεση και δεξιά η προσπίπτουσα πίεση, ενώ κάτω αριστερά η ανακλώμενη ώθηση και δεξιά η προσπίπτουσα ώθηση. Από το σχήμα αυτό προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

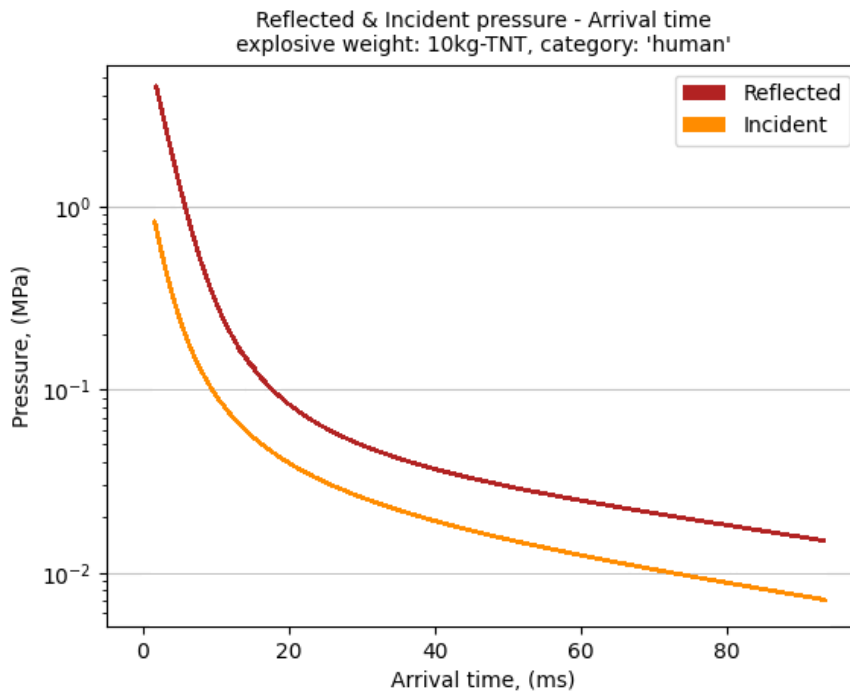
- Οι ανακλώμενες πιέσεις/ωθήσεις είναι μεγαλύτερες από τις προσπίπτουσες πιέσεις/ωθήσεις αντίστοιχα για κάθε απόσταση.
- Όσο μεγαλώνει η απόσταση από τον στόχο, οι μέγιστες πιέσεις μειώνονται δραματικά, όπως είχε αναφερθεί και στο κεφάλαιο 3 (Σχήμα 3.4).



Σχήμα 6.15: Ιστογράμματα πιέσεων – απόστασης έκρηξης από το πάνελ στην πλευρά 3, για τα τέσσερα εκρηκτικά φορτία της ζώνης «άνθρωπος» (πάνω: αριστερά – ανακλώμενη πίεση & δεξιά – προσπίπτουσα πίεση, κάτω: αριστερά – ανακλώμενη ώθηση & δεξιά – προσπίπτουσα ώθηση).

Ακόμη, στο σχήμα 6.16, φαίνονται οι καμπύλες ανακλώμενης και προσπίπτουσας υπερπίεσης συναρτήσεως του χρόνου άφιξης του εκρηκτικού κύματος στο πάνελ της πλευράς 3, για εκρηκτικό φορτίο 10kg-TNT της κατηγορίας «άνθρωπος». Είναι εμφανές πως η ανακλώμενη είναι μεγαλύτερη από την προσπίπτουσα πίεση για κάθε πιθανό χρόνο

άφιξης. Συγκεκριμένα, η μέγιστη ανακλώμενη πίεση σε αυτή την περίπτωση, είναι $5/0.77 = 6.5$ φορές μεγαλύτερη από την μέγιστη προσπίπτουσα πίεση. Επίσης φαίνεται πως, και οι δύο πιέσεις μειώνονται δραματικά με την αύξηση του χρόνου άφιξης.



Σχήμα 6.16: Καμπύλες ανακλώμενης και προσπίπτουσας πίεσης, συναρτήσει του χρόνου άφιξης του εκρηκτικού κύματος στο πανέλο της πλευράς 3, για εκρηκτικό φορτίο 10kg-TNT της ζώνης «άνθρωπος»

6.6 Πιθανοτική ανάλυση επικινδυνότητας εκρήξεων (PBHA)

Στο υποκεφάλαιο αυτό, παρατίθενται τα αποτελέσματα και αναλύονται οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για τον υπολογισμό των συχνοτήτων εμφάνισης των σεναρίων:

- αποστάσεων (σημείου έκρηξης-κέντρου βάρους κτιρίου) και
- εκρηκτικού φορτίου

6.6.1 Καμπύλη επικινδυνότητας και ρυθμός γεγονότων

Η τροποποιημένη καμπύλη επικινδυνότητας του κτιρίου $\nu(m)$ (ο αριθμός των συμβάντων ανά χρόνο), σύμφωνα με τους Nagata et al. (2017), δίνεται από τη σχέση 6.3:

$$\nu(m > x) = 0.257 \times m^{-b}, \quad (6.3)$$

όπου m εκφράζει το εκρηκτικό φορτίο σε kg-TNT με $m_{\max} < m < m_{\min}$.

Αρχικά, ήταν απαραίτητος ο προσδιορισμός ενός καθολικού, μηχανικής σημασίας, ρυθμού γεγονότων ν_{\min} (Global Event Rate). Σύμφωνα με τη σχέση 6.3, αυτός ο ρυθμός γεγονότων, είναι ίδιος για κάθε ζώνη και δίνεται από την σχέση 6.4:

$$\nu_{\min} = \nu(m > m_{\min}) = 0.257 \times m_{\min}^{-b}, \quad (6.4)$$

όπου m_{\min} είναι το ελάχιστο δυνατό εκρηκτικό φορτίο, το οποίο είναι ικανό να προκαλέσει βλάβες στο κτίριο που μελετάται, δηλαδή αποτελεί το ελάχιστο όριο βάρους εκρήξεως πρακτικού ενδιαφέροντος, και ορίστηκε ίσο με 1kg, ενώ b είναι μια σταθερά ίση με -1.41. Επομένως, αντικαθιστώντας στη σχέση 6.4, ο ρυθμός γεγονότων ισούται με:

$$v_1 = v(m > 1kg) = 0.257 \times 1^{-1.41} = 0.257, \quad (6.5)$$

6.6.2 Συχνότητα εκρηκτικού φορτίου

Σύμφωνα με τους Gutenberg & Richter (1944) οι οποίοι πρώτοι μελέτησαν τα μεγέθη του σεισμού, παρατηρείται πως ο αριθμός των σεισμών σε μια περιοχή μεγαλύτερος από ένα συγκεκριμένο μέγεθος, γενικά ακολουθεί μια ιδιαίτερη κατανομή όπως φαίνεται στη σχέση 6.6:

$$\log \lambda_m = a - bm, \quad (6.6)$$

όπου λ_m είναι ο ρυθμός των σεισμών με μεγέθη μεγαλύτερα από m , και a και b είναι σταθερές. Αντιστοίχως, λειτουργεί η σχέση 6.6 και στις εκρήξεις.

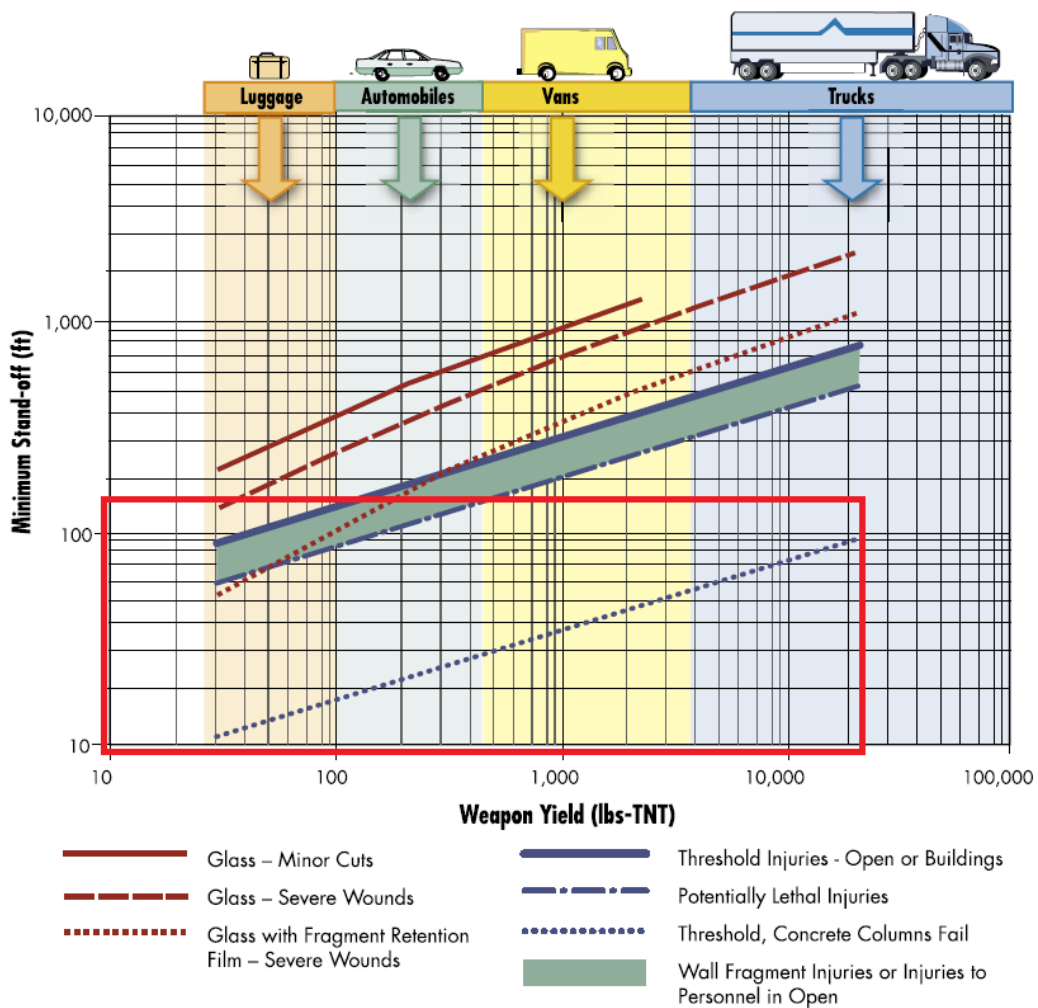
Η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής για το μέγεθος του σεισμού δίνεται σύμφωνα με τη σχέση 6.7:

$$\begin{aligned} F_M(m) &= P(M \leq m | M > m_{\min}) \\ &= \frac{\text{Rate of explosions with } m_{\min} < M < m}{\text{Rate of explosions with } m_{\min} < M} \\ &= \frac{\lambda_{m_{\min}} - \lambda_m}{\lambda_{m_{\min}}}, \quad (6.7) \\ &= \frac{10^{a-bm_{\min}} - 10^{a-bm}}{10^{a-bm_{\min}}} \\ &= 1 - 10^{a-b(m-m_{\min})}, \quad m > m_{\min} \end{aligned}$$

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, αντιστοιχίζοντας τις παραμέτρους του σεισμού με αυτές των εκρήξεων, αν είναι γνωστό και το μέγιστο βάρος (m_{\max}), για $b = 1.41$ και λογαριθμίζοντας την, η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής για το μέγεθος του εκρηκτικού φορτίου m δίνεται σύμφωνα με τη σχέση 6.8:

$$F_M(m) = \frac{1 - 10^{-1.41(\log(m) - \log(m_{\min}))}}{1 - 10^{-1.41(\log(m_{\max}) - \log(m_{\min}))}}, \quad (6.8)$$

όπου m είναι το βάρος της έκρηξης, με $m_{\min} < m < m_{\max}$. Για την κατηγορία «άνθρωπος», $m_{\min} = 1\text{kg}$, ενώ τα υπόλοιπα ελάχιστα βάρη είναι ίσα με το 70% των μέγιστων βαρών της προηγούμενης κατηγορίας. Στον πίνακα 6.2, δίνονται όλες οι ακραίες τιμές εκρηκτικών φορτίων εκφρασμένες σε ισοδύναμα κιλά TNT για κάθε κατηγορία. Οι τιμές αυτές βασίστηκαν στο σχήμα 6.17 και συγκεκριμένα στις οριακές τιμές - αστοχία υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος (threshold, concrete columns fail) έως τις μέγιστες τιμές που συναντήθηκαν στο παράδειγμα του κτιρίου, δηλαδή απόσταση 165ft (=50m) και βάρος εκρηκτικού φορτίου 22050 lbs-TNT (=10000kg-TNT)



Σχήμα 6.17: Εκρηκτικά φορτία (lbs-TNT) ανά κατηγορία – επίδραση του εύρους εκρήξεως (ft) [Chipley, M. (2003)].

Πίνακας 6.2: Μέγιστα (m_{max}) και ελάχιστα (m_{min}) φορτία εκρήξεως για κάθε κατηγορία.

	<i>Ζώνη, i</i>	$m_{min(i)}$ (kg-TNT)	$m_{max(i)}$ (kg-TNT)
<i>Άνθρωπος</i>	1	1	10
<i>Μοτοσικλέτα</i>	2	7	50
<i>Αυτοκίνητο</i>	3	35	200
<i>Φορτηγό</i>	4	140	10000

Θεωρώντας πως είναι οι μόνες δυνατές, οι συχνότητες εμφάνισης των εκρηκτικών φορτίων για τις ζώνες 1, 2 και 3 υπολογίζονται σύμφωνα με τη σχέση 6.9, ενώ για τη ζώνη 4, υπολογίζονται σύμφωνα με τη σχέση 6.10:

$$\Delta\lambda(m \text{ being in } [m_F, m_L]) = \sum_{j=m_F}^{m_L} (F_M(m_{j+1}) - F_M(m_j)) \times v(m_{\max(i)} > m > m_{\min(i)}), \quad (6.9)$$

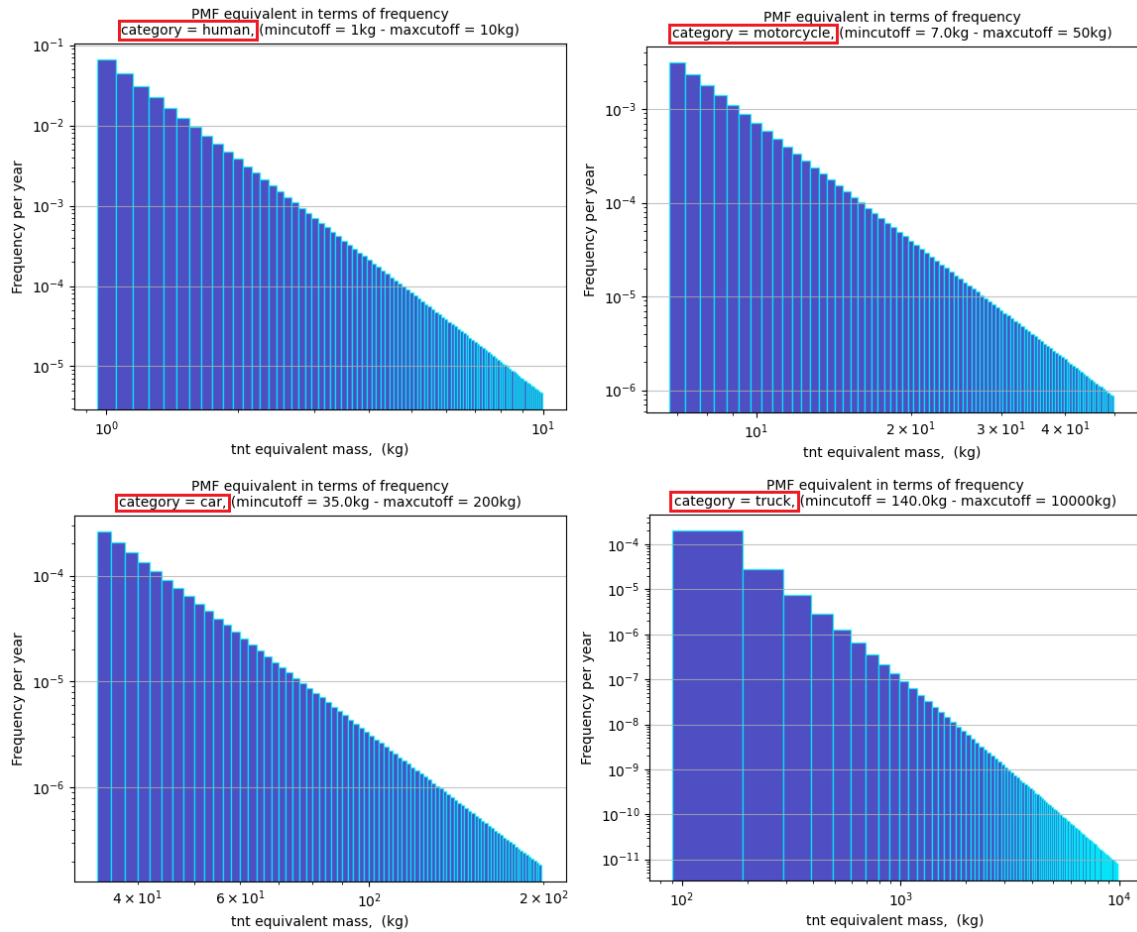
$$\Delta\lambda(m \text{ being in } [m_F, m_L]) = \sum_{j=m_F}^{m_L} (F_M(m_{j+1}) - F_M(m_j)) \times v(m > m_{\min(i)}), \quad (6.10)$$

όπου $m_F < m_L$ και αφορούν την πρώτη (First) και τελευταία (Last) τιμή της κλάσης $[m_F, m_L]$ και οι $m_{\max(i)}$, $m_{\min(i)}$ αφορούν τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή εκρηκτικού φορτίου για κάθε ζώνη (i). Ο προσδιορισμός των κλάσεων για τα υπό μελέτη εκρηκτικά φορτία, δίνεται στον πίνακα 6.3. Ορίστηκε διαφορετικός ρυθμός γεγονότων ν για κάθε ζώνη, διότι δεν είναι ισοπίθανα τα σενάρια εκρήξεως των τεσσάρων κατηγοριών. Έπρεπε να δοθεί μεγαλύτερη πιθανότητα στις πρώτες ζώνες, και κυρίως στην κατηγορία «άνθρωπος» αφού αυτή είναι η πιο πιθανή και παράλληλα η πιο «ευάλωτη» να συμβεί έκρηξη. Αντίστοιχη κατανομή των πιθανοτήτων δίνεται στο σχήμα 6.23 το οποίο περιγράφει την παραδοχή μιας συγκεκριμένης ακτινικής κατανομής πιθανοτήτων των αποστάσεων των εκρήξεων, με κέντρο το κέντρο βάρους του κτιρίου και θα περιγραφεί καλύτερα παρακάτω.

Πίνακας 6.3: Προσδιορισμός κλάσεων για τα υπό μελέτη εκρηκτικά φορτία.

#	bin	center	#	bin	center	#	bin	center
1	[1-4]	2.5	6	[14-36]	25	11	[161-239]	200
2	[4-6]	5	7	[36-39]	37.5	12	[239-4761]	2500
3	[6-9]	7.5	8	[39-61]	50	13	[4761-5239]	5000
4	[9-11]	10	9	[61-139]	100	14	[5239-9761]	7500
5	[11-14]	12.5	10	[139-161]	150	15	[9761-10000]	10000

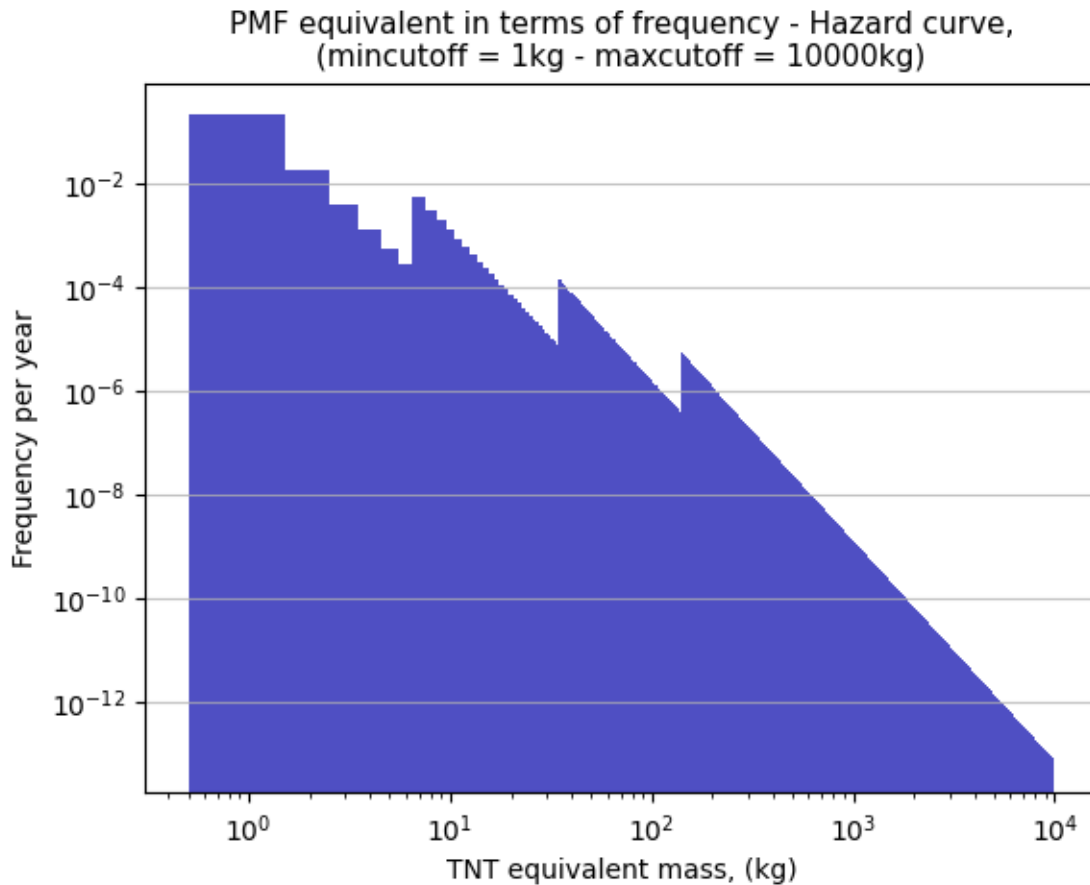
Αρχικά για τη σχεδίαση του σχήματος 6.18 μετατράπηκαν τα συνεχή μεγέθη της κατανομής σε διακριτά με $m_{\min} < m < m_{\max}$ με βήμα $m_{\max}/100$. Για παράδειγμα στην κατηγορία «άνθρωπος» το βήμα είναι $m_{\max}/100 = 10/100 = 0.1\text{kg}$, δηλαδή $m = 1, 1.1, 1.2, 1.3, \dots, 9.7, 9.8, 9.9, 10$. Έτσι, σύμφωνα με τις σχέσεις 6.9 και 6.10, οι οποίες αποτελούν “probabilities of equalling”, χωρίς την ταξινόμηση των βαρών σε κλάσεις, δημιουργήθηκε το σχήμα 6.18, το οποίο αφορά τη συνάρτηση μάζας πιθανότητας “P.M.F.” (Probability Mass function) σε όρους συχνότητας κάθε ζώνης για κάθε εκρηκτικό φορτίο της εκάστοτε κατηγορίας (kg-TNT). Στον κατακόρυφο άξονα είναι η συχνότητα εμφάνισης των παραπάνω μεγεθών, ενώ στον οριζόντιο είναι το αντίστοιχο εκρηκτικό φορτίο εκφρασμένο σε ισοδύναμα κιλά TNT, σε λογαριθμική κλίμακα



Σχήμα 6.18: Περιθώριες κατανομές κάθε ζώνης για κάθε εκρηκτικό φορτίο της εκάστοτε κατηγορίας (kg-TNT), (πάνω: αριστερά – άνθρωπος & δεξιά – μοτοσυκλέτα, κάτω: αριστερά – αυτοκίνητο & δεξιά – φορτηγό).

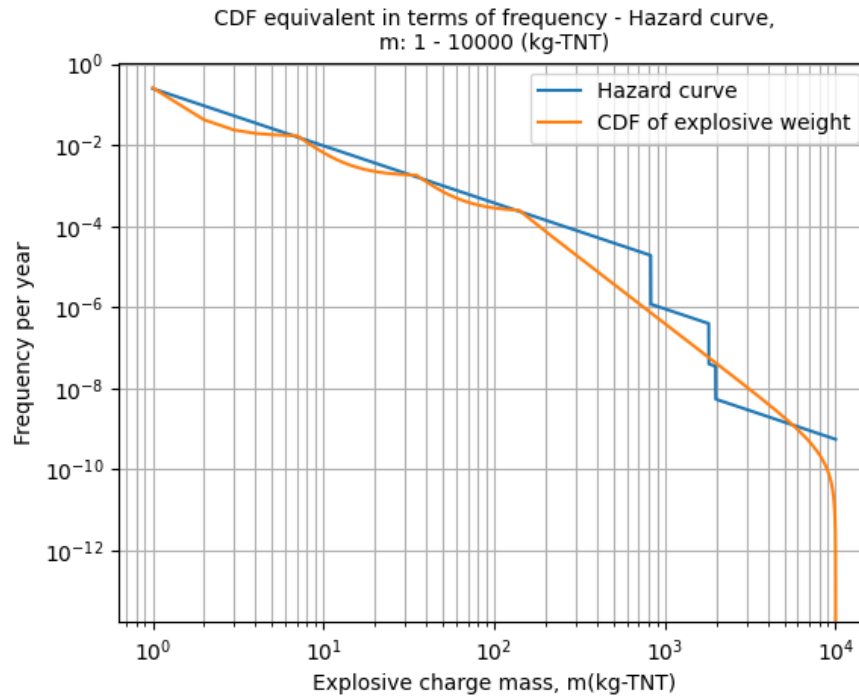
Στην κατανομή του εκρηκτικού φορτίου, υπήρχαν επικαλύψεις βάρους κατά τη μετάβαση από τη μια ζώνη στην ακριβώς επόμενη, όπως φαίνεται και στον πίνακα 6.2 (7-10kg, 35-50kg και 140-200kg), επομένως οι σχετικές μπάρες των ιστογραμμάτων που επικαλύπτονταν υποδιπλασιάστηκαν.

Το σχήμα 6.19, αφορά το ιστόγραμμα που δίνει τη συνάρτηση μάζας πιθανότητας (Probability Mass Function) κάθε εκρηκτικού φορτίου για όλες τις ζώνες (δηλ. $m_{\min} = 1\text{kg}$ έως $m_{\max} = 10000\text{kg}$) σύμφωνα με τις σχέσεις 6.9 και 6.10. Στον κατακόρυφο άξονα δίνεται η συχνότητα εμφάνισης των εκρηκτικών φορτίων, ενώ στον οριζόντιο δίνεται το αντίστοιχο εκρηκτικό φορτίο εκφρασμένο σε ισοδύναμο κιλά TNT, σε λογαριθμική κλίμακα. Φυσικά, το άθροισμα όλων των μπαρών του συγκεκριμένου ιστογράμματος, ισούται με τον καθολικό, μηχανικής σημασίας, ρυθμό γεγονότων ν_1 , της σχέσης 6.4 που ισούται με 0.257.

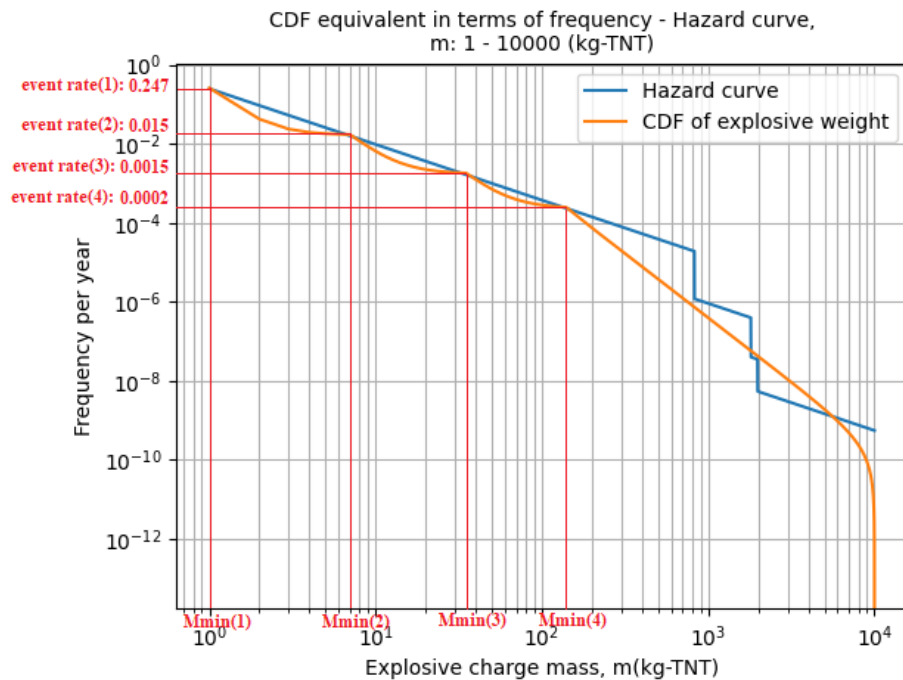


Σχήμα 6.19: Ισοδύναμο PMF σε όρους συχνότητας – καμπύλη επικινδυνότητας για εκρηκτικό φορτίο εκφρασμένο σε ισοδύναμα κιλά TNT από 1kg ως 10000kg.

Στο σχήμα 6.20, φαίνεται η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής (Cumulative Distribution Function) των εκρηκτικών φορτίων που προέκυψε από την συνάρτηση μάζας πιθανότητας, καθώς και η καμπύλη επικινδυνότητας σύμφωνα με τη σχέση 6.3, για την όλες τις ζώνες. Στον κατακόρυφο άξονα είναι η συχνότητα εμφάνισης των παραπάνω μεγεθών, ενώ στον οριζόντιο είναι το αντίστοιχο εκρηκτικό φορτίο εκφρασμένο σε ισοδύναμα κιλά TNT, σε λογαριθμική κλίμακα. Η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής τέμνεται με την καμπύλη επικινδυνότητας, στα σημεία που αλλάζει ο ρυθμός γεγονότων κάθε ζώνης, δηλαδή στα σημεία που αντιστοιχούν στα ελάχιστα εκρηκτικά φορτία κάθε ζώνης. Αυτό γίνεται καλύτερα αντιληπτό στο σχήμα 6.21.



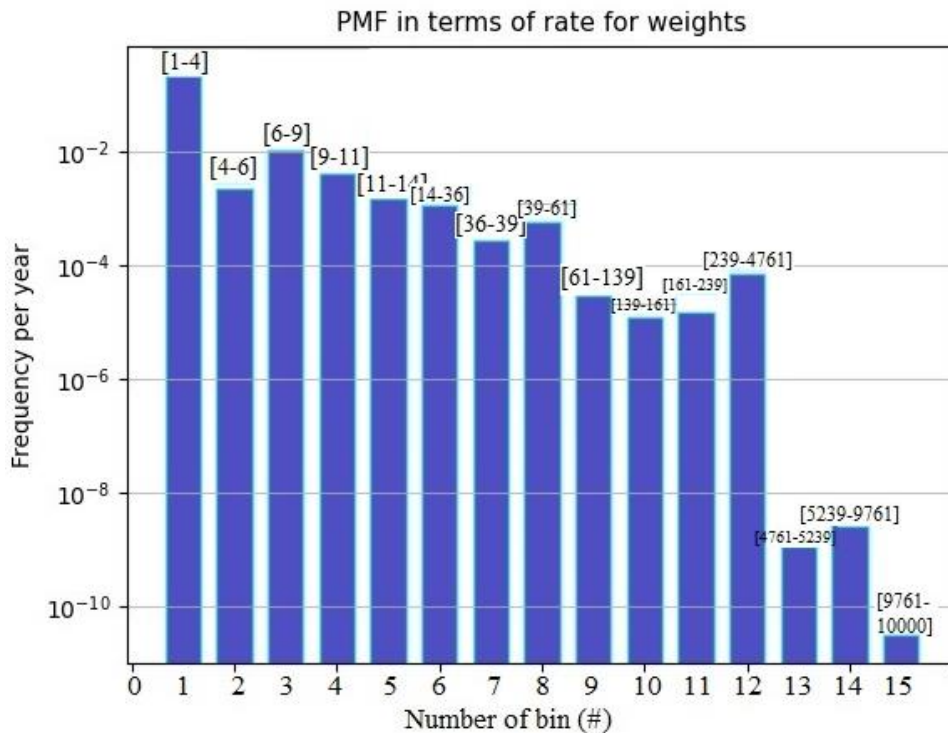
Σχήμα 6.20: Ισοδύναμο CDF σε όρους συχνότητας - καμπύλη επικινδυνότητας για εκρηκτικό φορτίο εκφρασμένο σε ισοδύναμα κιλά TNT από 1kg ως 10000kg.



Σχήμα 6.21: Επισήμανση των σημείων τομής στο διάγραμμα «ισοδύναμο CDF σε όρους συχνότητας - καμπύλη επικινδυνότητας για εκρηκτικό φορτίο εκφρασμένο σε ισοδύναμα κιλά TNT από 1kg ως 10000kg».

Ακόμη, στο σχήμα 6.22 δίνεται η συχνότητα εμφάνισης κάθε πιθανής κλάσης εκρηκτικού φορτίου. Όπως φαίνεται και από το σχήμα αυτό, μεγάλη συχνότητα παρατηρείται στις κλάσεις που αφορούν τις ελάχιστες τιμές βάρους κάθε ζώνης, διότι

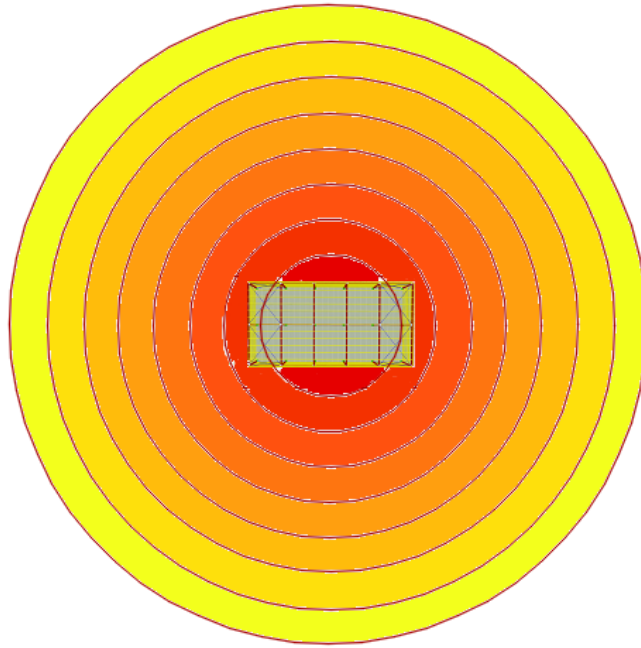
συμπεριλαμβάνουν και επικαλύψεις, καθώς και στις κλάσεις που έχουν ομαδοποιηθεί πολλά εκρηκτικά φορτία. Πάνω από κάθε μπάρα αναγράφονται οι τιμές εκρηκτικού φορτίου που περιλαμβάνει η εκάστοτε κλάση.



Σχήμα 6.22: Συχνότητα εμφάνισης κάθε πιθανής κλάσης εκρηκτικού φορτίου

6.6.3 Συχνότητα αποστάσεων από τον στόχο

Έγινε η παραδοχή μιας συγκεκριμένης ακτινικής κατανομής πιθανοτήτων των αποστάσεων των εκρήξεων, με κέντρο το κέντρο βάρους του κτιρίου όπως φαίνεται στο σχήμα 6.23, ανά 1m. Μέσα σε κάθε δακτύλιο, η κατανομή της πιθανότητας, προέρχεται από κει και μοιράζεται εξίσου. Επομένως όλα τα σημεία εντός του δακτυλίου θεωρούνται ισοπίθανα. Όσο μεγαλώνει η διάμετρος, τόσο μεγαλώνει και το εμβαδόν, επομένως δίνεται μεγαλύτερο βάρος στον πιο κοντινό κύκλο.



Σχήμα 6.23: Ομόκεντροι κύκλοι με κέντρο το κέντρο βάρους του κτιρίου, για την παραδοχή ακτινικής κατανομής πιθανοτήτων των αποστάσεων των εκρήξεων.

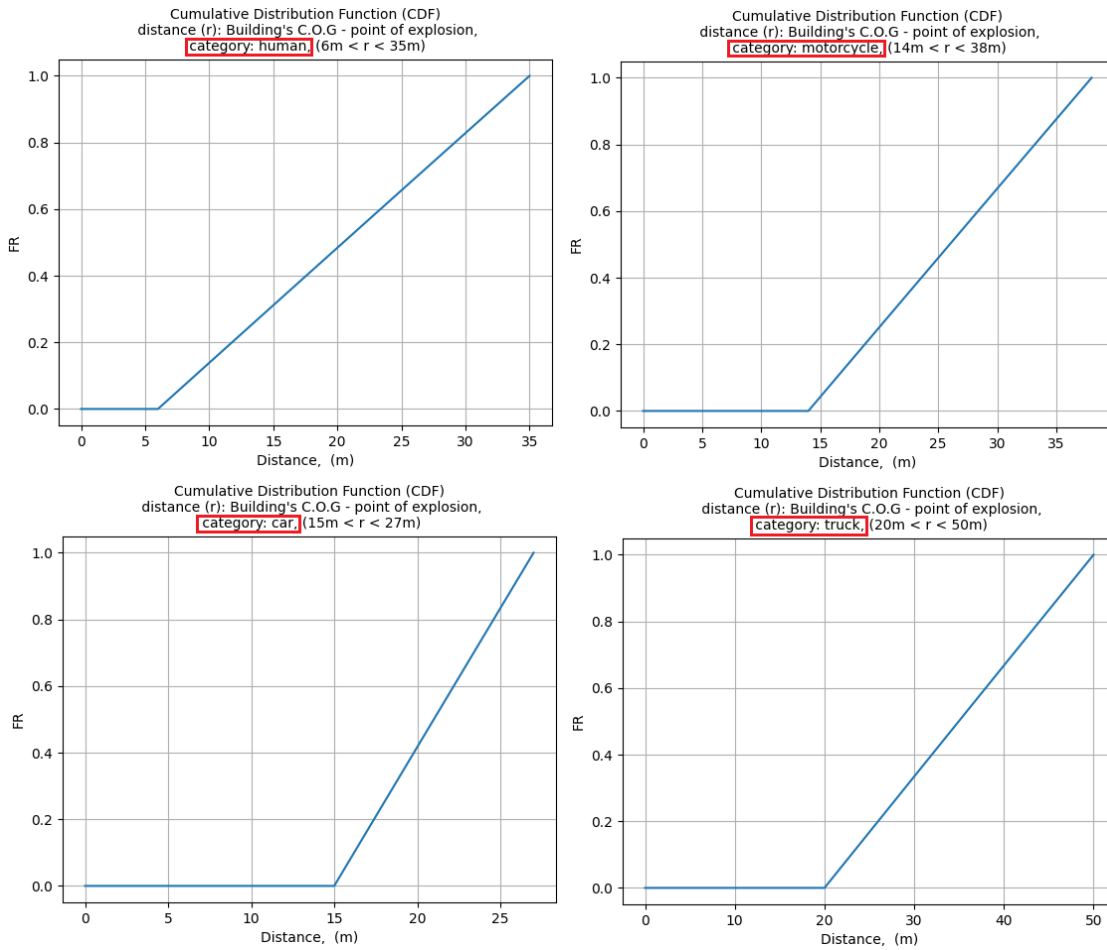
Η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής για την απόσταση του κέντρου βάρους του κτιρίου με το σημείο της έκρηξης, δίνεται από τη σχέση 6.11:

$$F_R(R) = \frac{1 - e^{-c(R-R_{\min})}}{1 - e^{-c(R_{\max}-R_{\min})}}, \quad (6.11)$$

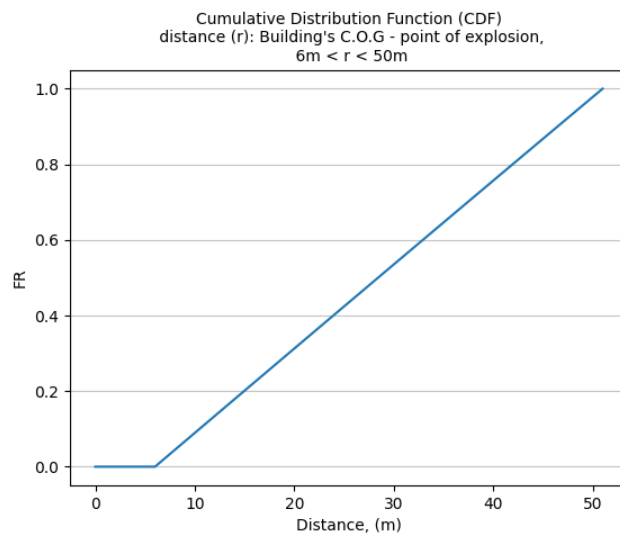
όπου R είναι η απόσταση του κέντρου βάρους του κτιρίου από το σημείο της έκρηξης, R_{\min} και R_{\max} είναι η ελάχιστη και η μέγιστη αυτή απόσταση αντίστοιχα όλων των σεναρίων για την εκάστοτε κατηγορία με $R_{\min} < R < R_{\max}$, και c είναι μια σταθερά ίση με 0.0003.

Στο σχήμα 6.24, φαίνεται η καμπύλη της συνάρτησης της αθροιστικής κατανομής συχνοτήτων της απόστασης (r) του κέντρου βάρους του κτιρίου από το σημείο της έκρηξης που προκύπτει από τη σχέση 6.11, για κάθε ζώνη. Στο σχήμα αυτό, φαίνονται επίσης οι μέγιστες και οι ελάχιστες αποστάσεις που παρατηρήθηκαν σε κάθε ζώνη, κατά την εκτέλεση των παραπάνω σεναρίων.

Ακόμη, στο σχήμα 6.25, φαίνεται η καμπύλη της συνάρτησης της αθροιστικής κατανομής συχνοτήτων της απόστασης (r) του κέντρου βάρους του κτιρίου από το σημείο της έκρηξης που προκύπτει από τη σχέση 6.11, για την ελάχιστη και μέγιστη δυνατή απόσταση του παραδείγματος.



Σχήμα 6.24: Καμπύλη της συνάρτησης της αθροιστικής κατανομής συχνοτήτων της απόστασης (r) του κέντρου βάρους του κτιρίου από το σημείο της έκρηξης, για κάθε ζώνη, (πάνω: αριστερά – άνθρωπος & δεξιά – μοτοσυκλέτα, κάτω: αριστερά – αυτοκίνητο & δεξιά – φορτηγό).

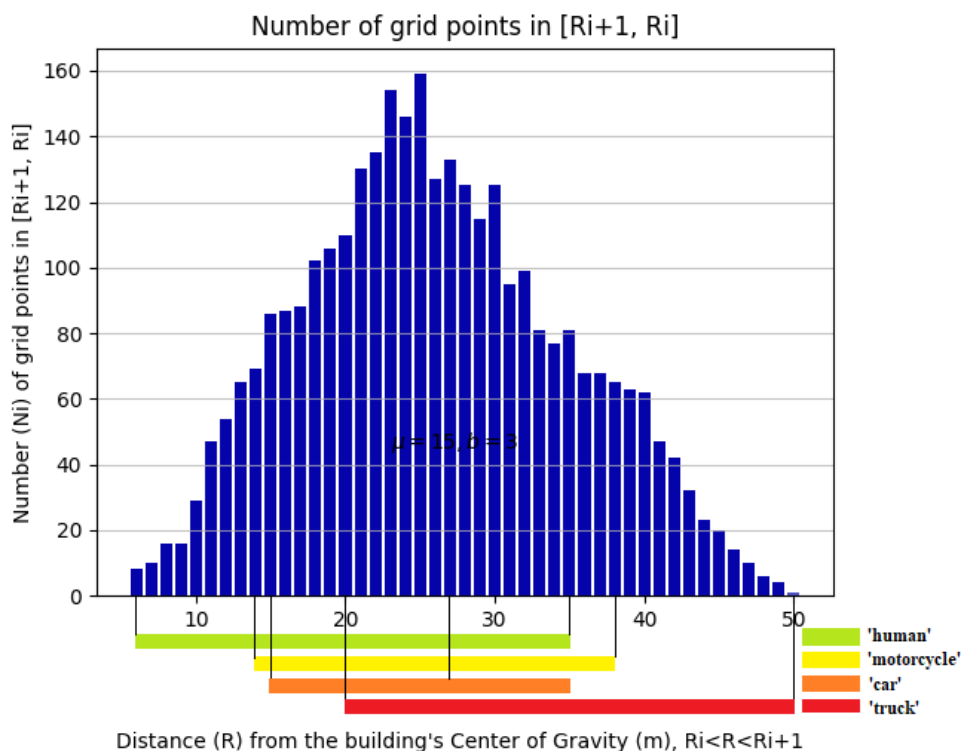


Σχήμα 6.25: Καμπύλη της συνάρτησης της αθροιστικής κατανομής συχνοτήτων της απόστασης (r) του κέντρου βάρους του κτιρίου από το σημείο της έκρηξης, για την ελάχιστη και μέγιστη δυνατή απόσταση του παραδείγματος.

Η συχνότητα εμφάνισης ενός σεναρίου έκρηξης, σε οποιαδήποτε απόσταση μέσα στη ζώνη ισούται με:

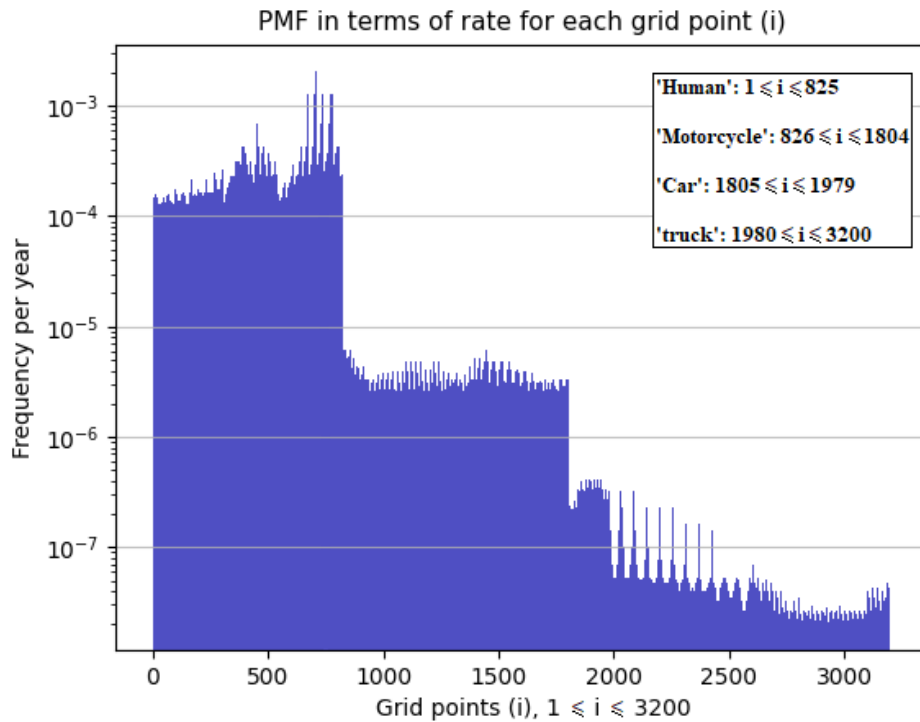
$$\Delta\lambda(\text{m being in } [m_F, m_L] \text{ and point } i) = \frac{F_R(R_{i+1}) - F_R(R_i)}{N_i} \times \Delta\lambda(\text{m being in } [m_F, m_L]), \quad (6.12)$$

όπου η απόσταση R (m) του σημείου i από το κέντρο βάρους του κτιρίου είναι μεταξύ του R_{i+1} και του R_i και N_i είναι ο αριθμός των σημείων (από τα 3200 του JSON-blast source αρχείου) που πέφτουν στην κλάση $[R_i, R_{i+1}]$. Ακόμη το εκρηκτικό φορτίο m (kg – TNT) ανήκει στην κλάση $[m_F, m_L]$ με $m_{\min} < m_F < m_L < m_{\max}$. Στο παρακάτω σχήμα, φαίνεται ο συνολικός αριθμός των σημείων που πέφτουν στην κλάση $[R_i, R_{i+1}]$, συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο βάρους του κτιρίου. Είναι προφανές πως στις αποστάσεις που ήταν κοινές για όλες τις ζώνες (20-35m), παρατηρήθηκαν οι μεγαλύτερες αυξήσεις.



Σχήμα 6.26: Συνολικός αριθμός των σημείων που πέφτουν στην κλάση $[R_{i+1}, R_i]$, συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο βάρους του κτιρίου

Στο σχήμα 6.27 δίνεται η συχνότητα εμφάνισης κάθε πιθανού σημείου έκρηξης. Όπως φαίνεται, η συχνότητα μειώνεται κατά τη μετάβαση από τη μια ζώνη στην επόμενη, και κατ' επέκταση, τα μεγάλα εκρηκτικά βάρη έχουν αρκετά πιο χαμηλή συχνότητα εμφάνισης από τα μικρά εκρηκτικά βάρη.



Σχήμα 6.27: Συχνότητα εμφάνισης κάθε πιθανού σημείου έκρηξης

6.7 Καμπύλες διακινδύνευσης

Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα των μέγιστων μετακινήσεων, τα οποία εξάγονται από τα αρχεία txt που προκύπτουν από τον κώδικα, με την πιθανοτική ανάλυση επικινδυνότητας εκρήξεων που αναλύθηκε παραπάνω, προέκυψε η καμπύλη διακινδύνευσης του πανέλου που βρίσκεται στην πλευρά 1 (Σχήμα 6.28). Το αποτέλεσμα αυτό προέκυψε από τον υπολογισμό $3200_{\text{σενάρια σημείων}} \times 4_{\text{σενάρια βάρους ανά ζώνη}} = 12800$ σεναρίων του συγκεκριμένου πανέλου. Στο σχήμα 6.29 επισημαίνονται οι οριακές καταστάσεις και οι στάθμες βλαβών οι οποίες υπολογίστηκαν στο υπό-κεφάλαιο 6.2.

Για τον σχεδιασμό των καμπυλών διακινδύνευσης, οι τιμές των ορίων μετακίνησης (displacement thresholds), λήφθηκαν από την παρακάτω σχέση:

$$X_{\text{thresholds}} = \frac{L}{2} \times \tan(\theta), \quad (6.13)$$

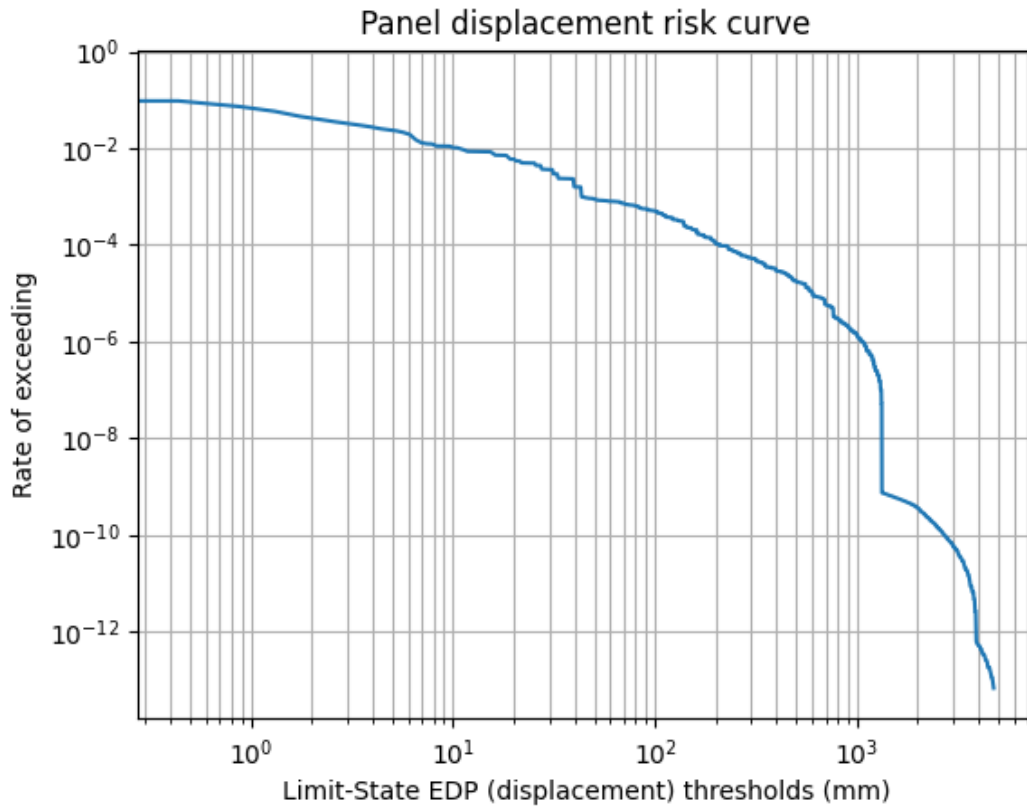
όπου $0^\circ < \theta < 85^\circ$ με βήμα 0.05.

Από το σχήμα αυτό, γίνεται αντιληπτό πως η οριακή κατάσταση αστοχίας, αντιστοιχεί σε συχνότητα υπέρβασης της οριακής κατάστασης ενδιαφέροντος ίση με 5×10^{-2} ανά έτος, ή 0.05 γεγονότα ανά έτος, ή 20 έτη περίοδο επαναφοράς. Πιο αναλυτικά, προέκυψαν οι εξής περίοδοι επαναφοράς για τις οριακές καταστάσεις:

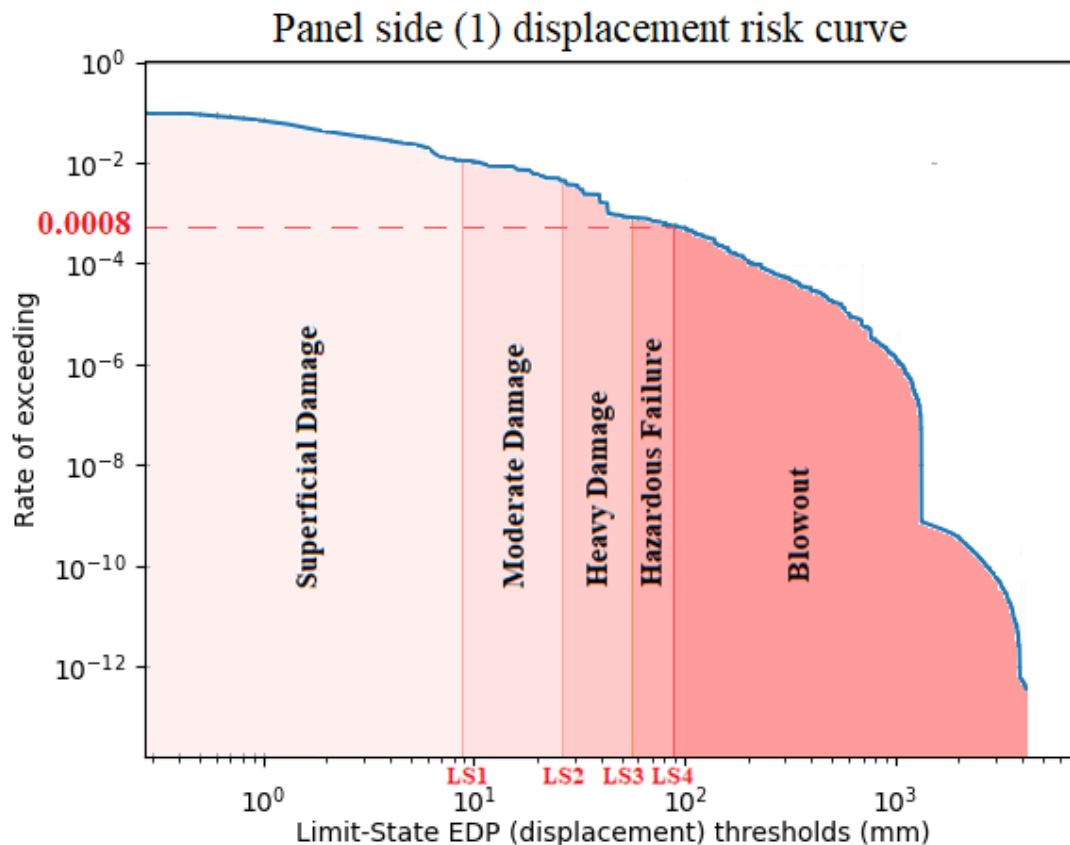
1. LS₁: 100 έτη περίοδος επαναφοράς,
2. LS₂: 125 έτη περίοδος επαναφοράς,
3. LS₃: 1100 έτη περίοδος επαναφοράς και
4. LS₄: 1250 έτη περίοδος επαναφοράς,

Αντίστοιχα για την εμφάνιση των στάθμων βλαβών, προκύπτουν:

1. επιφανειακές βλάβες σε λιγότερα από 100 έτη,
2. ήπιες βλάβες μεταξύ 100-215 έτη,
3. έντονες βλάβες μεταξύ 215-1000 έτη,
4. επικίνδυνες αστοχίες μεταξύ 1000-1250 έτη και
5. διάτρηση πανέλου σε περισσότερα από 1250 έτη.



Σχήμα 6.28: Καμπύλη διακινδύνευσης πανέλου τοίχου, της πλευράς 1.

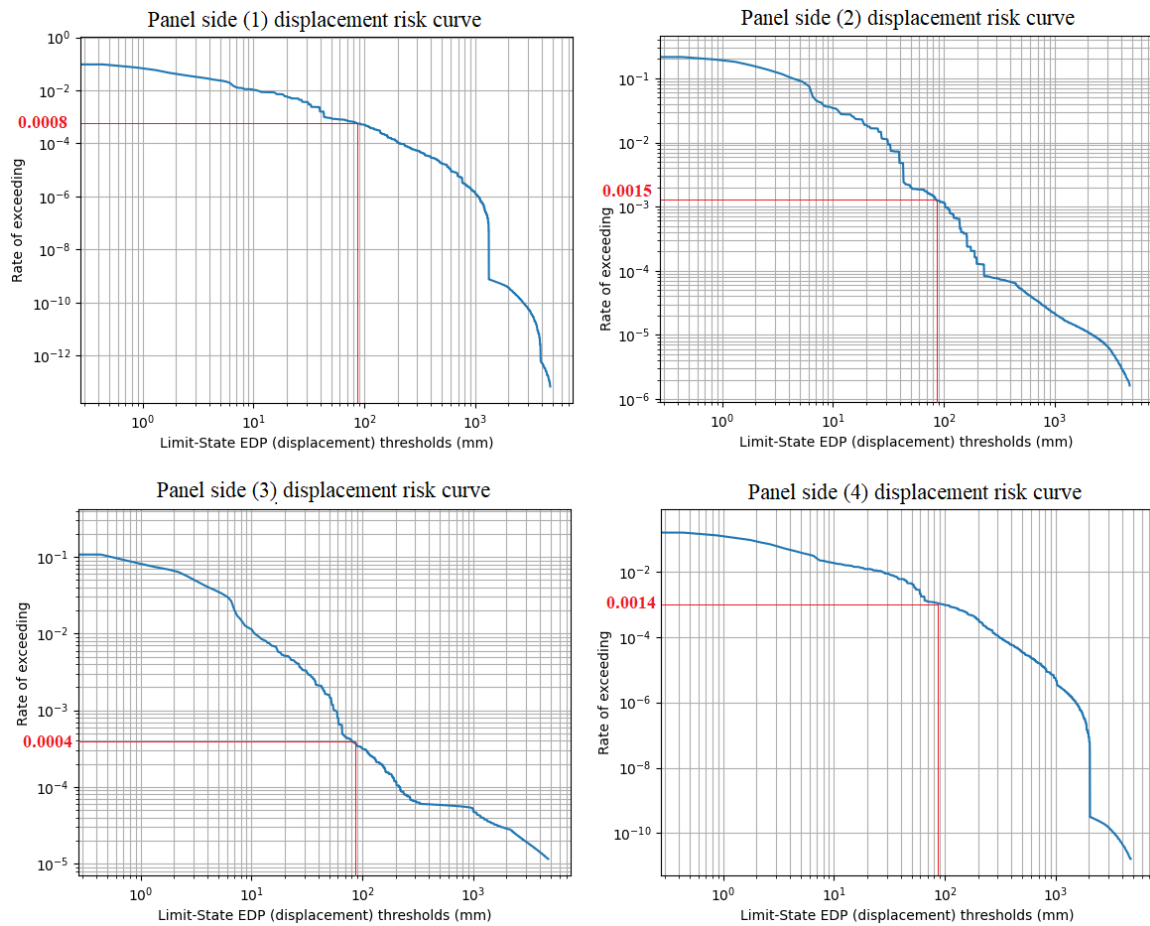


Σχήμα 6.29: Καμπύλη διακινδύνευσης πανέλου τοίχου, της πλευράς 1, με τις οριακές καταστάσεις και τις στάθμες βλαβών.

Ακόμη, σχεδιάστηκαν οι καμπύλες διακινδύνευσης για όλα τα πανέλα τοίχου με σκοπό να διεξαχθούν καλύτερα συμπεράσματα (Σχήμα 6.30). Από το σχήμα αυτό προκύπτει πως:

1. η περίοδος επαναφοράς για το πανέλο της πλευράς 1 ισούται με 8×10^{-4} , δηλαδή 1250 έτη,
2. η περίοδος επαναφοράς για το πανέλο της πλευράς 2 ισούται με 1.5×10^{-3} , δηλαδή 650 έτη,
3. η περίοδος επαναφοράς για το πανέλο της πλευράς 3 ισούται με 4×10^{-4} , δηλαδή περίπου 2500 έτη,
4. η περίοδος επαναφοράς για το πανέλο της πλευράς 4 ισούται με 1.4×10^{-3} , δηλαδή περίπου 715 έτη.

Είναι λογικό που η μικρότερη περίοδος επαναφοράς αντιστοιχεί στις πλευρές 2 και 4 αφού σε αυτές, είναι δυνατές οι εκρήξεις που δίνουν θετικά συνημίτονα της γωνίας πρόσπτωσης του εκρηκτικού κύματος από όλες τις κατηγορίες, καθώς και οι αποστάσεις από αυτές είναι μικρές. Επίσης, η μεγαλύτερη περίοδος επαναφοράς (2500 έτη) αντιστοιχεί στην πλευρά 3, καθώς οι μόνες εκρήξεις με θετικά συνημίτονα γωνίας πρόσπτωσης, είναι εφικτές από την κατηγορία "άνθρωπος", όπου είναι σχεδόν ακατόρθωτο να προκαλέσει διάτρηση στο πανέλο και από την κατηγορία "φορηγό" όπου οι συχνότητες εμφάνισης εκρηκτικού φορτίου του μεγέθους που πυροδοτεί το φορηγό είναι πολύ μικρές συγκριτικά με τις συχνότητες εμφάνισης των άλλων κατηγοριών, (όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.22) επομένως και η συχνότητα να αστοχήσει το πανέλο λόγω του φορηγού είναι μικρή.



Σχήμα 6.30: Καμπύλη διακινδύνευσης για ένα πάνελ κάθε πλευράς.

7 Συμπεράσματα

Αναπτύσσεται λογισμικό, που δύναται να παράγει αποτελέσματα χρονικών αναλύσεων και δυναμικών αντιδράσεων για κάθε πάνελο (οροφής και τοίχου), μηκίδα και τεγίδα, μεταλλικής κατασκευής, για οποιοδήποτε σενάριο εξωτερικής έκρηξης. Η έκρηξη, πυροδοτείται από τέσσερις πιθανές κατηγορίες («άνθρωπος», «μοτοσυκλέτα», «αυτοκίνητο» και «φορτηγό»), με εκρηκτικά φορτία από 1 έως 10000kg-TNT, από 3200 διαφορετικά σημεία. Ακολουθεί η πιθανοτική ανάλυση επικινδυνότητας των εκρήξεων και προκύπτουν οι καμπύλες τρωτότητας για κάθε πλευρά του κτιρίου.

Κατά τη συγγραφή του τεράστιου σε έκταση κώδικα που δημιουργήθηκε, ήταν απαραίτητη η πολύωρη καθημερινή ενασχόληση καθώς και η πλήρης συγκέντρωση, αφού ένα πολύ μικρό λάθος ήταν υπέρ αρκετό ώστε να προκύψουν τελείως λάθος τα παραπάνω αποτελέσματα και λάθος συμπεράσματα κατ'επέκταση. Δεν ήταν λίγες οι φορές όπου ήταν αναγκαία η διαγραφή συναρτήσεων και διαδικασιών, η συγγραφή των οποίων, απαιτούσε εβδομάδες απασχόλησης στον υπολογιστή. Ιδιαίτερη προσοχή έπρεπε να δοθεί ώστε να γίνει σωστά το μοντέλο παραμετρικό και στην προσθήκη συναρτήσεων που φροντίζουν, οι μεταβλητές που δέχεται ο κώδικας, να είναι αποδεκτές. Έχει σημασία, ο κώδικας που στήνεται στην Python, να μην αφορά μια συγκεκριμένη περίπτωση, αλλά να είναι γενικός. Ακόμη, είναι δύσκολη η συγγραφή της πιθανοτικής ανάλυσης, αλλά αφού γίνει, οι υπολογισμοί έπειτα προκύπτουν εύκολα και γρήγορα. Ιδιαίτερη μνεία πρέπει να δοθεί στη σωστή διασύνδεση της πιθανοτικής ανάλυσης με τα αποτελέσματα των μετακινήσεων για κάθε σημείο, καθώς και στη σωστή αποτύπωση, περίπλοκων εξισώσεων και διαδικασιών (π.χ. Kingery and Bulmash, Newton Raphson κλπ). Στα αρχικά μας πλάνα, ήταν η διεξαγωγή πειραμάτων για τη μελέτη της απόκρισης των πανέλων λόγω των εκρήξεων, σε ανοιχτό χώρο υπό την επίβλεψη υπεύθυνων και έμπειρων στρατιωτικών, αλλά λόγω των αντίξοων συνθηκών το τελευταίο έτος, αυτή η ιδέα δυστυχώς, δεν κατέστη δυνατή.

Με αυτά ως βάση, η εργασία μπορεί να αποτελέσει μια αρχή για τη συνέχιση της έρευνας σε άλλα ενδιαφέροντα πεδία στον τομέα των εκρήξεων. Αυτά δύναται να είναι η εξέταση του αντικειμένου των εκρήξεων στον τομέα των συνδέσεων καθώς και η προσέγγιση της διαφορετικής μορφολογίας που μπορεί να αποκτήσει μια κατασκευή όταν ελέγχεται έναντι μιας έκρηξης σε αντίθεση με όταν ελέγχεται συμβατικά. Ακόμη, ενδιαφέρον παρουσιάζει ο υπολογισμός της απόκρισης μιας μεταλλικής ή μη κατασκευής σε ταυτόχρονες πολλαπλές εκρήξεις από διάφορα σημεία. Σημαντική επίσης είναι και η μελέτη, της σφαιρικής έκρηξης, ελεύθερης ή μη, της επίδρασης των δονήσεων του εδάφους, των θρυμματισμών και των δευτερευόντων συντριμμίων που προκαλούνται. Αυτές οι προτάσεις μπορούν να αποτελέσουν μοχλό έρευνας και να οδηγήσουν σε περαιτέρω επιστημονικές αναζητήσεις.

8 Βιβλιογραφία

1. Γρηγορόπουλος Π. (2009). Ιστορική Αναδρομή Ατυχημάτων κατά την Μεταφορά και Αποθήκευση Εκρηκτικών Υλών. Τα Νέα της EXTRACO. Έτος 5ο (τεύχος 10), 4-7
2. Εγκυκλοπαίδεια (2001) Πάπυρος Larousse Britannica Τόμος 22, Λήμμα «έκρηξη».
3. ΈΛΑΣΤΡΟΝ (2015), «Πίνακες σχεδιασμού σύμμικτων πλακών με τραπεζοειδές χαλυβδόφυλλο SYMDECK 50».
4. Ιωάννου Ο. (2017) «Βασικές αρχές και παραδείγματα σχεδιασμού κατασκευών έναντι εκρήξεων». Αθήνα.
5. Καμπούρης Εμμ., (1984) «Τεχνολογία Εκρηκτικών Υλών». Γ' Έκδοση Τυπογραφείο Αθανασόπουλος-Παπαδάμης-Ζαχαρόπουλος, Αθήνα.
6. Μπαλικτσής Η. (1996) «Ελεγχόμενη Κατεδάφιση Μεγάλων Κτιρίων με Χρήση Εκρηκτικών υλών- Στοιχεία και Εμπειρίες από την Κατεδάφιση 17όροφου Κτιρίου μέσα στην Αθήνα». Βιβλιοθήκη ΤΕΕ, 12ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Λεμεσός.
7. Νομικού Ι., Ξύδη Α. (2011) «Ελεγχόμενη κατεδάφιση με χρήση εκρηκτικών». 17^ο Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές Κατασκευών, Πάτρα.
8. Σκάρτσης Ν. (2017) «Αναγνώριση κινδύνων και σχεδιασμός έκτακτων αναγκών σε βιομηχανική εγκατάσταση παρασκευής εκρηκτικών υλών». Αθήνα.
9. Chopra, A. K. (2007). Dynamics of structures third edition. *Prentice Hall*.
10. Cormie, D., Mays, G., & Smith, P. (2019). *Blast effects on buildings*. ICE publishing.
11. Draganić, H., & Sigmund, V. (2012). Blast loading on structures. *Tehnički vjesnik*, 19(3), 643-652.
12. Eurocode 3 “Table of design material properties for structural steel”.
13. Chipley, M. (2003). “*Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings: Providing Protection to People and Building*”. Federal Emergency Management Agency.
14. International Ammunition Technical Guideline (IATG 01.80),” *Formulae for ammunition management*”. Second edition 2015-02-01.
15. Jenkins, B. M., & Butterworth, B. R. (2010). Explosives and Incendiaries Used in Terrorist Attacks on Public Surface Transportation: A Preliminary Empirical Analysis, MTI Report WP 09-02.
16. Jon A. Schmidt (2007) “Blast design – equivalent static methods”. Annual meeting, structural engineers association of Kansas and Missouri.
17. Nagata, M., Beppu, M., Ichino, H., & Yashiro, H. (2017). Proposal on risk assessment of reinforced concrete structures subjected to explosive loads. *International Journal of Protective Structures*, 8(3), 407-432.
18. Spignesi S.J. (2006). The 100 Greatest Disasters off All Time. (Γ. Περαντωνάκης). Αθήνα:Εκδόσεις Φυτράκη (το πρωτότυπο έργο εκδόθηκε το 2002).
19. Todd, J. D. (1981). *Structural theory and analysis*. Macmillan International Higher Education.
20. Yelland M. (2015) “Iconic Images from 9/11 World Trade Center attack”.