



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΕΚΡΗΞΕΩΝ



Μεταπτυχιακή εργασία

Μ.Δ.Ε. Δομοστατικός σχεδιασμός και ανάλυση των κατασκευών

Ορέσσης Ιωάννου

ΕΜΚ ΜΕ 2017/02

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Καθηγητής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Συνεπιβλέπων: Μιχάλης Χατζιωάννου, Ερευνητής - Μηχανικός, Protection Engineering Consultants

Αθήνα, Μάρτιος 2017

Φωτογραφία: Έκρηξη 3200kg AN
στο Alfred Murrah Building, Oklahoma



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΕΚΡΗΞΕΩΝ

Μεταπτυχιακή Εργασία

Μ.Δ.Ε. Δομοστατικός σχεδιασμός και ανάλυση των κατασκευών

Ορέστης Ιωάννου

ΕΜΚ ΜΕ 2017/02

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Καθηγητής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Συνεπιβλέπων: Μιχάλης Χατζηιωάννου, Ερευνητής - Μηχανικός, Protection
Engineering Consultants

Αθήνα, Μάρτιος, 2017

Copyright © Ορέστης Ιωάννου, 2017

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 διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Orestis Ioannou, 2017

All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma 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 diploma 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).

Ορέστης Ιωάννου (2017)

Βασικές αρχές και παραδείγματα σχεδιασμού κατασκευών έναντι εκρήξεων
Μεταπτυχιακή Εργασία ΕΜΚ ΜΕ 2017/02
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Orestis Ioannou (2017)

Basic principles and design applications of structures subjected to explosions
Master Thesis ΕΜΚ ΜΕ 2017/01
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Ευχαριστίες

Το ευχαριστώ είναι μια εύκολη λέξη να την πεις αλλά δεν παύει να είναι παρά μόνο μια λέξη. Το βάρος που έχει δεν μπορεί να το σηκώσει. Δεν αντέχει δηλαδή ούτε το ίδιο βάρος της όπως θα λέγαμε εμείς οι πολιτικοί μηχανικοί. Το περίεργο όμως είναι ότι την λένε όλοι και είναι ίδια για όλες τις περιστάσεις, άντε να προστεθεί και ένα πολύ στο τέλος. Και έτσι να γίνει "ευχαριστώ πολύ". Πάλι, όμως, συνδυάζεται σε όλες τις περιστάσεις, το ίδιο ευχαριστώ θα πω στον άνθρωπο που φέρνει το φαγητό που παρήγγειλα εδώ και ώρα και το ίδιο ευχαριστώ θα πω σε όλους τους υπόλοιπους. Θα το πάω, λοιπόν, χρονολογικά:

Πλησιάζει ο Φεβρουάριος του 2015 και σκέφτομαι τι να κάνω αμέσως μετά το δίπλωμα. Να κάνω αίτηση για μεταπτυχιακό στο εξωτερικό, ίσως να πάω στρατό αλλά από την άλλη δεν έχω ιδέα και ποιο είναι το επάγγελμα του μηχανικού στην πράξη. Είμαι στα 4.5 χρόνια του διπλώματος και έχω τελειώσει και με τα μαθήματά μου και με τη διπλωματική εργασία. Έτσι λέω ότι όσο οι συμφοιτητές μου προσπαθούν να τελειώσουν εγώ θα ξεκουραστώ και θα αποφασίσω τι να κάνω. Κάπου εκεί βρίσκεται το Ίδρυμα Ωνάση το οποίο έχει ορίσει προθεσμία αιτήσεων περί το τέλος Φεβρουαρίου. Σπεύδω, λοιπόν, να αποφασίσω και λέω ότι αγαπάω τόσο πολύ τη χώρα μου που προτιμώ να κάτσω εδώ μέχρι και για το μεταπτυχιακό, αρκεί να μην είναι απλώς μια μαρκίζα.

Έτσι, κρίνω ότι το συγκεκριμένο μεταπτυχιακό είναι κάτι που αξίζει και όχι κάτι που θα χρησιμοποιούσα για να συμπληρώσω το βιογραφικό μου. Τελικά, το Ίδρυμα Ωνάση το καλοκαίρι του ίδιου χρόνου μου χορηγεί την υποτροφία και ξεκινώ να σκέφτομαι πώς από τη Θεσσαλονίκη που σπούδαζα θα πάω σε μια Αθήνα στην οποία δεν ξέρω σχεδόν κανέναν. Το βήμα έγινε και ήταν δύσκολο καθώς έπρεπε να βρω σπίτι και να το φτιάξω. Η συνεισφορά του Ιδρύματος είναι τόσο σημαντική, ώστε να πω ότι δίχως αυτό δεν θα έκανα ποτέ το μεταπτυχιακό. Ευχαριστώ, λοιπόν, πολύ. Ευχαριστώ και τον Καθηγητή Ιωάννη Ψυχάρη ο οποίος ως σύμβουλος σπουδών μου με βοήθησε σε αυτό.

Στην πορεία του μεταπτυχιακού κάνω πολλούς φίλους αλλά ξεχωρίζω δύο. Τον Γιώργο και τον Γιάννη. Μέσα από αυτούς γνωρίζω και τον Καθηγητή μου, τον Χάρη Γαντέ. Στο μάθημά του στο μεταπτυχιακό κάναμε μια ομαδική εργασία και μου είχε προκαλέσει έκπληξη το γεγονός ότι αυτός ο άνθρωπος έχει υπερβολικές ενασχολήσεις αλλά παρ' όλα αυτά προλαβαίνει τα πάντα επιτυχώς.

Έτσι, του ζητώ να αναλάβει τη μεταπτυχιακή μου εργασία και μου προτείνει το εξέχον θέμα των εκρήξεων στα κτίρια το οποίο είναι επίκαιρο, σε ερευνητική αιχμή και απαραίτητο εθνικά, αφού η Ελλάδα έχει έντονη τρομοκρατική δραστηριότητα, μια από τις μεγαλύτερες στον κόσμο. Μάλιστα, μου γνωρίζει τον Μιχάλη Χατζηγιάννου ο οποίος εργάζεται στις Η.Π.Α. πάνω στο αντικείμενο των εκρήξεων. Ο Μιχάλης με βοηθάει ιδιαίτερα και με κάνει να καταλάβω πολλά πράγματα και όλα αυτά εξ αποστάσεως χωρίς να με έχει γνωρίσει ποτέ από κοντά. Σε ευχαριστώ Μιχάλη, πολύ. Επιπλέον, μου γνωρίζει την υποψήφια διδάκτορά του Κωνσταντίνα Κουλάτσου που με βοηθάει σε θέματα προσομοίωσης. Σε ευχαριστώ και σένα Κωνσταντίνα, πολύ. Γενικώς, μου γνωρίζει πολύ κόσμο πέρα από το γεγονός ότι ασχολείται ο ίδιος προσωπικά. Ακόμη και τώρα που γράφω τις ευχαριστίες, πηγαίνω στο γραφείο του καθημερινά. Σας ευχαριστώ, κ. Γαντέ, πολύ, για όλα.

Όμως, δεν ξεχνώ και τους υπόλοιπους, τα ευχαριστώ είναι αυτονόητα για τους γονείς μου και για τον μικρό μου αδερφό, ο οποίος δεν πρέπει να έχει παράπονο καθώς του αφιέρωσα ήδη το δίπλωμά μου στον όρκο. Δυστυχώς, δεν είχα την ευκαιρία να αφιερώσω και την τότε διπλωματική εργασία σε κανέναν καθώς ήταν ομαδική. Οπότε, τώρα που έχω την ευκαιρία θα αφιερώσω τη μεταπτυχιακή μου εργασία στον πρώην συμφοιτητή μου και καλύτερό μου φίλο Χάρη Καρυπίδη ο οποίος είναι στην Αλεξανδρούπολη και μου λείπει. Σας αφήνω τώρα γιατί ήρθε η παραγγελία μου. Καλή ανάγνωση.

Put your future in good hands, your own



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΜΕ 2017/02

Βασικές αρχές και παραδείγματα σχεδιασμού κατασκευών έναντι εκρήξεων

Ορέστης Ιωάννου

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Καθηγητής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Συνεπιβλέπων: Μιχάλης Χατζηιωάννου, Ερευνητής - Μηχανικός, Protection Engineering Consultants
Μάρτιος 2017

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι βομβιστικές τρομοκρατικές επιθέσεις με την πάροδο του χρόνου όλο και αυξάνονται ενώ οι επιθέσεις με συμβατικές μεθόδους περιορίζονται πια αφού μέσω των εκρήξεων ένας εν δυνάμει τρομοκράτης δύναται να προκαλέσει σκληρότερο αποτέλεσμα με λιγότερο κόπο. Παράλληλα, οι εκρήξεις λόγω ατυχημάτων παραμένουν σταθερές ως κίνδυνος. Έτσι, το πρόβλημα των εκρήξεων παραμένει μόνιμα στην επικαιρότητα λαμβάνοντας χώρα τόσο σε αναπτυγμένες όσο και σε αναπτυσσόμενες χώρες ενώ ιδίως στην Ελλάδα κατέχει μία εκ των υψηλότερων θέσεων παγκοσμίως. Ωστόσο, η δράση των εκρήξεων από την πλευρά ενός μηχανικού ποτέ δεν είχε ευρύ πεδίο εφαρμογής στην Ελλάδα. Έτσι, η γνώση στο συγκεκριμένο αντικείμενο είναι περιορισμένη καθώς υπήρχαν περιορισμένες εφαρμογές που να την απαιτούν. Πλέον, όμως, η κατάσταση αυτή αλλάζει ριζικά αφού η έκρηξη αποτελεί μια συνήθη δράση που έχει βαρύνοντα ρόλο σε ένα έργο καθώς μπορεί να κρίνει την τελική διαστασιολόγηση ενός φορέα. Ο δε τρόπος δράσης της είναι διαφορετικός από αυτόν του σεισμού ή του ανέμου και με αυτόν τον τρόπο αποκτά ιδιαίτερη σημασία στον τρόπο μόρφωσης ενός στατικού συστήματος. Ενώ, ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι το θέμα των εκρήξεων είναι στενά συνδεδεμένο με την κοινωνία τόσο υπό τη σκοπιά της τρομοκρατίας όσο και υπό την σκοπιά των ατυχημάτων που οδηγούν σε εκρήξεις καθώς και στις δύο περιπτώσεις βαρύνοντα ρόλο παίζει ο ανθρώπινος παράγοντας και όχι τα φυσικά φαινόμενα. Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, λοιπόν, έρχεται να παρουσιάσει τις βασικές αρχές που διέπουν την έκρηξη ως δράση και να παράσχει τα κατάλληλα εφόδια για τον σχεδιασμό ενός έργου σε έκρηξη. Τα εφόδια αυτά μεταφράζονται τόσο σε εργαλεία, όπως τυπολόγια, πίνακες και διαγράμματα όσο και σε εφαρμογές απλοποιημένες αλλά και σύνθετες. Οι εφαρμογές αυτές βρίσκονται στην αιχμή των πλέον επίκαιρων τεχνολογικών προσπαθειών γύρω από την έκρηξη. Έτσι, γίνεται εμβάθυνση των τεχνολογικών γνώσεων στο πεδίο των εκρήξεων που είναι ένα από τα πλέον μείζονα προβλήματα της κοινωνίας ενώ γίνεται και σύγκριση των μεθόδων ανάλυσης μιας έκρηξης. Η διαδικασία είναι δυσχερής αφού τα βασικά σχεδιαστικά εργαλεία προστατεύονται εσωτερικά από τις χώρες που τα παράγουν, ωστόσο προτείνονται τεχνικές που δίνουν τη δυνατότητα ανάλυσης οποιουδήποτε είδους φορέα σε έκρηξη με εναλλακτικά μέσα.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES

MASTER THESIS
EMK ME 2017/02

Basic principles and design applications of structures subjected to explosions

Orestis Ioannou

Supervisor: Charis Gantes, Professor, National Technical University of Athens
Co-supervisor: Michalis Hadjioannou, Researcher - Engineer, Protection Engineering Consultants
March 2017

ABSTRACT

In the course of time, terrorist attacks using explosives keep increasing while conventional methods of attacking are limited. A potential terrorist has the ability to cause a more severe result with less effort through bombing. Simultaneously, accidental explosions are still a lurking danger. So, explosions are constantly on the news regarding both the developed and the developing countries while Greece specifically holds one of the highest positions in the list of the top rankings worldwide. However, from an engineering perspective, explosions never had actual application to greek projects. So, knowledge regarding explosions is limited since there were only few applications to demand it. Nevertheless, blast has become a common action nowadays and plays a significant role since it can determine the final design geometry and section properties of a structure. Furthermore, explosion is of paramount importance for the structural system as it has a different mode of action from the earthquake or the wind. An interesting fact is that explosions are closely related to society regarding both terrorism and accidents since the human element plays a key role and not the natural phenomena which apply to most occasions. So, this master thesis' main aim is to answer the most common questions regarding this issue, to present the general principles that form the action of explosions and to equip the potential designer with proper tools for structural mechanics use. More specifically, these tools are formulas, tables, diagrams and applications, both simple and complex. The applications do not only have educational side but also focus on current research since they are at the technological edge of the field of explosions. As a result, this thesis is an effort to enforce the technological knowledge in the field of explosions which is one of society's current needs as well as to present a comparison of the analysis methods of a structure subjected to blast loads and the designation of the most appropriate ones. However, the main methodologies are protected in terms of research and design for internal safety reasons in countries which have developed this type of technology. So applying an explosion to a structural element has become a tedious procedure and thus this thesis is a gives a large variety of examples and alternative tools in order to extract structural behavior under blast loading since the most commonly used tools worldwide are not disclosed to other countries such as Greece.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Εκρήξεις στην Ελλάδα	1
1.2	Σημαινόντα παραδείγματα τρομοκρατικών επιθέσεων	2
1.3	Διάρθρωση εργασίας.....	7
2	ΕΚΡΗΚΤΙΚΕΣ ΥΛΕΣ	9
2.1	Κατηγοριοποίηση εκρήξεων	9
2.2	Ιδιότητες εκρηκτικών υλών	9
2.2.1	Ταχύτητα έκρηξης.....	10
2.2.2	Ισχύς έκρηξης.....	11
2.2.3	Ισοδυναμία TNT.....	11
2.2.4	Ποιότητα παραγόμενων αερίων	11
2.2.5	Αντίσταση στο νερό	12
2.3	Κατηγοριοποίηση εκρηκτικών υλών	12
2.4	Εξερευνημένες εκρηκτικές ύλες	14
3	ΦΥΣΙΚΗ ΤΩΝ ΕΚΡΗΞΕΩΝ	17
3.1	Έκρηξη συμπυκνωμένης φάσης	17
3.5	Έκρηξη με περιορισμένες συνθήκες	31
4	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΦΟΡΤΙΩΝ ΕΚΡΗΞΗΣ	35
4.1	Εμπειρικές μέθοδοι	35
4.1.1	Έκρηξη συμπυκνωμένης φάσης σε ελεύθερες συνθήκες.....	35
4.1.2	Έκρηξη συμπυκνωμένης φάσης σε περιορισμένες συνθήκες.....	36
4.1.3	Έκρηξη νέφους αερίων	36
4.2	Ημ εμπειρικές μέθοδοι	36
4.3	Μέθοδοι πρώτων αρχών.....	36
4.3.1	Εξισώσεις Navier-Stokes	36
4.3.4	Παράμετροι	37
5	ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΕ ΕΚΡΗΞΗ	39
5.1	Τρεις καταστάσεις απόκρισης	39
5.2	Διαγράμματα πίεσης – ώθησης (βλαβών)	41
5.3	Μέθοδοι ανάλυσης.....	44
5.3.1	Μέθοδος Rayleigh – Ritz	44

5.3.2 Μέθοδος ισοδύναμης συγκεντρωμένης μάζας	44
---	----

6 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΝΑΝΤΙ ΕΚΡΗΞΕΩΝ 57

6.1 Προπαρασκευαστικό στάδιο	58
6.2 Σχεδιασμός χαλύβδινων στοιχείων.....	58
6.2.1 Αύξηση της αντοχής του δομικού χάλυβα.....	58
6.2.2 Υποχρεωτική ανάγκη πλαστιμότητας.....	59
6.2.3 Όρια παραμορφώσεων.....	60
6.2.4 Μέθοδος υπολογισμού	61
6.3 Σχεδιασμός στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος.....	62
6.3.1 Αύξηση της αντοχής του οπλισμένου σκυροδέματος	62
6.3.2 Υποχρεωτική ανάγκη πλαστιμότητας.....	63
6.3.3 Όρια παραμορφώσεων.....	64
6.3.4 Μέθοδος υπολογισμού	65
6.3.5 Πλάκες οπλισμένου σκυροδέματος.....	66
6.4 Σχεδιασμός σύμμικτων στοιχείων	66
6.4.1 Όρια παραμορφώσεων.....	67
6.4.2 Στατική λειτουργία σύμμικτων στοιχείων	67
6.4.3 Μέθοδος υπολογισμού	68
6.5 Σχεδιασμός τοιχοποιίας.....	68
6.6 Σχεδιασμός υαλοπινάκων	69
6.6.1 Είδη γυαλιού	69
6.6.2 Βελτιωτικά υαλοπινάκων	70
6.6.3 Πλαίσιο υαλοπινάκων	71
6.6.4 Υπολογισμός απαιτούμενων ιδιοτήτων υαλοπίνακα Triplex.....	71
6.6.5 Κατάταξη υαλοπινάκων με μονολιθικό γυαλί	74
6.7 Σχεδιασμός εξοπλισμού	75
6.7.1 Προστασία ζωής και ευκολία εκκένωσης	76
6.7.2 Άμεση χρήση.....	77
6.7.3 Απρόσκοπτη λειτουργία	77
6.8 Ολιστικός σχεδιασμός κατασκευής.....	77
6.8.1 Παγίωση εναλλακτικών δρόμων φόρτισης	78

6.8.2	Εφαρμογή γενικών κανόνων πλαστιμότητας και συνδέσεων	81
6.8.3	Σχεδιασμός μεμονωμένων χαρακτηριστικών στοιχείων.....	81
6.9	Σχεδιασμός έναντι τρομοκρατίας	82
6.9.1	Διαχείριση κινδύνου τρομοκρατίας.....	82
6.9.2	Απειλή με τη χρήση οχημάτων	82
7	ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ.....	85
7.1	Κανονισμοί και εγχειρίδια	85
7.2	Κατηγορίες προστασίας.....	90
7.3	Συνδυασμοί φόρτισης	92
7.4	Όρια παραμορφώσεων.....	93
7.5	Μεθοδολογίες σχεδιασμού.....	93
8	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ	95
8.1	Υπολογισμός φορτίων σε κτίριο	95
8.2	Σχεδιασμός χαλύβδινου μέλους	98
8.3	Σχεδιασμός τοίχου οπλισμένου σκυροδέματος	100
8.4	Σχεδιασμός σύμμικτου panel	102
9	LAMINATED ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΑΣ	105
10	ΤΥΠΙΚΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟ ΚΤΙΡΙΟ ΣΤΑΘΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	111
10.1	Γενικά στοιχεία	112
10.2	Φορτίο έκρηξης.....	118
10.3	Όρια παραμορφώσεων.....	121
10.4	Ανάλυση με χρήση της μεθόδου SDOF.....	122
10.4.1	Επικάλυψη.....	122
10.4.2	Πλαγιοκάλυψη	125
10.4.3	Τεγίδες.....	128
10.4.4	Μηκίδες.....	131
10.4.5	Υποστύλωμα πλαισίου	134
10.4.6	Δοκός πλαισίου	137
10.4.7	Χιαστί οριζόντιος σύνδεσμος.....	139
10.4.8	Χιαστί κατακόρυφος σύνδεσμος	142
10.5	Ανάλυση με τη χρήση υπολογιστικού μοντέλου	145
10.5.1	Περιγραφή μοντέλου.....	145

10.5.2Υπολογισμός φορτίων	146
10.5.3Απόκριση φορέα	152
10.6 Συγκρίσεις	153
10.6.1Τεγίδα	153
10.6.2Μηκίδα	154
10.6.3Δοκός πλαισίου.....	155
10.6.4Υποστύλωμα πλαισίου.....	156
10.6.5Οριζόντιος χιαστί σύνδεσμος	157
10.6.6Κατακόρυφος χιαστί σύνδεσμος.....	158
10.6.7Σύνοψη.....	159
10.7 Αναλύσεις επί της μηκίδας	159
11 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	165
12 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	167

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2-1. Κατηγοριοποίηση των εκρηκτικών υλών ανάλογα με τη χρήση τους.	13
Σχήμα 3-1. Διάγραμμα πίεσης – χρόνου εκρηκτικού κύματος συμπυκνωμένης φάσης (κατάρρηξη). ...	18
Σχήμα 3-2. Διάγραμμα πίεσης – χρόνου εκρηκτικού κύματος συμπυκνωμένης φάσης με γραμμικοποίηση (κατάρρηξη).	18
Σχήμα 3-3. Διάγραμμα πίεσης – χρόνου εκρηκτικού κύματος για διάφορες αποστάσεις από τον στόχο.	19
Σχήμα 3-4. Διάγραμμα πίεσης – χρόνου κύματος πίεσης νέφους αερίων (κατάκαυση).	20
Σχήμα 3-5. Ανακλώμενη υπερπίεση έναντι της προσπίπτουσας υπερπίεσης.	21
Σχήμα 3-6. Διαφορά σφαίρας και ημισφαιρίου έκρηξης.	23
Σχήμα 3-7. Παράμετροι εκρηκτικού κύματος για μορφή σφαίρας σε ελεύθερο αέρα και στο επίπεδο της θάλασσας (θετική φάση).	24
Σχήμα 3-8. Παράμετροι εκρηκτικού κύματος για μορφή ημισφαιρίου στην επιφάνεια και στο επίπεδο της θάλασσας (θετική φάση).	24
Σχήμα 3-9. Παράμετροι εκρηκτικού κύματος για μορφή σφαίρας σε ελεύθερο αέρα και στο επίπεδο της θάλασσας (αρνητική φάση).	25
Σχήμα 3-10. Παράμετροι εκρηκτικού κύματος για μορφή ημισφαιρίου στην επιφάνεια και στο επίπεδο της θάλασσας (αρνητική φάση).	26
Σχήμα 3-11. Μορφές ανάκλασης εκρηκτικού κύματος.	27
Σχήμα 3-12. Διαφοροποίηση του C_r ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης και την πίεση p_{so}	28
Σχήμα 3-13. Αναπτυσσόμενη πίεση από εκρηκτικό κύμα στα διάφορα σημεία του σώματος.	29
Σχήμα 3-14. Ταχύτητα του ήχου ανάλογα με τη μέγιστη στατική υπερπίεση.	30
Σχήμα 3-15. Προσέγγιση των ανακλάσεων για έκρηξη σε περιορισμένες συνθήκες.	31
Σχήμα 3-16. Ταξινόμηση εκρήξεων ως προς τους περιορισμούς.	32
Σχήμα 3-17. Ανακλώμενη κρουστική πίεση και πίεση αερίου σε έκρηξη με περιορισμένες συνθήκες. ...	33
Σχήμα 3-18. Διάγραμμα ανάμεσα στην πίεση p_{05} και στον λόγο W/V	33
Σχήμα 3-19. Διάγραμμα ανάμεσα στην κλιμακωτή πίεση p_1 και στην κλιμακωτή διάρκεια τ	34
Σχήμα 3-20. Διάγραμμα ανάμεσα στην κλιμακωτή ώθηση πίεσης αερίου i_g και την κλιμακωτή πίεση p_1	34
Σχήμα 5-1. Μονοβάθμιος ταλαντωτής με ελαστική συμπεριφορά.	39
Σχήμα 5-2. Τρεις καταστάσεις απόκρισης της κατασκευής σε φόρτιση από έκρηξη (οιονεί στατική – ωστική - δυναμική).	41

Σχήμα 5-3. Ασύμπτωτες τριών καταστάσεων απόκρισης.	42
Σχήμα 5-4. Διάγραμμα πίεσης - ώθησης για πρόκληση ζημιάς σε κατασκευή.....	43
Σχήμα 5-5. Διάγραμμα πίεσης – ώθησης για πρόκληση ζημιάς σε ανθρώπινο πνεύμονα [10].....	44
Σχήμα 5-6. Πλάστιμη και σχοινοειδής συμπεριφορά φορέα.	45
Σχήμα 5-7. Τυπικές συναρτήσεις αντίστασης.	46
Σχήμα 5-8. Διάγραμμα μέγιστης μετακίνησης μονοβάθμιου ελαστοπλαστικού συστήματος υπό τριγωνική φόρτιση.....	46
Σχήμα 5-9. Διάγραμμα χρόνου εμφάνισης μέγιστης μετακίνησης μονοβάθμιου ελαστοπλαστικού συστήματος υπό τριγωνική φόρτιση.	47
Σχήμα 5-10. Διάγραμμα μέγιστης μετακίνησης μονοβάθμιου ελαστοπλαστικού συστήματος υπό σταδιακά αυξανόμενη φόρτιση.....	48
Σχήμα 5-11. Διάγραμμα χρόνου εμφάνισης μέγιστης μετακίνησης μονοβάθμιου ελαστοπλαστικού συστήματος υπό σταδιακά αυξανόμενη φόρτιση.	49
Σχήμα 5-12. Διάγραμμα μέγιστης μετακίνησης μονοβάθμιου ελαστοπλαστικού συστήματος υπό ορθογωνική φόρτιση.	50
Σχήμα 5-13. Διάγραμμα χρόνου εμφάνισης μέγιστης μετακίνησης μονοβάθμιου ελαστοπλαστικού συστήματος υπό ορθογωνική φόρτιση.....	51
Σχήμα 5-14. Διάγραμμα μέγιστης μετακίνησης μονοβάθμιου ελαστοπλαστικού συστήματος υπό ισοσκελούς τριγωνική φόρτιση.	52
Σχήμα 5-15. Διάγραμμα χρόνου εμφάνισης μέγιστης μετακίνησης μονοβάθμιου ελαστοπλαστικού συστήματος υπό ισοσκελούς τριγωνική φόρτιση.....	53
Σχήμα 6-1. Στοιχεία σχεδιασμού έναντι εκρήξεων.....	57
Σχήμα 6-2. Διάγραμμα ροής υπολογισμού διατομής χάλυβα έναντι έκρηξης.	61
Σχήμα 6-3. Διάγραμμα σταθεράς ρηγματωμένης διατομής με συμμετρικό οπλισμό.....	65
Σχήμα 6-4. Διάγραμμα σταθεράς ρηγματωμένης διατομής μόνο με εφελκυσμένο οπλισμό.	65
Σχήμα 6-5. Απεικόνιση σύμμικτου panel.	67
Σχήμα 6-6. Διάγραμμα αντίστασης - μετακίνησης άοπλης τοιχοποιίας σε έκρηξη.....	68
Σχήμα 6-7. Εφαρμοζόμενες δυνάμεις σε άοπλη τοιχοποιία κατά την έκρηξη.	69
Σχήμα 6-8. Διάγραμμα ροής υπολογισμού υαλοπίνακα έναντι έκρηξης.	72
Σχήμα 6-9. Διάγραμμα αδιάστατης τάσης προς αδιάστατη φόρτιση υαλοπίνακα.....	73
Σχήμα 6-10. Διάγραμμα παραμόρφωσης/πάχους προς αδιάστατη φόρτιση υαλοπίνακα.	73
Σχήμα 6-11. Διαφοροποίηση απότομης απώλειας και σταδιακής απώλειας στύλου.	79

Σχήμα 6-12. Αύξηση τελικού φορτίου ανάλογα με τη διάρκεια φόρτισης και την ιδιοπερίοδο μονοβάθμιου ελαστικού ταλαντωτή χωρίς απόσβεση.....	79
Σχήμα 8-1. Απεικόνιση του κτιρίου του παραδείγματος σε κάτοψη και σε τρισδιάστατη όψη.	95
Σχήμα 8-2. Αποτελέσματα φόρτισης μπροστά, άνω, πλευρικά και πίσω.	97
Σχήμα 8-3. Παραμετρική ανάλυση απαιτούμενης αντοχής ανάλογα με το ύψος της εκρηκτικής ύλης και την απόσταση από το δομικό στοιχείο.....	100
Σχήμα 9-1. Απόκριση υαλοπίνακα μετά τη ρηγμάτωσή του στο λογισμικό SAP2000.....	107
Σχήμα 9-2. Καμπύλη αντίστασης υαλοπίνακα.	108
Σχήμα 9-3. Κλάδοι φόρτισης – αποφόρτισης laminated υαλοπίνακα.	108
Σχήμα 9-4. Διάγραμμα πίεσης – ώθησης του υαλοπίνακα με τις αντίστοιχες καμπύλες θραύσης και ρηγμάτωσης.....	109
Σχήμα 10-1. Τρισδιάστατη όψη του φορέα.....	111
Σχήμα 10-2. Θεμελίωση του φορέα.....	113
Σχήμα 10-3. Κάτοψη οροφής ισογείου του φορέα.....	114
Σχήμα 10-4. Κάτοψη οροφής ορόφου του φορέα.....	115
Σχήμα 10-5. Όψη της διαμήκου πλευράς του φορέα.....	116
Σχήμα 10-6. Όψη της εγκάρσιας πλευράς του φορέα.	117
Σχήμα 10-7. Χαρακτηριστικά έκρηξης 25kg στα 15m μέσω του λογισμικού BlastM.....	118
Σχήμα 10-8. Έκρηξη σε σχέση με κτίριο.	118
Σχήμα 10-9. Αποτελέσματα φόρτισης μπροστά, άνω, πλευρικά και πίσω.	121
Σχήμα 10-10. Πέτασμα χάλυβα – πολυουρεθάνης πάχους 75mm.	123
Σχήμα 10-11. Αποτελέσματα απόκρισης μονοβάθμιου ταλαντωτή επικάλυψης στο λογισμικό RCblast.	124
Σχήμα 10-12. Πέτασμα χάλυβα – πολυουρεθάνης πάχους 100mm.	125
Σχήμα 10-13. Αποτελέσματα απόκρισης μονοβάθμιου ταλαντωτή πλαγιοκάλυψης στο λογισμικό RCblast.	127
Σχήμα 10-14. Διατομή IPE140.	128
Σχήμα 10-15. Αποτελέσματα απόκρισης μονοβάθμιου ταλαντωτή τεγίδας στο λογισμικό RCblast. ...	130
Σχήμα 10-16. Διατομή UPN140.....	131
Σχήμα 10-17. Αποτελέσματα απόκρισης μονοβάθμιου ταλαντωτή μηκίδας στο λογισμικό RCblast. ...	133
Σχήμα 10-18. Διατομή HEA320.....	134
Σχήμα 10-19. Αποτελέσματα απόκρισης μονοβάθμιου ταλαντωτή στύλου στο λογισμικό RCblast. ...	136

Σχήμα 10-20. Διατομή IPE330 με ενίσχυση.	137
Σχήμα 10-21. Αποτελέσματα απόκρισης μονοβάθμιου ταλαντωτή δοκού πλαισίου στο λογισμικό RCBlas.	139
Σχήμα 10-22. Διατομή CHS76.1X5.	140
Σχήμα 10-23. Αποτελέσματα απόκρισης μονοβάθμιου ταλαντωτή οριζόντιου συνδέσμου στο λογισμικό RCBlas.	141
Σχήμα 10-24. Διατομή CHS101.6X6.3.	142
Σχήμα 10-25. Αποτελέσματα απόκρισης μονοβάθμιου ταλαντωτή κατακόρυφου συνδέσμου στο λογισμικό RCBlas.	144
Σχήμα 10-26. Τρισδιάστατη άποψη του μοντέλου.	145
Σχήμα 10-27. Αποτελέσματα απόκρισης μονοβάθμιου ταλαντωτή πλαγιοκάλυψης πίσω στο λογισμικό RCBlas.	146
Σχήμα 10-28. Αποτελέσματα απόκρισης μονοβάθμιου ταλαντωτή πλαγιοκάλυψης στο πλάι στο λογισμικό RCBlas.	147
Σχήμα 10-29. Φόρτιση στις μηκίδες της μπροστινής όψης του κτιρίου (time functions).	148
Σχήμα 10-30. Φόρτιση στις μηκίδες της μπροστινής όψης του κτιρίου (απεικόνιση).	149
Σχήμα 10-31. Φόρτιση στις μηκίδες των πλαϊνών όψεων του κτιρίου (time functions).	149
Σχήμα 10-32. Φόρτιση στις τεγίδες του κτιρίου κάθετα και όχι κατακόρυφα (time functions).	150
Σχήμα 10-33. Φόρτιση στις πλαϊνές μηκίδες και στις τεγίδες του κτιρίου (απεικόνιση).	150
Σχήμα 10-34. Φόρτιση στις πίσω μηκίδες του κτιρίου (time functions).	151
Σχήμα 10-35. Φόρτιση στις πίσω μηκίδες του κτιρίου (απεικόνιση).	152
Σχήμα 10-36. Ενδεικτική απόκριση του φορέα με μεγεθυμένες μετακινήσεις στα 50.90ms.	152
Σχήμα 10-37. Απόκριση τεγίδας σε μονοβάθμιο ταλαντωτή και σε συνολικό μοντέλο τόσο με μικρές μετακινήσεις όσο και με μεγάλες μετακινήσεις.	153
Σχήμα 10-38. Απόκριση μηκίδας σε μονοβάθμιο ταλαντωτή και σε συνολικό μοντέλο τόσο με μικρές μετακινήσεις όσο και με μεγάλες μετακινήσεις.	154
Σχήμα 10-39. Απόκριση δοκού πλαισίου σε μονοβάθμιο ταλαντωτή και σε συνολικό μοντέλο τόσο με μικρές μετακινήσεις όσο και με μεγάλες μετακινήσεις.	155
Σχήμα 10-40. Απόκριση υποστυλώματος πλαισίου σε μονοβάθμιο ταλαντωτή και σε συνολικό μοντέλο τόσο με μικρές μετακινήσεις όσο και με μεγάλες μετακινήσεις.	156
Σχήμα 10-41. Απόκριση οριζόντιων συνδέσμων σε μονοβάθμιο ταλαντωτή και σε συνολικό μοντέλο τόσο με μικρές μετακινήσεις όσο και με μεγάλες μετακινήσεις.	157
Σχήμα 10-42. Απόκριση κατακόρυφων συνδέσμων σε μονοβάθμιο ταλαντωτή και σε συνολικό μοντέλο τόσο με μικρές μετακινήσεις όσο και με μεγάλες μετακινήσεις.	158

Σχήμα 10-43. Απεικόνιση γραμμικού μέλους μηκίδας με μεγεθυμένες μετακινήσεις.....	160
Σχήμα 10-44. Απεικόνιση μηκίδας με επιφανειακά στοιχεία και με μεγεθυμένες μετακινήσεις.....	161
Σχήμα 10-45. Σύγκριση μικρών μετακινήσεων με μεγάλες μετακινήσεις.	162
Σχήμα 10-46. Σύγκριση μεθόδου κεντρικών διαφορών με μέθοδο μέσης επιτάχυνσης.	163
Σχήμα 10-47. Σύγκριση beam element με shell elements.....	164

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2-1. Βασικότερα είδη εκρηκτικών υλών και ιδιότητές τους (οι τιμές ισοδυναμίας με TNT είναι ενδεικτικές από διάφορες πηγές).....	14
Πίνακας 3-1. Σύγκριση έκρηξης συμπτυκνωμένης φάσης με έκρηξη νέφους αερίων.	20
Πίνακας 3-2. Συντελεστές σύρσεως C_D σύμφωνα με τα UFC 3-340-02.	30
Πίνακας 5-1. Στοιχεία ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή για δοκούς (*Μόνο για $M_{ps}=M_{pm}$, s support – m midspan).	54
Πίνακας 5-2. Στοιχεία ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή για πλάκες.	55
Πίνακας 6-1. Δυναμική αντοχή χαλύβδινων στοιχείων σύμφωνα με τα UFC 3-340-02.	59
Πίνακας 6-2. Όρια παραμορφώσεων για χαλύβδινα στοιχεία σύμφωνα με τα UFC 3-340-02.	60
Πίνακας 6-3. Ισοδύναμη στατική αντίσταση σύμφωνα με τα UFC 3-340-02.	61
Πίνακας 6-4. Συντελεστές DIF οπλισμένου σκυροδέματος σύμφωνα με τα UFC 3-340-02.	62
Πίνακας 6-5. Δυναμική αντοχή οπλισμένου σκυροδέματος σύμφωνα με τα UFC 3-340-02.	62
Πίνακας 6-6. Όρια παραμορφώσεων για στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος σύμφωνα με τα UFC 3-340-02.	64
Πίνακας 6-7. Όρια παραμορφώσεων για σύμμικτα στοιχεία σύμφωνα με το [11].	67
Πίνακας 6-8. Όρια παραμορφώσεων για τοιχοποιίες.	68
Πίνακας 6-9. Δυναμική αντοχή διαφόρων ειδών γυαλιού.	70
Πίνακας 7-1. Κανονισμοί εκρήξεων και περιγραφή τους,	85
Πίνακας 7-2. Κατηγορίες προστασίας σύμφωνα με τα UFC 3-340-02.	90
Πίνακας 7-3. Κατηγορίες προστασίας νέων και υφιστάμενων κτιρίων σύμφωνα με τα UFC 4-010-01.	91
Πίνακας 7-4. Συντελεστές συνδυασμού σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα.	92
Πίνακας 7-5. Συντελεστές συνδυασμού σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα.	93
Πίνακας 9-1. Απόκριση υαλοπίνακα πριν τη ρηγμάτωσή του.	106
Πίνακας 9-2. Στοιχεία του PVB.	106
Πίνακας 10-1. Όρια παραμορφώσεων σύμφωνα με το PDC-TR 06-08.	122
Πίνακας 10-2. Σύγκριση συνολικών αποτελεσμάτων.	159
Πίνακας 10-3. Είδη αναλύσεων επί της μηκίδας.	160

ΣΥΜΒΟΛΑ

A: Εμβαδόν φορτιζόμενης επιφάνειας.

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

a_0 : Ταχύτητα του ήχου στον αέρα σε πίεση p_0 .

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

δ_b : Βέλος λόγω κάμψης.

δ_s : Βέλος λόγω διάτμησης.

μ : Διαθέσιμη πλαστιμότητα.

ρ : Πυκνότητα ρευστού.

ρ_i : Ποσοστό οπλισμού.

σ : Τάση.

τ : Διατμητική τάση.

$\psi_{1,1}, \psi_{2,1}, \psi_{2,i}$: Συντελεστές συνδυασμού των μεταβλητών δράσεων.

ω : Ιδιοσυχνότητα.

a : Διάσταση.

A_s : Συνολική επιφάνεια εσωτερικά τοίχων και οροφών.

A_v : Διατμητική επιφάνεια.

b : Παράμετρος σχήματος του κύματος | Διάσταση.

B : Πλάτος σώματος.

c : Διορθωτικός συντελεστής.

C_D : Συντελεστής σύρσεως.

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

C_p : Θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση.

C_r : Σταθερά ανάκλασης | Ταχύτητα του ήχου.

C_v : Θερμοχωρητικότητα υπό σταθερό όγκο.

C_v : Σταθερά ανάκλασης.

d : Διάμετρος εκρηκτικού φορτίου | Διάσταση.

D : Δυσκαμψία.

DIF : Δυναμικός συντελεστής αύξησης.

e : Εσωτερική ενέργεια ανά μονάδα μάζας.

E : Συνολική ενέργεια ανά μονάδα μάζας | Μέτρο ελαστικότητας.

E_c : Μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος.

E_s : Μέτρο ελαστικότητας χάλυβα.

f : Δύναμη ανά μονάδα μάζας.

f_a : Θλιπτική αντοχή τοιχοποιίας.

f_y : Αντοχή διαρροής.

$f_{y,dyn}$: Δυναμική αντοχή διαρροής.

$f_{y,dyn}$: Δυναμική αντοχή διαρροής σχεδιασμού.

f_u : Αντοχή θραύσης.

$f_{u,dyn}$: Δυναμική αντοχή θραύσης.

F : Δύναμη | Σταθερά.

F_D : Δύναμη σύρσεως.

G : Διάσταση.

G' : Ενεργή δυσμησία.

$G_{k,j}$: Χαρακτηριστική τιμή μονίμων δράσεων.

h : Πάχος δομικού στοιχείου.

H : Ύψος σώματος | Ενθαλπία.

i_a : Ανακλώμενη ώθηση υπό γωνία α .

i_g : Ώθηση πίεσης αερίου.

i_r : Ανακλώμενη ώθηση.

i_s : Ώθηση.

i_s' : Ώθηση αρνητικής φάσης.

I: Ροπή αδράνειας.
I_b: Ονομαστική ροπή αδράνειας.
I_{eff}: Ενεργός ροπή αδράνειας.
I_{γγ}: Ροπή αδράνειας ως προς γ-γ.
k: Θερμική αγωγιμότητα | Σταθερά.
k: Δυσκαμψία
k_e: Ισοδύναμη δυσκαμψία.
K: Κινητική ενέργεια | Σταθερά.
K': Σταθερά (= 5.6 για στάθμη βλάβης B).
K_L: Συντελεστής ισοδυναμίας φορτίου.
K_{LM}: Συντελεστής μετασχηματισμού φορτίου – μάζας.
K_M: Συντελεστής ισοδυναμίας μάζας.
K_S: Συντελεστής ισοδυναμίας στιβαρότητας.
L: Διάσταση.
L_{ND}: Αδιάσταση φόρτιση.
L_w: Μήκος εκρηκτικού κύματος.
M: Μάζα.
M_{Rd}: Ροπή αντοχής.
p: Πίεση.
P_a: Ενεργός πίεση πλευρικά και άνω.
p_{max}: Μέγιστη πίεση.
p_o: Πίεση σε συνθήκες περιβάλλοντος.
p_{qs}: Μέγιστη οιονεί στατική πίεση.
p_r: Μέγιστη ανακλώμενη υπερπίεση.
p_s: Προσπίπτουσα υπερπίεση.
p_{so}: Μέγιστη προσπίπτουσα υπερπίεση.
p_{stag}: Στάσιμη πίεση.
P: Δύναμη | Χαρακτηριστική τιμή προέντασης.
q_H: Θερμική ενέργεια.
q_s: Μέγιστη δυναμική υπερπίεση.
Q_{k,1}: Χαρακτηριστική τιμή επικρατέστερης μεταβλητής δράσης.
Q_{k,i}: Χαρακτηριστική τιμή των υπολοίπων μεταβλητών δράσεων που συνυπάρχουν.
r: Αντίσταση.
R: Μελετώμενη ακτίνα | Αντίσταση.
R_m: Μέγιστη αντίσταση.
S: Μεταβατική απόσταση.
S_{ND}: Αδιάστατη τάση.
SIF: Συντελεστής αύξησης αντοχής.
t: Χρόνος | Πάχος.
T: Ιδιοπερίοδος | Θερμοκρασία.
t': Χρόνος στον οποίο έχει ολοκληρωθεί η μετάβαση.
t_a: Χρόνος άφιξης εκρηκτικού κύματος.
t_c: Χρόνος μετάβασης.
t_d: Διάρκεια θετικής φάσης γραμμικοποιημένα.
t_m: Χρόνος εμφάνισης x_{max}.
t_{max}: Μέγιστος χρόνος.
t_o: Διάρκεια θετικής φάσης μη γραμμικοποιημένα.
t_r: Χρόνος αντήχησης.
u: Ταχύτητα.
U: Ενέργεια παραμορφώσεων.
U_s: Ταχύτητα μετώπου.
v_s: Διατμητική τάση.
V: Όγκος χώρου | Αντιδράσεις στήριξης.
V_s: Τέμνουσα δύναμη.
V_{Ed}: Δρώσα τέμνουσα.
V_{Rd}: Αντοχή σε τέμνουσα.

W: Εκρηκτικό φορτίο εκφρασμένο σε ισοδύναμα κιλά TNT | Βάρος.
W_{ext}: Εξωτερικό έργο.
W_{ply}: Πλαστική ροπή αντίστασης ως προς γ-γ.
x: Απόσταση.
ẋ: Ταχύτητα.
ẋ₀: Αρχική ταχύτητα.
ẍ: Επιτάχυνση.
x_{max}: Μέγιστη δυναμική μετακίνηση.
x_{st}: Μετακίνηση που θα προέκυπτε αν η δύναμη F ήταν στατικό φορτίο.
X_E: Ισοδύναμη ελαστική παραμόρφωση.
X_m: Μέγιστη παραμόρφωση.
z: Μοχλοβραχίονας.
Z: Κλιμακωτή απόσταση.

ΜΕΤΑΦΡΑΣΗ ΟΡΩΝ

Καθίσταται σκόπιμη η μετάφραση των βασικότερων εκ των τεχνικών όρων του παρόντος κειμένου, έτσι ώστε ο αναγνώστης να μπορεί ανά πάσα στιγμή να ανατρέξει στη διεθνή βιβλιογραφία με ευκολία.

Ανάφλεξη: Ignition
Ανάφλεξη νέφους αερίων: Flash fire
Αντήχηση: Reverberation
Αντίσταση στο νερό: Water resistance
Απόσταση από στόχο: Stand-off distance
Αυτοσχέδιος μηχανισμός: Improvised explosive device (IED)
Αυτοσχέδιος μηχανισμός με όχημα: Vehicle – borne improvised explosive device (VBIED)
Δευτερογενή εκρηκτικά: Secondary explosives
Γλώσσα φωτιάς: Flame jet
Γόμωση: Charge
Διάτρημα: Bore
Διαρρηκτική ικανότητα / Θραυστικότητα: Brisance
Δύναμη σύρσεως: Drag force
Δυναμική πίεση: Dynamic pressure
Δυναμικός: Dynamic
Δυσαναλογική κατάρρευση: Disproportionate collapse
Εκκένωση: Evacuation
Εκπυροσκορητής: Detonator
Εκρηκτική ύλη: Explosive
Εκρηκτική ύλη υψηλής ισχύος ή υψηλής διαρρηκτικότητας: High explosive
Εκρηκτική ύλη περιορισμένης ισχύος ή χαμηλής διαρρηκτικότητας: Low explosive
Εκρηκτικό κύμα: Blast wave
Έκρηξη: Explosion
Έκρηξη με ελεύθερες συνθήκες: Unconfined / Vented explosion
Έκρηξη με περιορισμένες συνθήκες: Confined / Unvented explosion
Έκρηξη συμπυκνωμένης φάσης: Condensed phase explosion
Έκρηξη νέφους αερίου: Vapour cloud explosion
Εναλλακτικοί δρόμοι φόρτισης: Alternate load paths
Έναυση: Initiation
Ενισχυτής: Booster
Εξαερισμός: Venting
Ευαισθητοποιητής: Phlegmatizer
Θραυαλλίδα: Cord
Θρύμματα: Fragments
Θρυμματισμός: Fragmentation
Ισχύς: Strength
Κατάκαυση: Deflagration
Κατάρρηξη: Detonation
Καύση: Combustion
Καψύλλι: Capsule
Κρουστικό κύμα: Shock wave
Κύμα πίεσης: Pressure wave
Μέγιστη στατική υπερπίεση: Peak static overpressure
Μη γραμμική στατική ανάλυση: Non-linear static analysis
Μη γραμμική δυναμική ανάλυση: Non-linear dynamic analysis
Νέφος ρευστού: Fuel vapour
Οξειδωτικό: Oxidant
Οιονεί στατική: Quasistatic
Περίθλαση: Diffraction
Πίεση έκρηξης: Detonation pressure

Πλωτό γυαλί: Floating glass
Προοδευτική κατάρρευση: Progressive collapse
Πρόσοψη: Façade
Προσπίπτουσα πίεση: Incident pressure
Προστατευόμενος χώρος: Protected space
Πρωθητικό υλικό: Propellant
Πρωτογενή εκρηκτικά: Primary explosives
Πυκνότητα γόμωσης: Blasting density
Πύρινη σφαίρα: Fireball
Πυροδότηση: Initiation
Πυρομαχικό: Munition
Σπιτική εκρηκτική ύλη: Home-made explosive (HME)
Σχοινοειδής δράση: Catenary action
Ταχύτητα έκρηξης: Velocity of detonation
Υαλοπίνακας: Glazing
Υπερπίεση: Overpressure
Φόρτιση πίεσης αερίου: Gas pressure loading
Φωτιά λίμνης: Pool fire
Ώθηση: Impulse
Ωστικός: Impulsive

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 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, αν και πρόκειται για ένα ενδεχόμενο απευφεκτό, 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 μονίμως στα Top Ten των αναπτυγμένων χωρών.

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

Εικόνα 1-1: Ταξινόμηση τρομοκρατικών επιθέσεων διεθνώς [Πηγή: 66].

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 πετρελαικές 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 Σημαινόντα παραδείγματα τρομοκρατικών επιθέσεων

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

1. Βομβαρδισμός των **Yazidi** στις Kahtaniya and Jazeera του Ιράκ.



Εικόνα 1-2: Κατάρρευση πολυκατοικιών των Yazidi [Πηγή: onlinearchive].

Ημερομηνία:	14-08-2007
Ανθρώπινες ζωές:	520 Νεκροί και 1500 τραυματίες
Εκρηκτική ύλη:	2000kg Ισοδυναμίας TNT άγνωστου είδους
Πληροφορίες:	Χρήση αυτοσχέδιων μηχανισμών με όχημα

2. Βομβαρδισμός στη **Βομβάη** της Ινδίας.



Εικόνα 1-3: Ζημιά σε πολυκατοικίες στη Βομβάη [Πηγή: indiatoday].

Ημερομηνία: 12-03-1993
Ανθρώπινες ζωές: 257 Νεκροί και 717 τραυματίες
Εκρηκτική ύλη: 3329kg RDX
Πληροφορίες: Χρήση αυτοσχέδιων μηχανισμών με όχημα.

3. Βομβαρδισμός στο **Nairobi** της Κένυας.



Εικόνα 1-4: Κατάρρευση πέριξ της αμερικάνικης πρεσβείας της Κένυας [Πηγή: CNN].

Ημερομηνία: 07-08-1997
Ανθρώπινες ζωές: 213 Νεκροί και 4000 τραυματίες
Εκρηκτική ύλη: 3000~17000kg Ισοδυναμίας TNT άγνωστου είδους
Πληροφορίες: Χρήση αυτοσχέδιων μηχανισμών με όχημα.

4. Βομβαρδισμός στο **Beirut** του Λιβάνου.



Εικόνα 1-5: Κατάρρευση κτιρίου στο Beirut του Λιβάνου [Πηγή: Huffingtonpost].

Ημερομηνία: 23-10-1983
Ανθρώπινες ζωές: 305 Νεκροί και 75 τραυματίες
Εκρηκτική ύλη: 9525kg Ισοδυναμίας TNT άγνωστου είδους
Πληροφορίες: Χρήση αυτοσχέδιων μηχανισμών με όχημα.

5. Βομβαρδισμός στη **Βαγδάτη** του Ιράκ.



Εικόνα 1-6: Ολική ζημιά σε εμπορικό κέντρο της Βαγδάτης [Πηγή: Huffingtonpost].

Ημερομηνία: 03-07-2016
Ανθρώπινες ζωές: 341 Νεκροί και 216 τραυματίες
Εκρηκτική ύλη: (-)
Πληροφορίες: Χρήση αυτοσχέδιων μηχανισμών με όχημα.

6. Βομβαρδισμός στην **Kuta** του Μπαλί.



Εικόνα 1-7: Εκτενείς ζημιές σε νυχτερινό μαγαζί στην Kuta του Μπαλί [Πηγή: newscom].

Ημερομηνία: 12-10-2002
 Ανθρώπινες ζωές: 202 Νεκροί και 209 τραυματίες
 Εκρηκτική ύλη: 1020kg Μίγματος χλωρικού καλίου με σκόνη αργιλίου και θείο
 Πληροφορίες: Χρήση αυτοσχέδιου μηχανισμού με όχημα και βομβιστή αυτοκτονίας

7. Βομβαρδισμός στην **Sadr** του Ιράκ.



Εικόνα 1-8: Κατάρρευση κτιρίων στην Sadr του Ιράκ [Πηγή: gettyimages].

Ημερομηνία: 23-11-2006
 Ανθρώπινες ζωές: 202 Νεκροί και 260 τραυματίες
 Εκρηκτική ύλη: 1000kg TNT
 Πληροφορίες: Χρήση αυτοσχέδιου μηχανισμού με όχημα.

8. Βομβαρδισμός στην **Oclahoma** των Η.Π.Α.



Εικόνα 1-9: Κατάρρευση του Alfred P. Murrah Federal Building [Πηγή: aol].

Ημερομηνία: 19-04-1995
Ανθρώπινες ζωές: 169 Νεκροί και 675 τραυματίες
Εκρηκτική ύλη: 3200kg Νιτρικού αμμωνίου, νιτρομεθανίου και Tonex
Πληροφορίες: Χρήση αυτοσχέδιου μηχανισμού με όχημα.

9. Βομβαρδισμός της **Εκκλησίας St. Nedelya** στη Σόφια Βουλγαρίας.



Εικόνα 1-10: Κατάρρευση του τρούλου της Εκκλησίας St. Nedelya [Πηγή: pravoslaviето].

Ημερομηνία: 16-04-1925
Ανθρώπινες ζωές: 150 Νεκροί και 500 τραυματίες
Εκρηκτική ύλη: 25kg Ισοδυναμίας TNT άγνωστου είδους
Πληροφορίες: Τα εκρηκτικά τοποθετήθηκαν σε στυλό που στήριζε τον τρούλο της εκκλησίας ο οποίος μετέπειτα κατέρρευσε.

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.
- 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.

1.3 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: Ποσοτικοποιείται η έκρηξη ως φορτίο επί της κατασκευής.

5^ο Κεφάλαιο: Διαπιστώνεται η απόκριση μιας κατασκευής σε φορτίο έκρηξης.

6^ο Κεφάλαιο: Δίνεται έμφαση στον σχεδιασμό μιας κατασκευής έναντι έκρηξης ανάλογα με το χρησιμοποιηθέν υλικό.

7^ο Κεφάλαιο: Συνοψίζονται οι βασικότερες κανονιστικές διατάξεις γύρω από την έκρηξη και συλλέγονται βασικά στοιχεία εξ αυτών.

8^ο Κεφάλαιο: Δείχνονται παραδείγματα σχεδιασμού ποικίλης ύλης.

9^ο Κεφάλαιο: Γίνεται ανάλυση της απόκρισης τυπικού laminated υαλοπίνακα σε έκρηξη.

10^ο Κεφάλαιο: Εκτελούνται πολλαπλές χρονικές αναλύσεις επί τυπικού μεταλλικού κτιρίου σταθμού παραγωγής ενέργειας το οποίο υπόκειται σε έκρηξη.

11^ο Κεφάλαιο: Δίνονται περιληπτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν μέσα από την εργασία μετά τη μελέτη του αντικειμένου της έκρηξης στα κτίρια.

Βιβλιογραφία: Συμπεριλαμβάνονται όλες οι πηγές της εργασίας.

2 ΕΚΡΗΚΤΙΚΕΣ ΥΛΕΣ

2.1 Κατηγοριοποίηση εκρήξεων

Για την καλύτερη κατανόηση του αντικειμένου των εκρήξεων είναι αρχικά απαραίτητη η κατηγοριοποίησή τους, έτσι ώστε να καταστεί ευχερέστερη η διάκρισή τους εν συνεχεία. Γενικά, διάφορα είδη κατηγοριοποίησης των εκρήξεων δύναται να εφαρμοστούν αλλά η βασικότερη κατηγοριοποίησή τους είναι η εξής:

- 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 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 οξειδωση (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.

2.2.1 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 - Confined VOD).
- Έκρηξη με ελεύθερες συνθήκες (Du - Unconfined VOD).
- Ιδανική έκρηξη (D – Ideal VOD).

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.

2.2.2 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.

2.2.3 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.

Έτσι, συνήθως πολλαπλασιάζεται η μάζα της εκρηκτικής ύλης με έναν συντελεστή ισοδυναμίας που βασίζεται στην ειδική ενέργεια της εκρηκτικής ύλης και του TNT. Συντελεστής μετατροπής μεγαλύτερος της μονάδας δείχνει ότι η ειδική ενέργεια της εκρηκτικής ύλης είναι μεγαλύτερη αυτής του TNT.

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.

2.2.4 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 πλημμελής 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 (fume classes/ratings).

2.2.5 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 εκρήγνυνται επιτυχώς αν εκτεθούν για μικρό χρονικό διάστημα ενώ υπάρχουν εκρηκτικές ύλες με εξαιρετική αντίσταση στο νερό όταν εκρήγνυνται 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 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 συμπυκνωμένης 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 - Υποχητική 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.

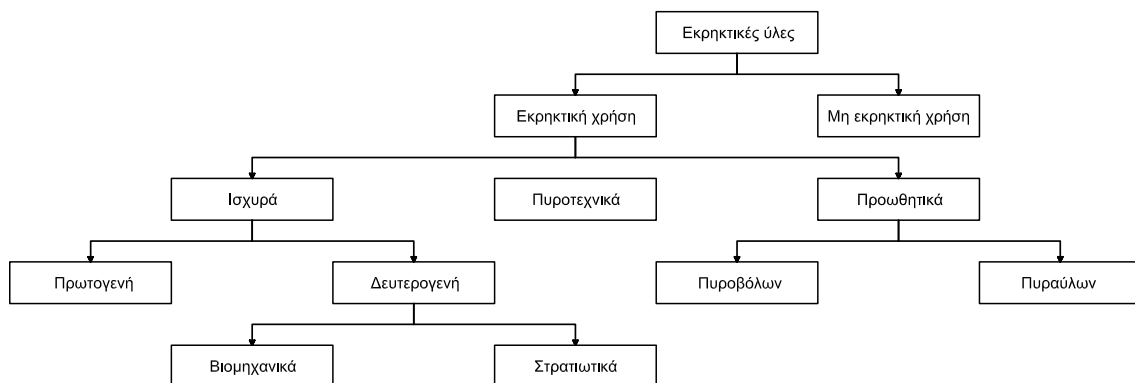
Επιπλέον, ένας θεμελιώδης τρόπος διαχωρισμού των εκρηκτικών υλών είναι μέσα από τη σύστασή τους. Υπό αυτήν την οπτική, είναι διαφορετική η σύσταση των εκρηκτικών υλών ανάλογα με το αν είναι χημικές ουσίες (όπως η γλυκερίνη) ή αν αποτελούν μίξη χημικών στοιχείων (όπως ο δυναμίτης). Ο συγκεκριμένος τρόπος 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 εκपुरσοκροτητή και μια χαμηλής ευαισθησίας εκρηκτικής ύλης, με την πυροδότησή τους αρχικά από τον εκपुरσοκροτητή και την εν συνεχεία εκपुरσοκρότηση 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.



Σχήμα 2-1. Κατηγοριοποίηση των εκρηκτικών υλών ανάλογα με τη χρήση τους.

2.4 Εξερευνημένες εκρηκτικές ύλες

Παρουσιάζεται ένας κατάλογος με τις βασικές εκρηκτικές ύλες που έχουν εξερευνηθεί:

Πίνακας 2-1. Βασικότερα είδη εκρηκτικών υλών και ιδιότητές τους (οι τιμές ισοδυναμίας με TNT είναι ενδεικτικές από διάφορες πηγές).

Αγγλική ονομασία	Ελληνική ονομασία	Συντομογραφία	Χημική σύνθεση	Ισοδυναμία TNT
Aluminium powder	Σκόνη αργιλίου	Al	Al	(-)
(Βελτιωτικό) Όχι εκρηκτικό. Με επικουρικό ρόλο για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών των εκρηκτικών με τα οποία αναμιγνύεται.				
Amatol	(-)	(-)	Μίγμα	0.91
(Δευτερογενές) Μίγμα AN/TNT σε συνθέσεις όπως 75/25, 70/30.				
Ammonium nitrate	Νιτρικό αμμώνιο	AN	NH ₄ NO ₃	0.42
(Δευτερογενές) Αξιοποίηση από είδος λιπάσματος και προωθητικό πυραύλων μέχρι σε τρομοκρατικές επιθέσεις.				
Ammonium nitrate fuel oil	Πετρελαιοαμμωνίτης	ANFO	Μίγμα	0.74
(Δευτερογενές)				
Ballistite	Βαλιστίτης	(-)	Μίγμα	1.60
(Προωθητικό) Μίγμα NG, NC, βενζόλιου και camphor.				
Blackpowder	Μαύρη πυρίτιδα	(-)	Μίγμα	0.55
Η πρώτη εκρηκτική ύλη που έχει εμφανιστεί.				
Composition B	(-)	Comp B	Μίγμα	1.33
(Δευτερογενές στρατιωτικό Προωθητικό) Μίγμα RDX (59.5%), TNT (39.4%) και κεριού (1.0%).				
Composition C-3	(-)	C-3	Μίγμα	1.33
(Δευτερογενές) Μίγμα με βασικό συστατικό το RDX.				
Composition C-4	(-)	C-4 PE-4	Μίγμα	1.34
(Δευτερογενές) Μίγμα με βασικό συστατικό το RDX.				
Cyclotol	(-)	(-)	Μίγμα	(-)
(Δευτερογενές στρατιωτικό) Εμφανίζεται σε διάφορες μίξεις, όπως 75/25 70/30 60/40, λόγους RDX/TNT.				
Diaminodinitro ethylen	Διαμινοδινιτρο αιθυλένιο	FOX-7 DADNE	C ₂ H ₄ N ₄ O ₄	1.60
(Δευτερογενές) Υψηλή απόδοση και περιορισμένη ευαισθησία.				
Diaminodinitro pyrazineoxide	(-)	LLM-105	C ₄ H ₄ N ₆ O ₅	(-)
(Δευτερογενές) Υψηλές επιδόσεις με θερμική σταθερότητα, περιορισμένη ευαισθησία σε κρούση, σπινθήρες, τριβή και κρουστικά κύματα.				
Dinitroanisole	(-)	DNAN	C ₇ H ₆ N ₂ O ₅	(-)
(Δευτερογενές στρατιωτικό) Με περιορισμένες δυνατότητες σε σύγκριση με τα υπόλοιπα εκρηκτικά αλλά σε αφθονία όταν χρειάζεται.				
Dynamite	Δυναμίτιδα	(-)	Μίγμα	(-)
(Δευτερογενές) Μίγμα NG, NC.				
Guanylurea dinitramide	(-)	FOX-12 GUDN	C ₂ H ₆ N ₄ O·HN ₃ O ₄	(-)
(Δευτερογενές στρατιωτικό) Εξαιρετική σταθερότητα και περιορισμένη ευαισθησία. Σε χρήση σε βόμβες, τεθωρακισμένα κ.α.				
Hexanitrohexaazai sowurtzitane	Εξανιτροεξααζαϊ σοβουρτσιτάνιο	HNIW CL-20	C ₆ N ₁₂ H ₆ O ₁₂	1.80
(Προωθητικό πυραύλων) Εξαιρετική πίεση έκρηξης.				

Αγγλική ονομασία	Ελληνική ονομασία	Συντομογραφία	Χημική σύνθεση	Ισοδυναμία TNT
Hexanitrostilbene	Εξανιτροστιλβένιο	HNS	$C_{14}H_6N_6O_{12}$	1.05
(Ενισχυτής Προωθητικό πυραύλων) Εξαιρετικά ευαίσθητο σε ηλεκτρικούς σπινθήρες και με υψηλή θερμική αντίσταση.				
Hexogen Cyclonite	Κυκλωνίτης	RDX	$C_3H_6N_6O_6$	1.60
(Δευτερογενές στρατιωτικό) Σταθερό με περιορισμένη ευαισθησία και υψηλό εκρηκτικό φορτίο. Αξιοποίηση σε PBX και όχι σε καθαρή μορφή λόγω αστάθειας.				
Lead azide	Αζίδιο του μολύβδου	LA	$Pb(N_3)_2$	0.34
(Πρωτογενές) Μεγάλη ευαισθησία σε τριβή και λιγότερη ευαισθησία σε κρούση, εξ ου και η μίξη με άλλες εκρηκτικές ύλες. Ασταθές σε υγρασία, οξειδωτικούς παράγοντες και αμμωνία. Σε ευρεία χρήση.				
Lead styphnate	Στυφνικός μολυβδος	LS	$C_6HN_3O_8Pb$	0.42
(Πρωτογενές) Εύκολη ανάφλεξη με φλόγα ή ηλεκτρικό σπινθήρα. Πιθανότητα ατυχήματος σε ηλεκτροστατική εκφόρτιση. Σε ευρεία χρήση με μίξη με άλλες εκρηκτικές ύλες ή σε καψύλλια.				
Mercury fulminate	Κροτικός υδράργυρος	MF	$C_2N_2O_2Hg$	0.51
(Πρωτογενές) Ευαισθησία σε κρούση, τριβή, ηλιακό φως, σπίθες, φλόγα. Πλέον σε περιορισμένη χρήση.				
Nitrocellulose Guncotton	Νιτροκυτταρίνη	NC	$C_6H_9(NO_2)_5$ $C_6H_8(NO_2)_2O_5$ $C_6H_7(NO_2)_3O_5$	1.10
(Δευτερογενές βιομηχανικό Προωθητικό) Ευαίσθητο σε κρούση και αδρανοποιείται στο νερό. Σε ευρεία χρήση.				
Nitroglycerin	Νιτρογλυκερίνη	NG	$C_3H_5N_3O_9$	1.54
(Δευτερογενές βιομηχανικό Προωθητικό πυραύλων) Εξαιρετικά ευαίσθητο σε κρούση. Σε ευρεία εμπορική χρήση.				
Nitroguanidine Picrite	Πικρίτης	NQ	$CH_4N_4O_2$	1.70
(Δευτερογενές Προωθητικό) Σταθερό εκρηκτικό με μεγάλη ταχύτητα έκρηξης.				
Nitromethane	Νιτρομεθάνιο	(-)	CH_3NO_2	1.10
(Δευτερογενές βιομηχανικό)				
Nitrotriazolone	(-)	NTO	$C_2H_2N_4O_3$	1.60
(Προωθητικό) Μεγάλη σταθερότητα και περιορισμένη ευαισθησία.				
Octogen	Οκτωγένιο	HMX	$C_4H_8N_8O_8$	1.70
(Δευτερογενές στρατιωτικό Προωθητικό πυραύλων) Σταθερό με υψηλό εκρηκτικό φορτίο.				
Octol			Μίγμα	1.54
(Δευτερογενές στρατιωτικό) Μίγμα HMX/TNT σε συνθέσεις όπως 75/25, 70/30.				
Pentaerythritol tetranitrate	Πενθρίτης	PETN	$C_5H_8N_4O_{12}$	1.66
(Δευτερογενές βιομηχανικό Ενισχυτής) Ελάχιστη ευαισθησία σε τριβή αλλά εξαιρετική ευαισθησία μετά την κατάρρευση του πρωτογενούς εκρηκτικού. Αξιοποίηση σε PBX και όχι σε καθαρή μορφή λόγω αστάθειας. Σε χρήση σε καψύλλια, θρυαλλίδες και ως ενισχυτής.				
Pentolite	Πεντολίτης	(-)	Μόγμα	1.33
(Δευτερογενές) Μίγμα PETN και TNT.				
Picric acid	Πικρικό οξύ	TNP	$C_6H_3N_3O_7$	1.20
(Δευτερογενές στρατιωτικό) Εξαιρετικά ισχυρό και τοξικό.				
Polymer-bonded explosive	(-)	PBX	(-)	(-)
Εκρηκτικά συνδεδεμένα με πολυμερή σε συνδυασμό με πλαστικοποιητές για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών τους και ιδιαίτερος τον περιορισμό της ευαισθησίας τους.				
Semtex	(-)	(-)	Μίγμα	1.35
(Δευτερογενές) Μίγμα PETN, RDX, binder styrene-butadiene, plasticizer n-octyl phthalate, tributyl citrate, antioxidant N-phenyl-2-naphthylamine, Dye.				

Αγγλική ονομασία	Ελληνική ονομασία	Συντομογραφία	Χημική σύνθεση	Ισοδυναμία TNT
Silver azide	Αζίδιο του αργύρου	SA	AgN ₃	0.30-1.40
(Πρωτογενές) Ικανός πυροδοτητής με αντίστοιχες ιδιότητες με αυτές του αζιδίου του μολύβδου.				
Tetrazene	(-)	TETR	C ₂ H ₆ N ₁₀ ·H ₂ O	(-)
(Πρωτογενές) Οι ιδιότητες κατάρρηξης του εξαρτώνται από το βαθμό συμπύκνωσής του. Σε χρήση σε καψύλλια.				
Tetryl	Τετρύλη	(-)	C ₇ H ₅ N ₅ O ₈	1.25
(Ενισχυτής) Μέτρια ευαισθησία σε τριβή και κρούση.				
Tetrytol	(-)	(-)	Μίγμα	1.20
(Δευτερογενές στρατιωτικό) Μίγμα τετρύλης και TNT σε συνθέσεις όπως 75/25.				
Torpex	(-)	(-)	Μίγμα	1.30
(Δευτερογενές στρατιωτικό) Μίγμα RDX/TNT/Al σε σύνθεση 42/40/18.				
Triaminotrinitro benzene	Τριαμινοτρινιτρο βενζόλιο	TATB	C ₆ H ₆ N ₆ O ₆	1.17
(Δευτερογενές στρατιωτικό) Εξαιρετικά περιορισμένη ευαισθησία με υψηλή θερμική αντίσταση και υψηλό εκρηκτικό φορτίο.				
Trinitrotoluene	Τρινιτροτολουόλιο	TNT	C ₇ H ₅ N ₃ O ₆	1.00
(Δευτερογενές) Περιορισμένη ευαισθησία αλλά υψηλό εκρηκτικό φορτίο και ελάχιστα ασταθές. Το πλέον σημαντικό εκρηκτικό με μεγάλη ασφάλεια χειρισμού του. Αξιοποίηση είτε αυτούσιου είτε σε μίξη με άλλες εκρηκτικές ύλες. Μεγαλύτερο μειονέκτημα η εξιδρωσή του με πιθανότητα ατυχούς ανάφλεξης. Σε ευρεία χρήση.				
Trinitroazetidín	Τρινιτροαζετιδίνη	TNAZ	C ₃ H ₄ N ₄ O ₆	1.70
Υψηλό εκρηκτικό φορτίο και περιορισμένη ευαισθησία.				
Tritonal	(-)	(-)	Μίγμα	1.05
(Δευτερογενές στρατιωτικό) Μίγμα Al/TNT σε συνθέσεις όπως 20/80, 40/60.				

3 ΦΥΣΙΚΗ ΤΩΝ ΕΚΡΗΞΕΩΝ

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

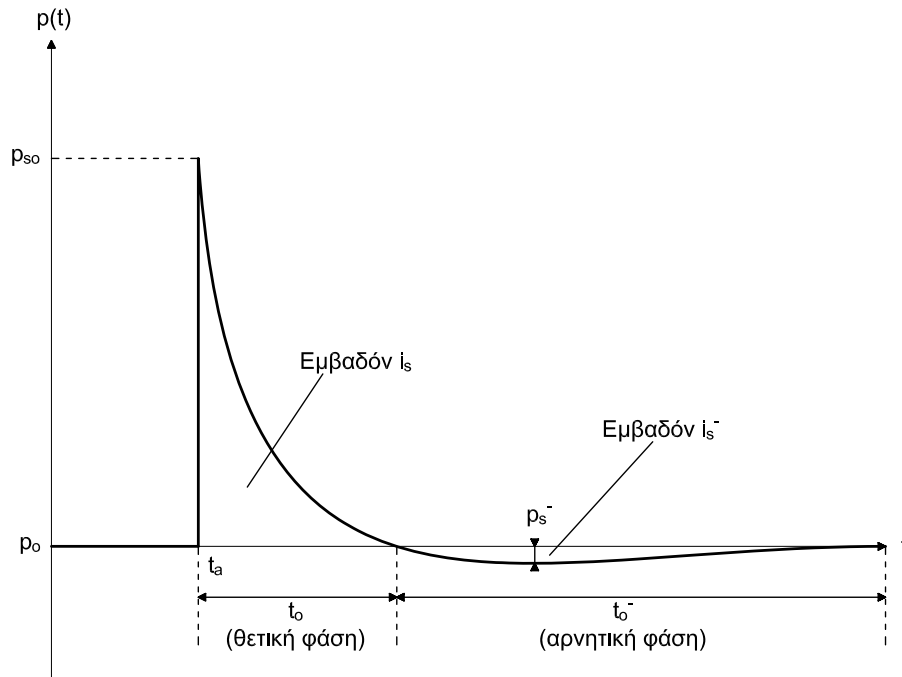
3.1 Έκρηξη συμπυκνωμένης φάσης

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 των 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 περίξ 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 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.

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

$$p(t) = p_s \cdot \left[1 - \frac{t}{t_0} \right] \cdot \exp \left\{ -\frac{b \cdot t}{t_0} \right\} \quad (3-1)$$

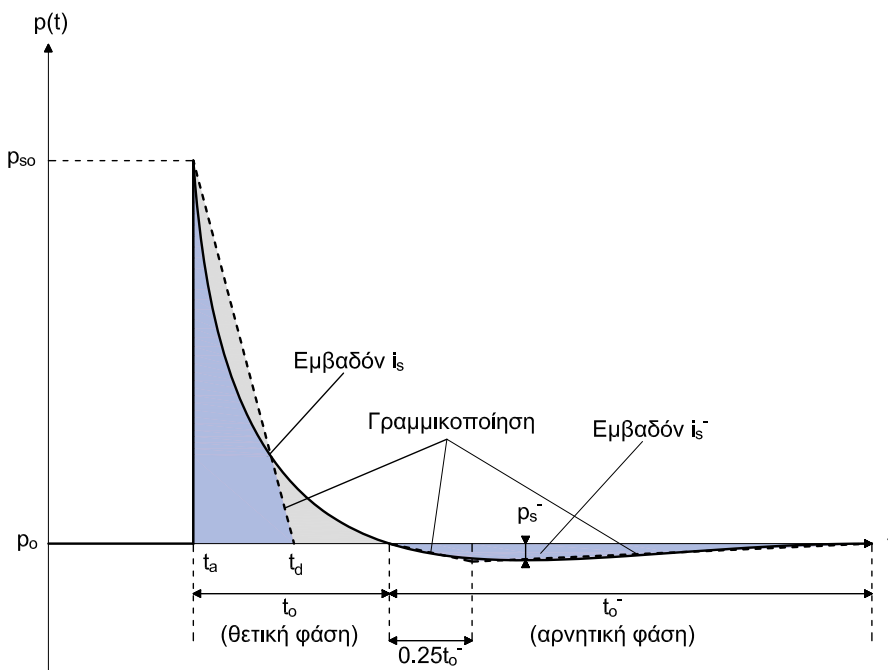
b: Παράμετρος σχήματος του κύματος



Σχήμα 3-1. Διάγραμμα πίεσης – χρόνου εκρηκτικού κύματος συμπυκνωμένης φάσης (κατάρρηξη).

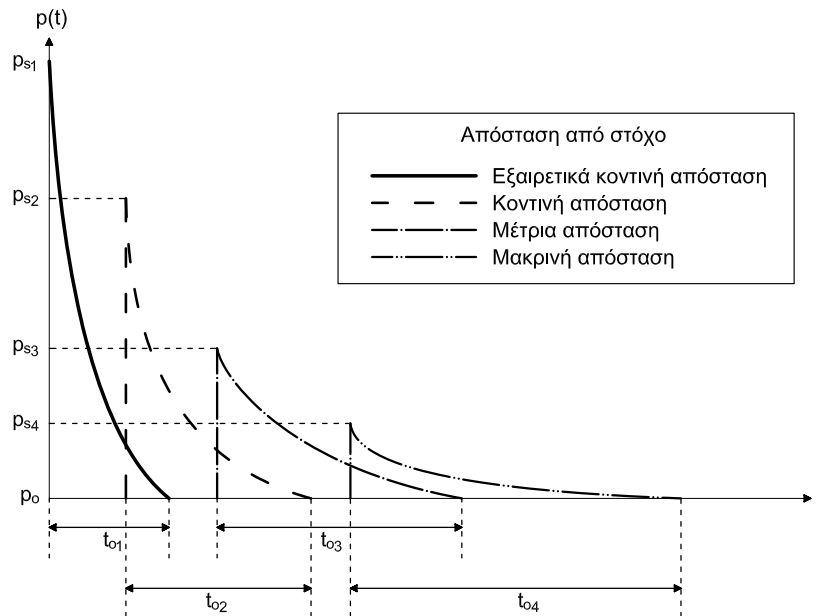
Παρά ταύτα, πολλές φορές γίνεται για λόγους ευχρησίας γραμμικοποίηση της σχέσης καθιστώντας τη διάρκεια πλέον της θετικής φάσης ως t_d . Η γραμμικοποίηση προκύπτει από τη διατήρηση της ίδιας ώθησης, δηλαδή του ίδιου εμβαδού της θετικής φάσης. Άρα:

$$t_d = \frac{2 \cdot i_s}{p_s} \tag{3-2}$$



Σχήμα 3-2. Διάγραμμα πίεσης – χρόνου εκρηκτικού κύματος συμπυκνωμένης φάσης με γραμμικοποίηση (κατάρρηξη).

Σημαντικό ρόλο παίζει, επίσης, η απόσταση από τον στόχο (Stand-off distance) η οποία καθορίζει σημαντικά το φορτίο που δέχεται η υπόψιν κατασκευή.

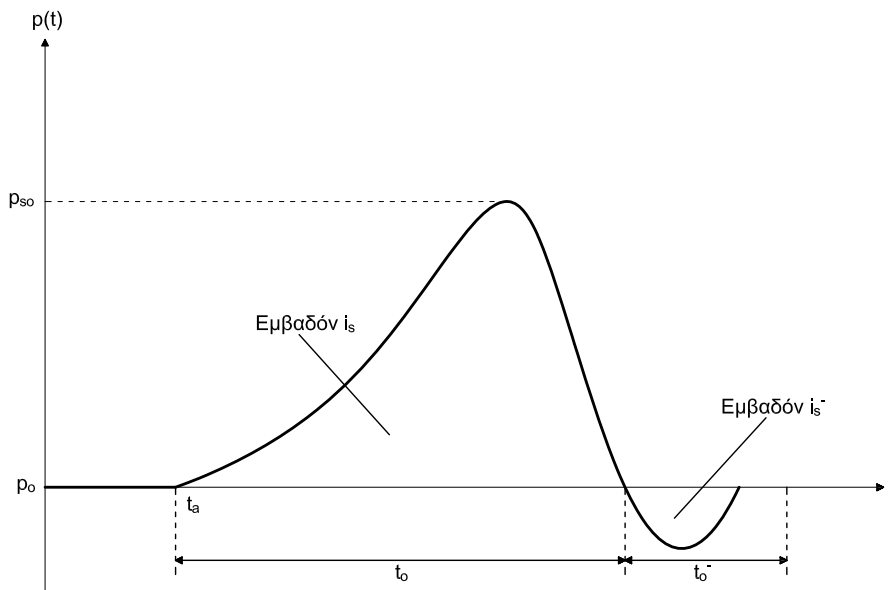


Σχήμα 3-3. Διάγραμμα πίεσης – χρόνου εκρηκτικού κύματος για διάφορες αποστάσεις από τον στόχο.

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.

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 3-4. Διάγραμμα πίεσης – χρόνου κύματος πίεσης νέφους αερίων (κατάκαυση).

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 πέριξ 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 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

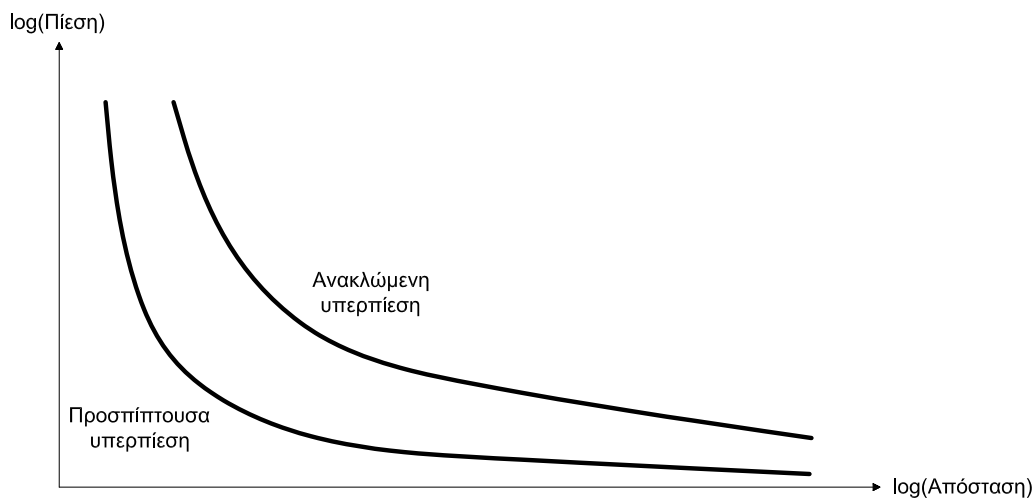
3.4 Χαρακτηριστικά εκρηκτικού κύματος

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 περιθλαση 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_{so} 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. Η ανακλώμενη υπερπίεση είναι πάντα μεγαλύτερη της προσπίπτουσας υπερπίεσης.



Σχήμα 3-5. Ανακλώμενη υπερπίεση έναντι της προσπίπτουσας υπερπίεσης.

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

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

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

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

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

U_s : Ταχύτητα μετώπου.

p_o : Πίεση σε συνθήκες περιβάλλοντος.

a_o : Ταχύτητα του ήχου στον αέρα σε πίεση p_o .

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_{so} ο Brode πρότεινε τις εξής σχέσεις ($1\text{MPa} = 10\text{bar}$):

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

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

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

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

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 Petrovshyι:

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

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

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:

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

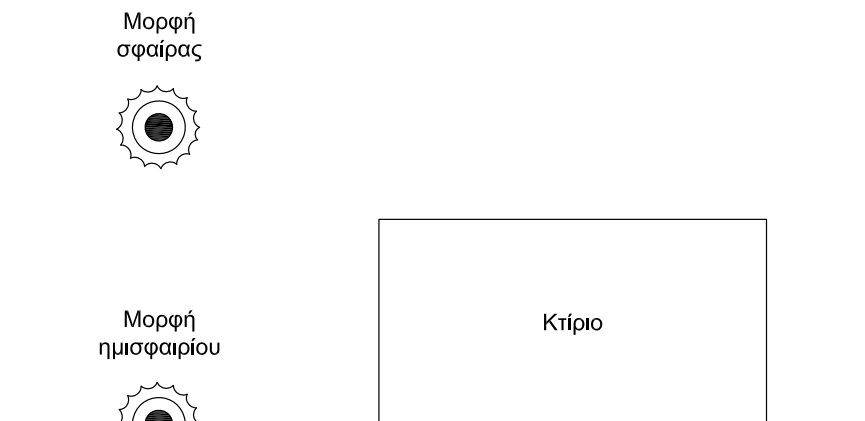
Ενώ για την αρνητική φάση μπορεί να υπολογιστεί ως:

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

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:

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

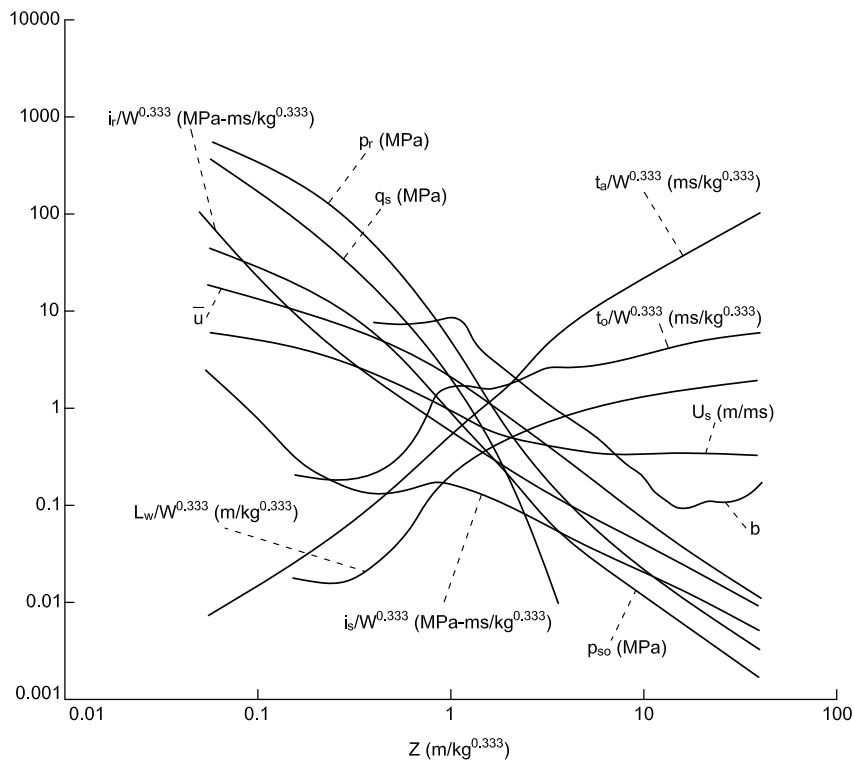
Άλλος τρόπος ώστε να προκύψουν τα διαγράμματα με την κλιμακωτή απόσταση είναι αυτή του Sachs.



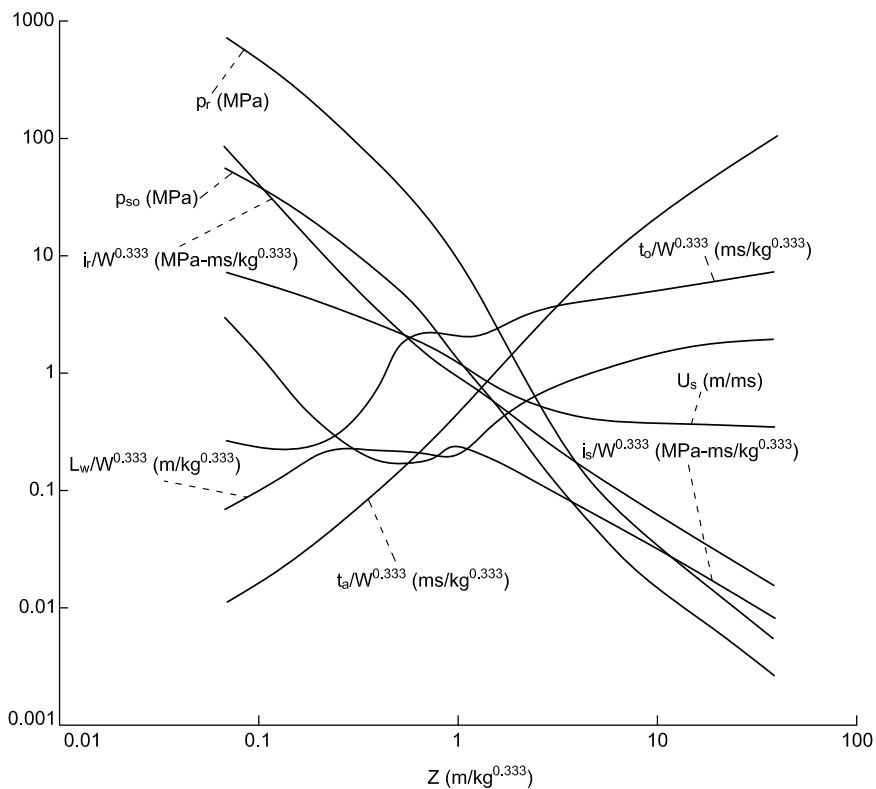
Σχήμα 3-6. Διαφορά σφαίρας και ημισφαιρίου έκρηξης.

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.



Σχήμα 3-7. Παράμετροι εκρηκτικού κύματος για μορφή σφαίρας σε ελεύθερο αέρα και στο επίπεδο της θάλασσας (θετική φάση).

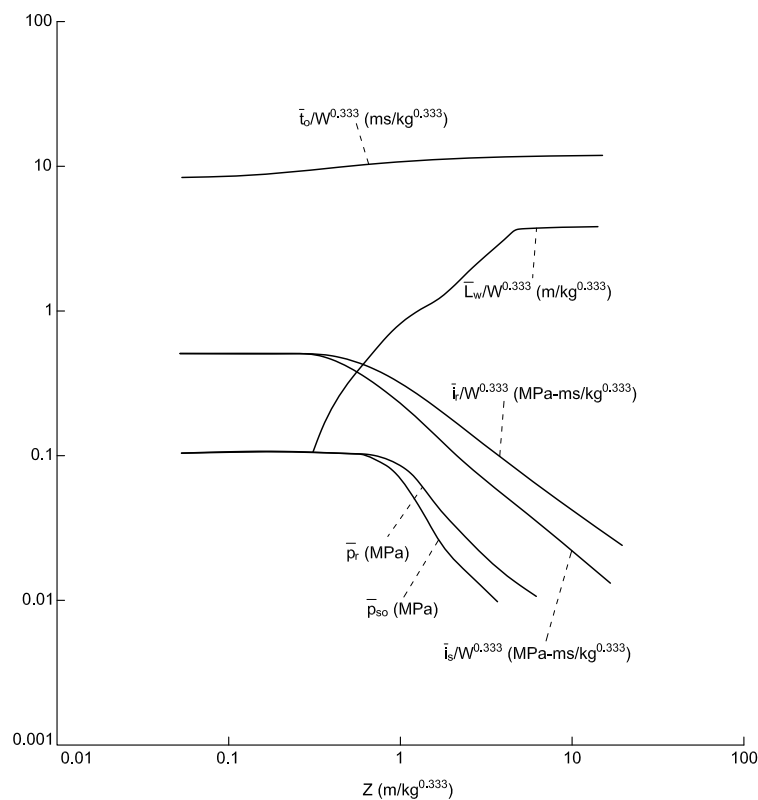


Σχήμα 3-8. Παράμετροι εκρηκτικού κύματος για μορφή ημισφαιρίου στην επιφάνεια και στο επίπεδο της θάλασσας (θετική φάση).

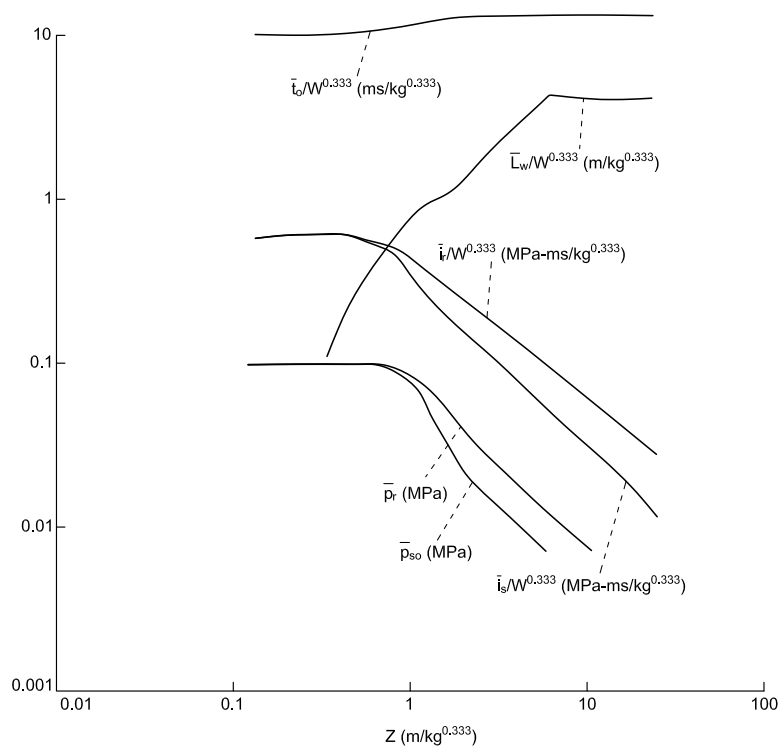
Με αυτόν τον τρόπο μπορούν στο ίδιο διάγραμμα να αναπαρασταθούν και οι υπόλοιπες παράμετροι, καθιστώντας το ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται από πλείστους επιστήμονες και σχεδιαστές. Αυτό συμβαίνει διότι με την κυβική ρίζα, αν επιθυμείται η ίδια πίεση p_s δύο διαφορετικών εκρηκτικών υλών, τότε ο υπολογισμός 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 3-9. Παράμετροι εκρηκτικού κύματος για μορφή σφαίρας σε ελεύθερο αέρα και στο επίπεδο της θάλασσας (αρνητική φάση).

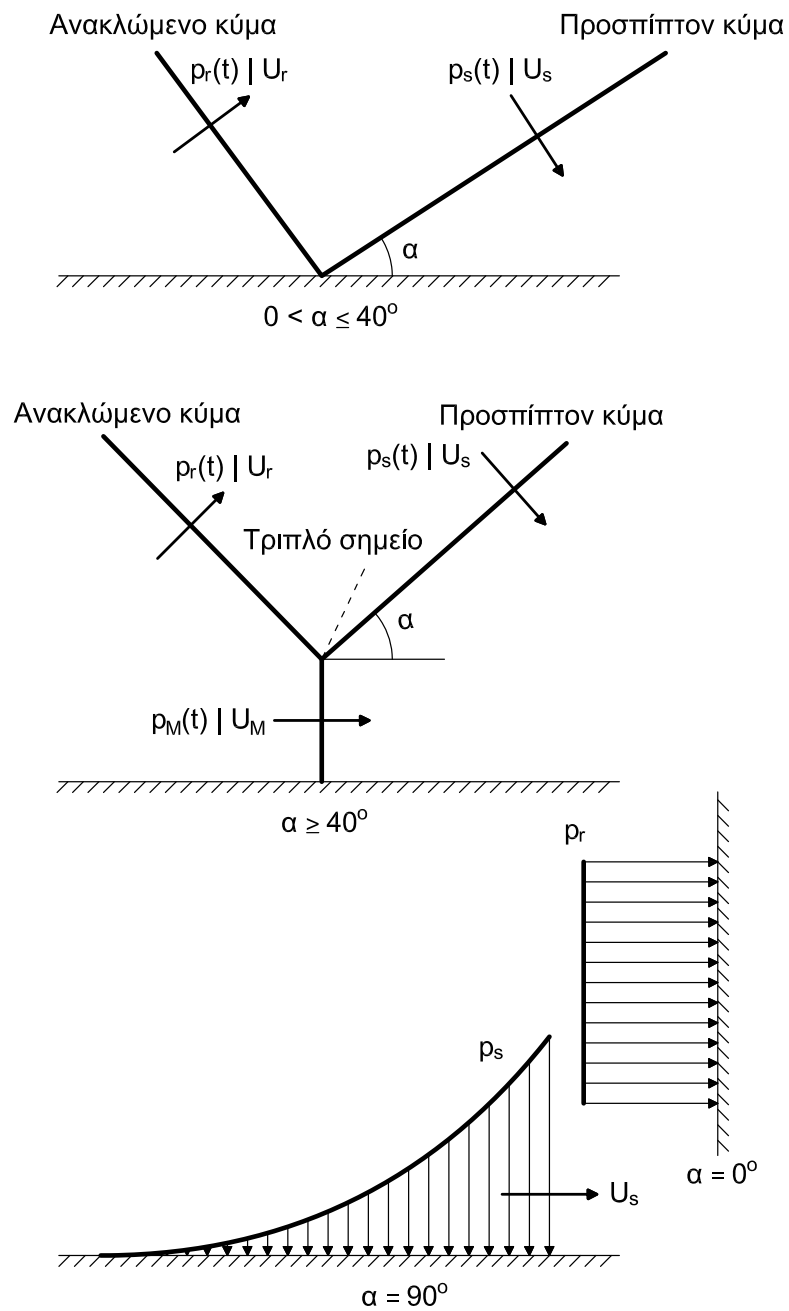


Σχήμα 3-10. Παράμετροι εκρηκτικού κύματος για μορφή ημισφαιρίου στην επιφάνεια και στο επίπεδο της θάλασσας (αρνητική φάση).

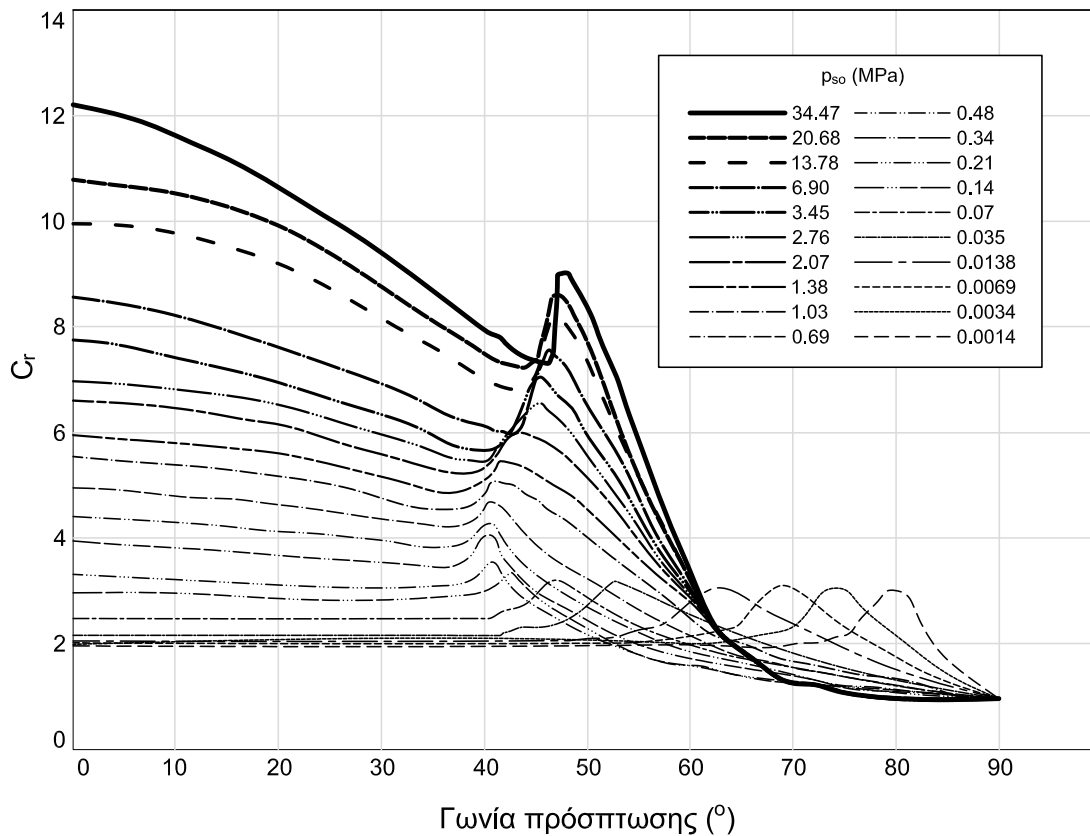
Όσον αφορά την παράμετρο της γωνίας πρόσπτωσης, για γωνία πρόσπτωσης μέχρι 40° εξελίσσεται φυσιολογικά η ανάκλαση. Ωστόσο, για μεγαλύτερη γωνία έρχεται στο προσκήνιο η ανάκλαση Mach η οποία πρόκειται για ειδική και σύνθετη περίπτωση ανάκλασης κατά την οποία στην ουσία το κύμα δεν αναπηδά από την επιφάνεια 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:

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



Σχήμα 3-11. Μορφές ανάκλασης εκρηκτικού κύματος.

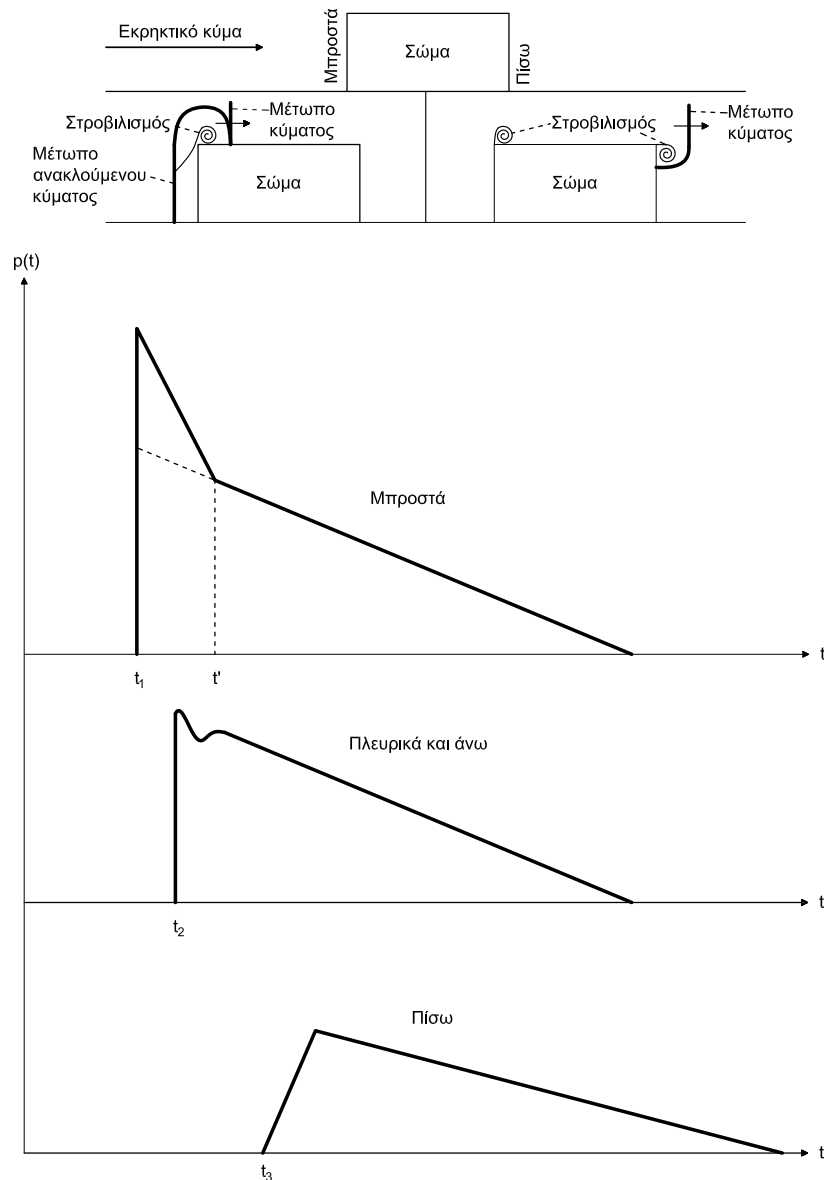


Σχήμα 3-12. Διαφοροποίηση του C_t ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης και την πίεση p_{so} .

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 3-13. Αναπτυσσόμενη πίεση από εκρηκτικό κύμα στα διάφορα σημεία του σώματος.

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:

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

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 των UFC 3-340-02.

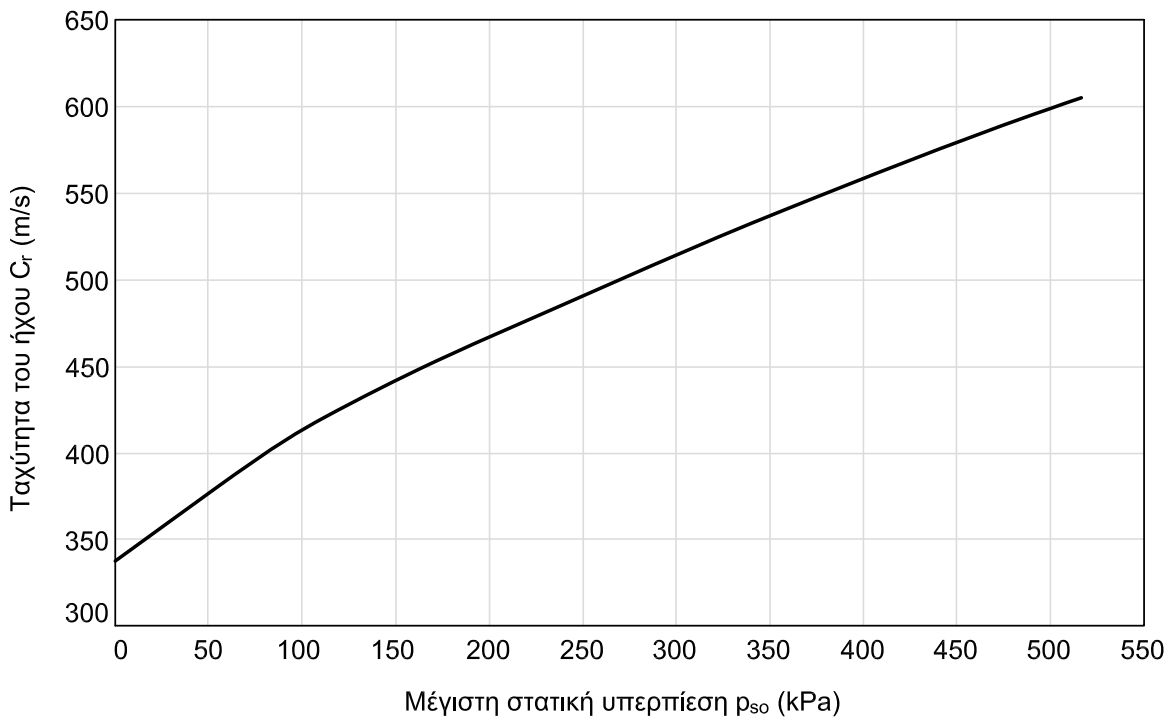
C_D : Συντελεστής σύρσεως,

q_0 : Μέγιστη δυναμική πίεση.

Πίνακας 3-2. Συντελεστές σύρσεως C_D σύμφωνα με τα 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 3-14. Ταχύτητα του ήχου ανάλογα με τη μέγιστη στατική υπερπίεση.

Η δύναμη σύρσεως υπολογίζεται ως εξής:

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

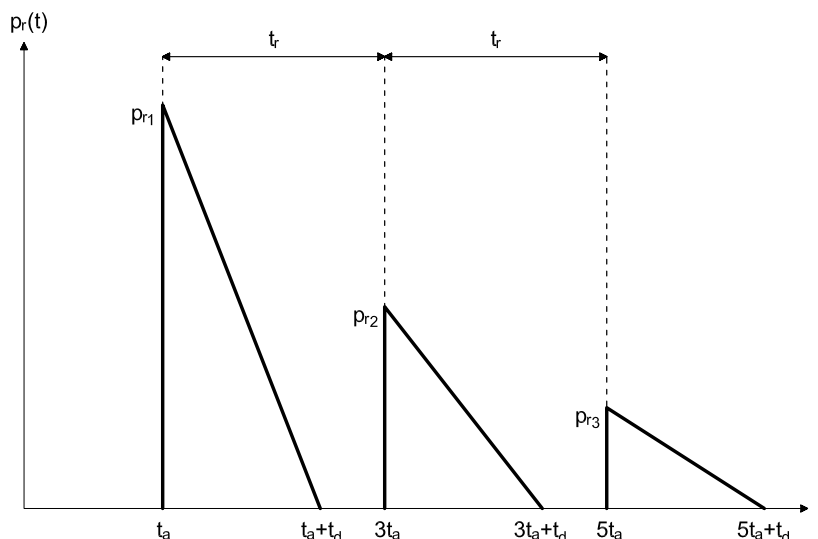
A: Εμβαδόν φορτιζόμενης επιφάνειας.

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 3-15. Προσέγγιση των ανακλάσεων για έκρηξη σε περιορισμένες συνθήκες.

Οι αντίστοιχοι τύποι είναι οι εξής:

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

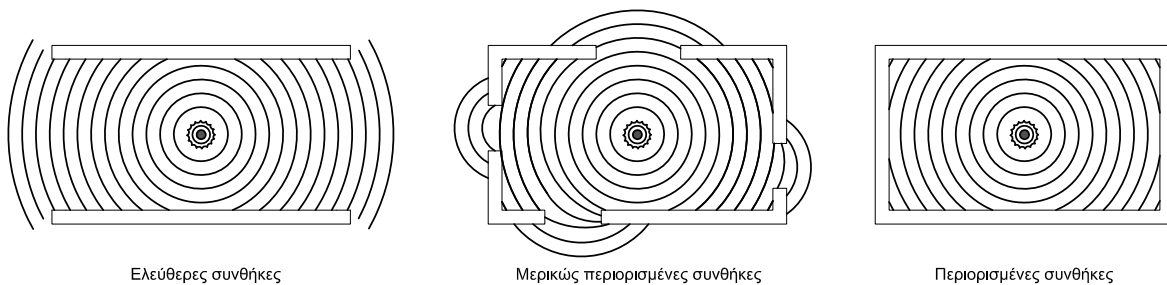
$$i_{r2}=0.5 \cdot i_{r1} \mid i_{r3}=0.5 \cdot i_{r2} \mid i_{r4}=0 \quad (3-27)$$

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

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 3-16. Ταξινόμηση εκρήξεων ως προς τους περιορισμούς.

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:

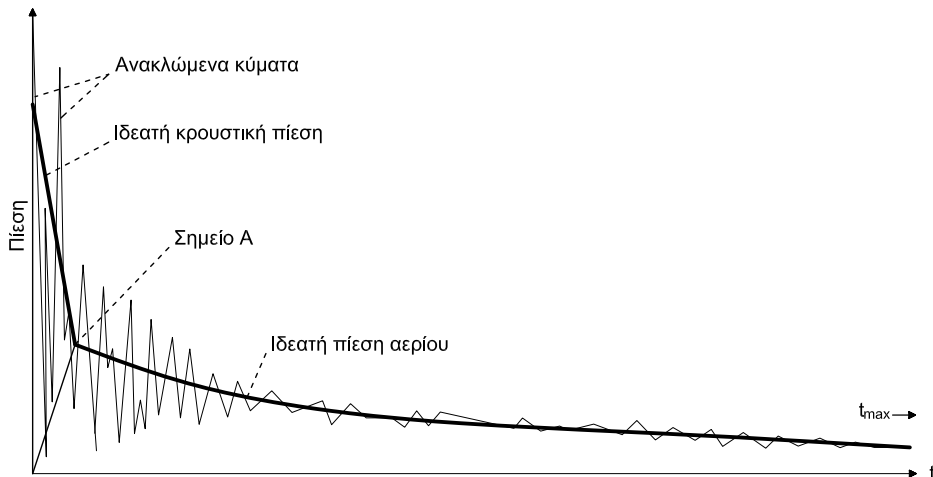
$$p(t)=(p_{QS}+p_o)e^{\left(\frac{-\alpha_e \cdot A_s \cdot t \cdot \alpha_0}{V}\right)} \quad (3-31)$$

p_{QS} : Μέγιστη οιονεί στατική πίεση.

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

A_s : Συνολική επιφάνεια εσωτερικά τοίχων και οροφών.

V : Όγκος χώρου.



Σχήμα 3-17. Ανακλώμενη κρουστική πίεση και πίεση αερίου σε έκρηξη με περιορισμένες συνθήκες.

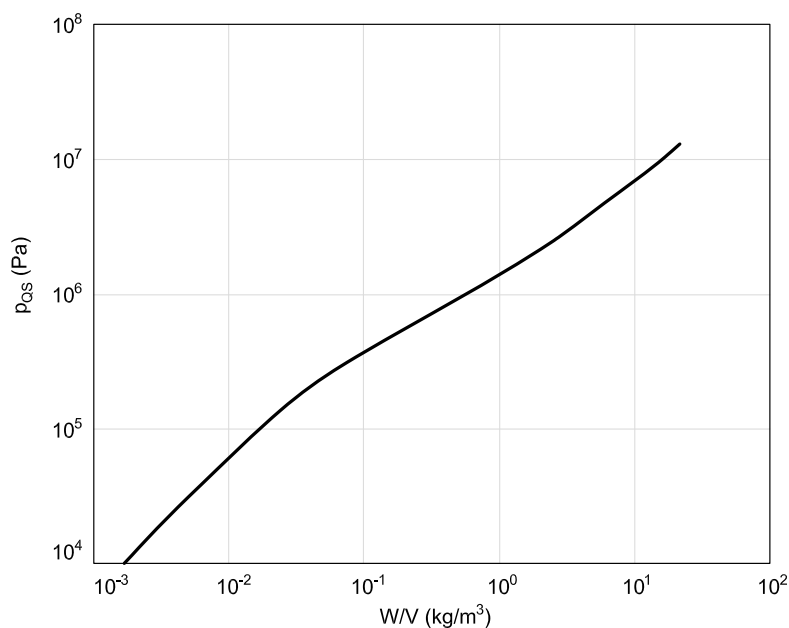
Αυτή η φθίνουσα πορεία έχει εφαπτήριο το σημείο A, δηλαδή τη χρονική στιγμή $5t_a+t_d$, οπότε και παύουν (θεωρητικά) οι ανακλάσεις. Το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη ορίζει την ώθηση της πίεσης αερίου i_g :

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

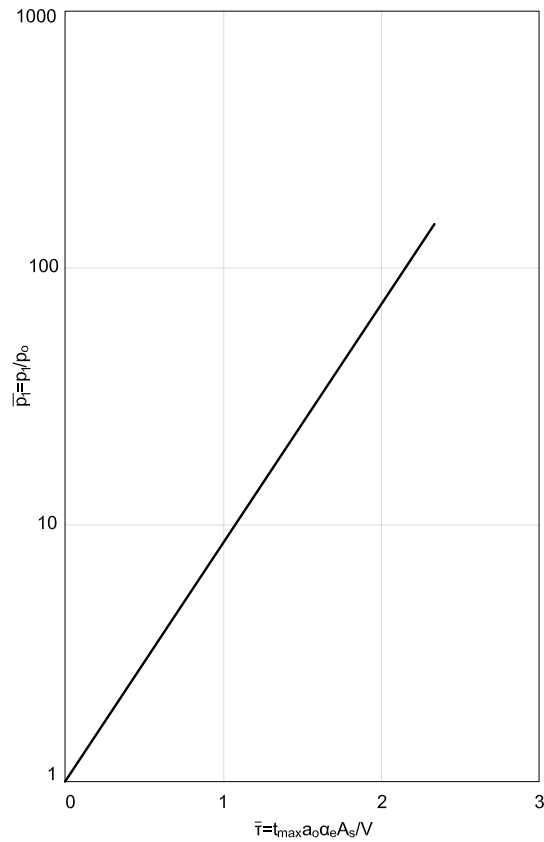
$$p_1 = p_{QS} + p_o \quad (3-33)$$

$$C = \frac{2.13 \cdot a_e \cdot A_s \cdot a_o}{V} \quad (3-34)$$

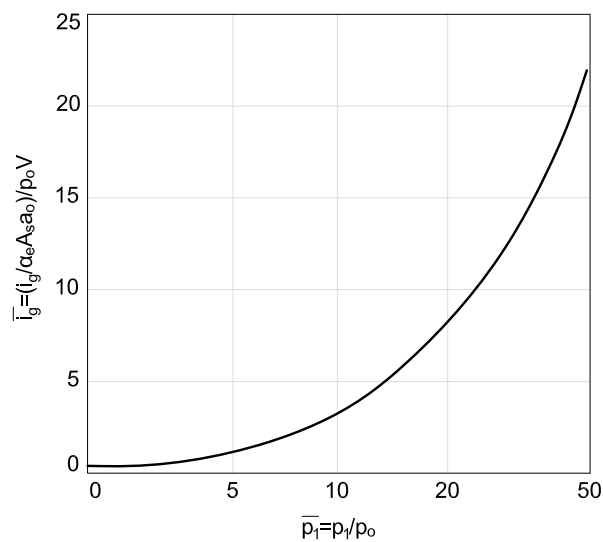
Η εξίσωση του i_g στην πραγματικότητα υπολογίζει το εμβαδόν συμπεριλαμβάνοντας το αρχικό στάδιο όπου ενεργούν κυρίως οι κρουστικές πιέσεις των ανακλώμενων κυμάτων. Το γεγονός αυτό, όμως, δεν δημιουργεί πρόβλημα διότι αυτή η αρχική χρονική διάρκεια των $5t_a+t_d$ είναι πολύ μικρή και μόνο στην περίπτωση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



Σχήμα 3-18. Διάγραμμα ανάμεσα στην πίεση p_{QS} και στον λόγο W/V .



Σχήμα 3-19. Διάγραμμα ανάμεσα στην κλιμακωτή πίεση \bar{p}_1 και στην κλιμακωτή διάρκεια \bar{t} .



Σχήμα 3-20. Διάγραμμα ανάμεσα στην κλιμακωτή ώθηση πίεσης αερίου \bar{t}_g και την κλιμακωτή πίεση \bar{p}_1 .

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.

4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΦΟΡΤΙΩΝ ΕΚΡΗΞΗΣ

Στο παρόν κεφάλαιο αναζητούνται οι μέθοδοι προσδιορισμού των εκρηκτικών φορτίων επί των κατασκευών. Οι μέθοδοι διακρίνονται στις εξής τρεις κατηγορίες:

- Εμπειρικές μέθοδοι, όπου υπάρχουν συσχετίσεις περισσότερο με πειραματικά ευρήματα και λιγότερο με νόμους της φυσικής. Χαρακτηρίζονται από μεγάλη ευκολία εφαρμογής αλλά περιορισμένη ακρίβεια.
- Ημιεμπειρικές μέθοδοι, με απλοποιημένους τρόπους που εκφράζουν τα φυσικά φαινόμενα. Χαρακτηρίζονται από μέτρια ευκολία εφαρμογής και μέτρια ακρίβεια.
- Μέθοδοι πρώτων αρχών, με επίλυση των διαφορικών εξισώσεων που εκφράζουν το πεδίο ροής. Χαρακτηρίζονται από περιορισμένη ευκολία εφαρμογής και υψηλή ακρίβεια. Βασίζονται σε κώδικες υπολογιστικής δυναμικής των ρευστών ενώ έχουν ευρεία εφαρμογή ακόμη και σε περιπτώσεις που δεν δύνανται να εφαρμοστούν οι εμπειρικές και ημιεμπειρικές μέθοδοι, δηλαδή σε περιπτώσεις όπου δεν έχουν προσδιοριστεί τέτοιες μέθοδοι.

4.1 Εμπειρικές μέθοδοι

4.1.1 Έκρηξη συμπυκνωμένης φάσης σε ελεύθερες συνθήκες

Οι υπολογισμοί βασίζονται στα διαγράμματα προηγούμενου κεφαλαίου βάσει της κλιμακωτής απόστασης Z . Ειδικά το διάγραμμα που αφορά ημισφαίριο έχει εφαρμογή σε πλείστες περιπτώσεις όπου επιδιώκεται η εκτίμηση της προσπίπτουσας και ανακλώμενης πίεσης και ώθησης ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης.

Μέσω των εμπειρικών μεθόδων, παρέχεται η δυνατότητα υπολογισμού των φορτίων χωρίς την ανάγκη προσομοίωσης γεωμετρικών μοντέλων, γεγονός που είναι άρδην εξυπηρετικό. Όμως, έχουν εφαρμογή μόνο για περιπτώσεις που προσιδιάζουν με αυτές των διαγραμμάτων, δηλαδή για περιπτώσεις μορφής σφαίρας και μορφής ημισφαιρίου. Παρ' όλα αυτά, έκρηξη σε κάποιο ύψος (που συμβαίνει σε σπάνιες περιπτώσεις) μπορεί να προσεγγιστεί και πάλι με γραμμική παρεμβολή ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις. Ωστόσο και πάλι υπάρχουν εξαιρέσεις που χρειάζονται ιδιαίτερη προσοχή:

- Περίπλοκη τοπογραφία περιοχής.
- Γειτονικά κτίρια με κίνδυνο εγκλωβισμού του εκρηκτικού κύματος και με τη συνακόλουθη παραγωγή μη συντηρητικών αποτελεσμάτων (αφού προκαλείται πολλαπλή ανάκλαση).
- Με τα διαγράμματα υπάρχει έλλειψη πληροφορίας για την ταχύτητα των μορίων του αέρα σε ευρύ χρονικό πεδίο, με αποτέλεσμα την αδυναμία συνολικού υπολογισμού των φορτίων σε περιορισμένου όγκου ή με δυνατότητα μετακίνησης σώματα.

- Γειτονικά κτίρια ή ανάγλυφο που λειτουργούν προστατευτικά για το κυρίως κτίριο αλλά δεν επιτρέπουν την εφαρμογή των διαγραμμάτων.
- Μη συμπερίληξη της αντίστασης του κυρίως κτιρίου στη ροή του εκρηκτικού κύματος και στις προκαλούμενες πιέσεις.

4.1.2 Έκρηξη συμπακνωμένης φάσης σε περιορισμένες συνθήκες

Καθοριστικός παράγοντας σε μια έκρηξη σε περιορισμένες συνθήκες (δηλαδή εντός κτιρίου) είναι το γεγονός ότι το εκρηκτικό κύμα εγκλωβίζεται και ανακλάται συνεχώς εντός του χώρου και το γεγονός ότι υπάρχει έντονη πίεση αερίου.

Οι υπολογισμοί στην προκειμένη περίπτωση γίνονται με τη χρήση των αντίστοιχων διαγραμμάτων για έκρηξη σε περιορισμένες συνθήκες ανάλογα με την επιφάνεια των διόδων εξαερισμού, τον όγκο του κτιρίου και την εκρηκτική ύλη.

4.1.3 Έκρηξη νέφους αερίων

Οι υπολογισμοί γίνονται με χρήση διαγραμμάτων με κλιμακωτές αποστάσεις που συσχετίζονται με την προκύπτουσα ενέργεια καύσης.

4.2 Ημιεμπειρικές μέθοδοι

Οι ημιεμπειρικές μέθοδοι έχουν περιορισμένη εφαρμογή στις εκρήξεις συμπακνωμένης φάσης αλλά έχουν εφαρμογή στις εκρήξεις νέφους αερίων. Πιο συγκεκριμένα, παίζουν σημαντικό ρόλο στην περίπτωση όπου υπάρχουν δίοδοι εξαερισμού του χώρου έκρηξης. Εκεί, έρχονται να δώσουν λύση σε αυτό το σύνθετο πρόβλημα μια που το αέριο που δεν έχει υποστεί καύση πιέζει τους εσωτερικούς τοίχους και οροφές όταν εξέρχεται. Ωστόσο, όταν πια είναι εκτός του κτιρίου, δύναται να υποστεί καύση και, άρα, να ασκήσει εξωτερικές πλέον πιέσεις στο κτίριο.

4.3 Μέθοδοι πρώτων αρχών

4.3.1 Εξισώσεις Navier-Stokes

Στις εξισώσεις των Navier-Stokes το ρευστό αποτελεί το μέσο στο οποίο αναπτύσσεται το εκρηκτικό κύμα. Ο αέρας είναι κλασσική και γενική περίπτωση του εν λόγω ρευστού. Το υπολογιστικό πεδίο (computational domain) ορίζεται ως το πεδίο ενδιαφέροντος και συντίθεται από τα όρια του προβλήματος μέσα από τις συνοριακές συνθήκες (boundary conditions) (όπως το έδαφος ή το κτίριο) ενώ η περιοχή έκτασης του ρευστού εντός του υπολογιστικού πεδίου ονομάζεται πεδίο ροής (flow field).

Οι εξισώσεις των Navier-Stokes ορίζονται από τρεις βασικές αρχές [26]:

Διατήρηση της μάζας: Η μάζα πρέπει να διατηρείται σταθερή εντός του συστήματος. Έτσι, όταν εξέρχεται μάζα από το σύστημα, πρέπει να αυξάνεται η πυκνότητα του πεδίου ροής, ώστε συνολικά να διατηρείται σταθερή η μάζα και το ανάποδο. Σε μια χημική αντίδραση, όπως αυτή της έκρηξης νέφους αερίων, κάθε χημικό στοιχείο θεωρείται ξεχωριστά στις ανάλογες χημικές αντιδράσεις ότι λαμβάνει χώρα με αντίστοιχη μεταφορά μάζας. Άρα:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \cdot u_i) \quad (4-1)$$

t: Χρόνος.

ρ: Πυκνότητα ρευστού.

x: Απόσταση.

i: Μελετώμενη διεύθυνση.

u: Ταχύτητα.

Διατήρηση της ορμής: Η διατήρηση της ορμής εκφράζει τη δυναμική ισορροπία του συστήματος και είναι:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \cdot u_i \cdot u_j) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \rho \cdot f_i \quad (4-2)$$

p: Πίεση.

T: Διατμητική τάση.

f: Δύναμη ανά μονάδα μάζας.

Διατήρηση της ενέργειας: Η διατήρηση της ενέργειας στην περίπτωση της έκρηξης εντός του υπολογιστικού πεδίου αφορά βασικά ενέργεια πίεσης, θερμική ενέργεια και κινητική ενέργεια.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot E) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \cdot u_i \cdot H) + \frac{\partial}{\partial x_i}(k \cdot \frac{\partial T}{\partial x_i}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\tau_{ij} \cdot u_i) - \rho \cdot f_i \cdot u_i - q_H \quad (4-3)$$

H: Ενθαλπία ($H = E + p/\rho$).

T: Θερμοκρασία.

k: Θερμική αγωγιμότητα.

q_H: Θερμική ενέργεια.

e: Εσωτερική ενέργεια ανά μονάδα μάζας.

E: Συνολική ενέργεια ανά μονάδα μάζας ($E = e + \frac{1}{2} u_i^2$).

Η επίλυση των άνωθεν διαφορικών εξισώσεων είναι δυσχερής διότι οι διάφορες μεταβλητές μεταβάλλονται και χωρικά και χρονικά. Έτσι, για την επίλυση χρησιμοποιούνται όγκοι ελέγχου στους οποίους στοχεύεται η επιμέρους επίλυση των διαφορικών εξισώσεων. Οι όγκοι ελέγχου δεν είναι μοναδιαίου όγκου αλλά έχουν επαρκές μέγεθος, γι' αυτό και είναι αποδοτικοί.

4.3.2 Εξισώσεις Euler

Για την περαιτέρω απλοποίηση των εξισώσεων των Navier-Stokes χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις Euler οι οποίες στην ουσία αποτελούν υποπερίπτωση των εξισώσεων Navier-Stokes και αφορούν μη συνεκτική και αδιαβατική ροή. Οπότε, παραλείπονται οι όροι των προηγούμενων εξισώσεων περί θερμικής αγωγιμότητας και διατμητικών τάσεων.

4.3.3 Επιλογή Navier-Stokes ή Euler

Οι εξισώσεις Euler αποτελούν υποπερίπτωση των εξισώσεων Navier-Stokes για μη συνεκτική και αδιαβατική ροή. Τέτοια ροή υπάρχει στις εκρήξεις συμπυκνωμένης φάσης αλλά δεν υπάρχει στις εκρήξεις νέφους αερίων. Άρα:

- Εκρήξεις συμπυκνωμένης φάσης: Εξισώσεις Navier-Stokes.
- Εκρήξεις νέφους αερίων: Εξισώσεις Euler.

4.3.4 Παράμετροι

Υπάρχουν βασικοί παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την προσομοίωση μιας έκρηξης, ώστε να καθοριστεί επιτυχής η εξαγωγή των αποτελεσμάτων και να επιτευχθεί αποδοτική επίλυση:

- Διαστάσεις προβλήματος: Το πρόβλημα από τη γενικότερη περίπτωση που είναι η τρισδιάστατη υπάρχει η δυνατότητα να περιοριστεί μέχρι και σε μονοδιάστατο πρόβλημα για λόγους αύξησης της απόδοσης αξιοποιώντας τη συμμετρία που πιθανώς υπάρχει όσο δεν συναντά το κύμα κάποιο εμπόδιο και επεκτείνοντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν από μία διάσταση σε όλες τις υπόλοιπες δίχως την ανάγκη επανεπίλυσης.

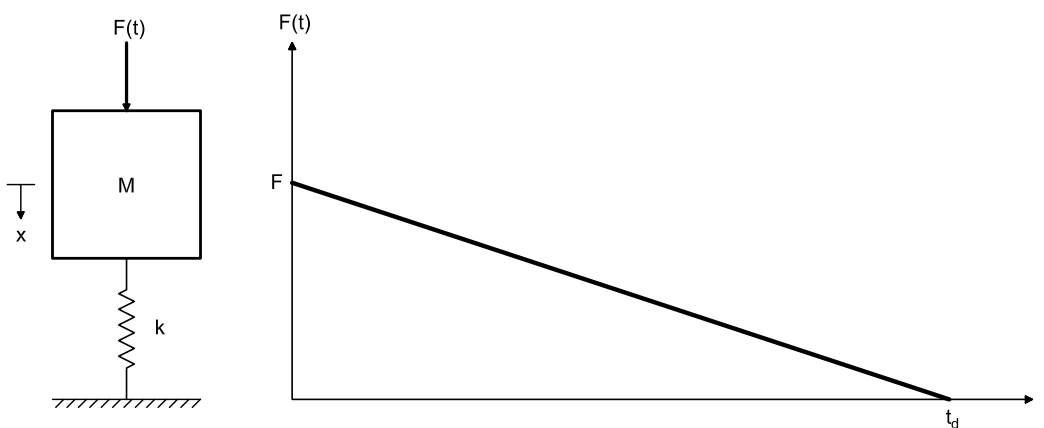
- Διακριτοποίηση: Πυκνότερη διακριτοποίηση συνεπάγεται υψηλότερη ακρίβεια αλλά ταυτόχρονα βραδύτερη επίλυση. Αραιή διακριτοποίηση μπορεί να έχει το πλεονέκτημα της ταχύτητας αλλά μπορεί και να οδηγήσει σε αποτελέσματα περιορισμένης ακρίβειας και, μάλιστα, κατά της ασφαλείας. Επιπλέον, η διακριτοποίηση επιδιώκεται να υπάρχει σε μεγάλο βαθμό εκεί που αναπτύσσεται το εκρηκτικό κύμα. Σε σημεία μακριά του κύματος με χαμηλές πιέσεις είναι άσκοπη η πυκνή διακριτοποίηση. Αλλά το εκρηκτικό κύμα εξελίσσεται χρονικά. Έτσι, ως πρόσθετη βελτίωση της απόδοσης, η διακριτοποίηση μπορεί να μεταβάλλεται και αυτή χρονικά και, άρα, να γίνεται συνεχώς πιο πυκνή στα σημεία του κύματος και πιο αραιή στα υπόλοιπα σημεία.
- Απόκριση κατασκευής: Κατά την προσομοίωση, η κατασκευή εμφανίζεται ως ένα απόλυτα στιβαρό σώμα που δεν αποκρίνεται στην έκρηξη. Αυτό άμα η χρονική διάρκεια αντίδρασης της κατασκευής είναι αρκετά μεγαλύτερη της διάρκειας δράσης του κύματος, είναι ανεκτή υπόθεση. Ωστόσο, για παράδειγμα τα παράθυρα ενός κτιρίου αποτελούν σημαντικές συνοριακές συνθήκες στο πρόβλημα. Έτσι, χρειάζονται ειδικά στοιχεία για την κατασκευή που να προσομοιώνουν όσο το δυνατόν καλύτερα την πραγματική δράση τους.
- Στοιχειομετρία: Αφορά τις εκρήξεις νέφους αερίων και ειδικότερα τη μίξη καυσίμου – αέρα γεγονός σημαντικό αφού η ομοιογένεια τους είναι ασυνήθης. Έτσι, είτε προσομοιώνεται αυτή η ανομοιογένεια είτε γίνεται η προσομοίωση θεωρώντας ομοιογένεια αλλά με κατάλληλη μετατροπή ώστε να διορθωθεί αυτή η ανακρίβεια.
- Τύρβη: Αφορά τις εκρήξεις νέφους αερίων οι οποίες συσχετίζονται με συνεκτική ροή και, άρα, έχουν απαίτηση ύψιστης διακριτοποίησης για να προσεγγιστεί η τύρβη που προκαλείται. Αντί για αυτό, επιδιώκεται η ενσωμάτωση μοντέλων, όπως του [25], για την περιγραφή της κινητικής ενέργειας. Για τον υπολογισμό της τύρβης, όμως, σε μικροσκοπικό επίπεδο χρησιμοποιείται η προσέγγιση του πορώδους σε σχέση με την αντίσταση στη ροή.
- Σημείο ανάφλεξης: Αφορά τις εκρήξεις νέφους αερίων και λόγω της σημαντικότητάς του στις τελικές πιέσεις που εφαρμόζονται, καθίσταται αναγκαία η εκτίμηση του σε διάφορα σημεία έτσι ώστε να προκύψει η δυσμενέστερη περίπτωση.
- Μετάβαση από κατάκαυση σε κατάρρηξη: Υπάρχει η πιθανότητα σε μια έκρηξη νέφους αερίων μια αρχική κατάσταση κατάκαυσης να εξελιχθεί σε κατάρρηξη ανάλογα με το είδος του αερίου. Αυτή η μετάβαση πρέπει να ληφθεί υπόψιν στην προσομοίωση.

5 ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΕ ΕΚΡΗΞΗ

Οι βασικές αρχές που αφορούν την απόκριση της κατασκευής σε κύμα που προκύπτει από έκρηξη διέπονται μέσα από το μοντέλο του μονοβάθμιου ταλαντωτή με ισοδύναμη συγκεντρωμένη μάζα και ελαστική συμπεριφορά. Αυτός είναι που συνδέει τη διάρκεια φόρτισης από την έκρηξη με την ιδιοπερίοδο της κατασκευής και παίζει καθοριστικό ρόλο στη μελέτη των διαφόρων αποκρίσεων της κατασκευής. Τυχόν πλαστικότητα μπορεί να ληφθεί, επίσης, υπόψιν σε πιο προχωρημένο στάδιο αλλά σε αντίστοιχο μοντέλο.

5.1 Τρεις καταστάσεις απόκρισης

Έστω μονοβάθμιος ταλαντωτής που φορτίζεται με τη φόρτιση που παρουσιάζεται στο (Σχήμα 5-1). Η φόρτιση αυτή προσιδιάζει με αυτήν της φόρτισης από εκρηκτικό κύμα.



Σχήμα 5-1. Μονοβάθμιος ταλαντωτής με ελαστική συμπεριφορά.

Η συνάρτηση φόρτισης είναι η εξής:

$$F(t) = \left(1 - \frac{t}{t_d}\right) \cdot F \quad (5-1)$$

Η ώθηση, όπως έχει ήδη αναλυτικά παρουσιαστεί, είναι ίση με το εμβαδόν του διαγράμματος. Δηλαδή στην προκειμένη περίπτωση για $0 \leq t \leq t_d$:

$$I = \frac{1}{2} \cdot F \cdot t_d \quad (5-2)$$

Με ω την ιδιοσυχνότητα και T την ιδιοπερίοδο της κατασκευής, υλοποιώντας την εξίσωση κίνησης προκύπτει (δίχως απόσβεση):

$$M \cdot \ddot{x} + k \cdot x = \left(1 - \frac{t}{t_d}\right) \cdot F \quad (5-3)$$

$$\omega = \sqrt{k/M} \quad (5-4)$$

Η επίλυση της διαφορικής εξίσωσης θεωρώντας απόκριση μέσα στη χρονική διάρκεια t_d δίνει:

$$x(t) = \frac{F}{k} \cdot (1 - \cos \omega t) + \frac{F}{k \cdot t_d} \cdot \left(\frac{\sin \omega t}{\omega} - t\right) \quad (5-5)$$

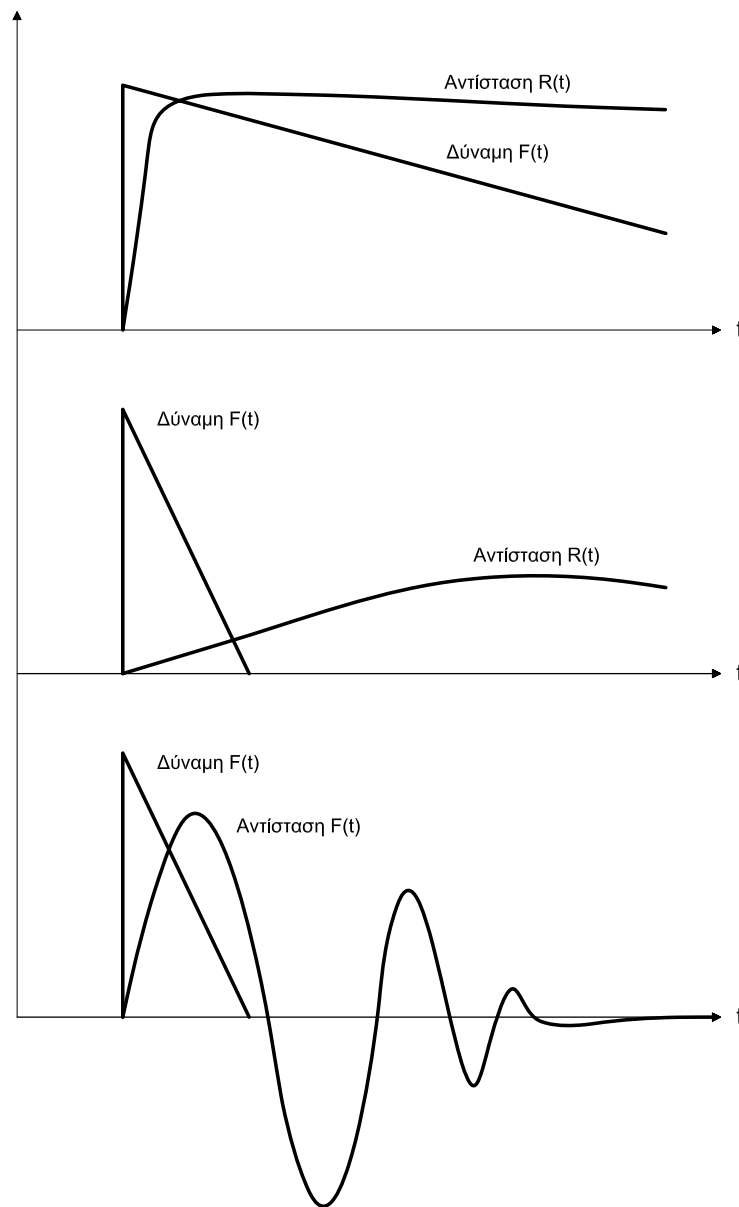
Η μέγιστη μετακίνηση προκύπτει για μηδενική ταχύτητα, δηλαδή μηδενίζοντας την παράγωγο της $x(t)$. Έτσι, προκύπτει η:

$$0 = \omega \cdot \sin(\omega \cdot t_m) + \frac{1}{t_d} \cdot \cos(\omega \cdot t_m) - \frac{1}{t_d} \quad (5-6)$$

t_m : Χρόνος εμφάνισης x_{max} .

Βάσει των ανωτέρω διακρίνονται τρεις βασικές καταστάσεις που παρουσιάζονται και στο (Σχήμα 5-2):

Οιονεί στατική:	$\frac{t_d}{T} > 10$ ή $\frac{t_m}{t_d} < 0.3$
	Αν η διάρκεια t_d είναι αρκετά μεγαλύτερη από την ιδιοπερίοδο, τότε η κατασκευή είναι σαν να δέχεται τη φόρτιση στατικά ενώ η μέγιστη μετακίνηση ως εκ τούτου εμφανίζεται κατά τι πριν το πέρας της φόρτισης. Τέτοια περίπτωση αποτελεί η φόρτιση από έκρηξη μακριά της κατασκευής.
Δυναμική:	$0.1 < \frac{t_d}{T} < 10$ ή $0.3 < \frac{t_m}{t_d} < 3$
	Αν η διάρκεια t_d προσιδιάζει με την ιδιοπερίοδο, απαιτείται επίλυση της εξίσωσης κίνησης για να επιτευχθεί επαρκής ανάλυση της κατάστασης.
Ωστική:	$\frac{t_d}{T} < 0.1$ ή $3 < \frac{t_m}{t_d}$
	Αν η διάρκεια t_d είναι αρκετά μικρότερη από την ιδιοπερίοδο, τότε η κατασκευή δεν προλαβαίνει να αποκριθεί ενώ η μέγιστη μετακίνηση ως εκ τούτου εμφανίζεται μετά το πέρας της φόρτισης.



Σχήμα 5-2. Τρεις καταστάσεις απόκρισης της κατασκευής σε φόρτιση από έκρηξη (οιονεί στατική - ωστική - δυναμική).

5.2 Διαγράμματα πίεσης – ώθησης (βλαβών)

Αν η περίπτωση της οιονεί στατικής κατάστασης, θεωρηθεί ιδεατά ότι συντελείται με ορθογωνικό διάγραμμα φόρτισης (δηλαδή σταθερή δύναμη F) και με τριγωνικό διάγραμμα αντίστασης (δηλαδή γραμμική ελαστική αύξηση μετακίνησης). Από την εξίσωση της ενέργειας παραμορφώσεων με το εξωτερικό έργο προκύπτει:

$$W_{\text{ext}} = U \rightarrow F \cdot x_{\text{max}} = \frac{1}{2} \cdot k \cdot x_{\text{max}}^2 \rightarrow \frac{x_{\text{max}}}{F} = 2 \rightarrow \frac{x_{\text{max}}}{x_{\text{st}}} = 2 \quad (5-7)$$

x_{st} : Μετακίνηση που θα προέκυπτε αν η δύναμη F ήταν στατικό φορτίο ($=F/k$).

Όπου $x_{\max}/(F/k)$ αποτελεί τον δυναμικό συντελεστή φορτίου (dynamic load factor – DLF). Αν η περίπτωση της ωστικής κατάστασης, θεωρηθεί ιδεατά ότι συντελείται με μηδενικής διάρκειας παλμό, τότε προκαλείται στιγμιαία ταχύτητα ($= I/M$) στην κατασκευή η οποία μετατρέπεται σε ενέργεια παραμορφώσεων. Από την εξίσωσή τους προκύπτει:

$$\begin{aligned}
 K=U &\rightarrow \frac{1}{2} \cdot M \cdot \dot{x}_0^2 = \frac{1}{2} \cdot k \cdot x_{\max}^2 \rightarrow \frac{1}{2} \cdot \frac{I^2}{M} = \frac{1}{2} \cdot k \cdot x_{\max}^2 \rightarrow \\
 &\rightarrow \frac{(0.5 \cdot F \cdot t_d)^2}{M} = k \cdot x_{\max}^2 \rightarrow \frac{x_{\max}}{\frac{F}{k}} = \frac{F \cdot t_d}{2 \cdot M \cdot x_{\max}} \rightarrow \frac{x_{\max}}{x_{st}} = \frac{1}{2} \cdot \omega \cdot t_d \quad (5-8) \\
 &\rightarrow I = \sqrt{M \cdot k \cdot x_{\max}^2} \rightarrow I = x_{\max} \cdot \sqrt{M \cdot k} \rightarrow \frac{I}{x_{\max} \cdot \sqrt{M \cdot k}} = 1
 \end{aligned}$$

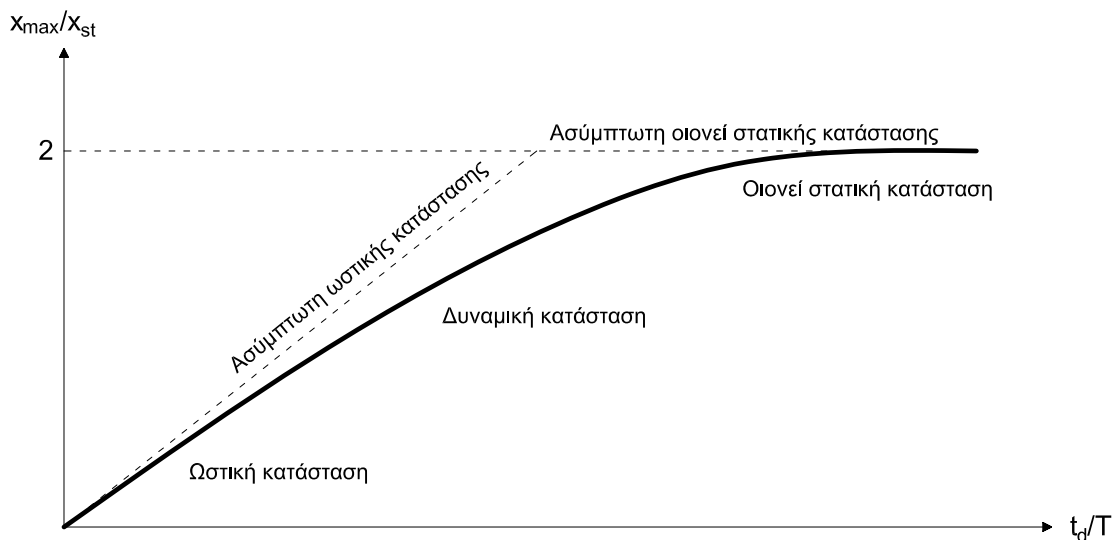
Από τις δύο αυτές ασύμπτωτες προκύπτει το (Σχήμα 5-3) και το (Σχήμα 5-4) στο οποίο παρουσιάζονται και οι τρεις καταστάσεις απόκρισης της κατασκευής. Το δεύτερο αποτελεί διάγραμμα πίεσης – ώθησης (iso-damage diagram). Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό και μπορεί πέρα από θεωρητικά να προκύψει και πειραματικά. Η σημασία του έγκειται στον προσδιορισμό της ζημιάς που μπορεί να προκύψει ανάλογα με το εκρηκτικό φορτίο ή την απόσταση από την έκρηξη σε κάποια κατασκευή. Οι στάθμες βλάβης βαίνοντας σε φθίνουσα σειρά είναι A, B, C_b, C_a, D. Ως εκ τούτου, μπορεί να συσχετιστεί ως:

$$R = \frac{k' \cdot W^{1/3}}{(1 + (3175/W)^2)^{1/6}} \quad (5-9)$$

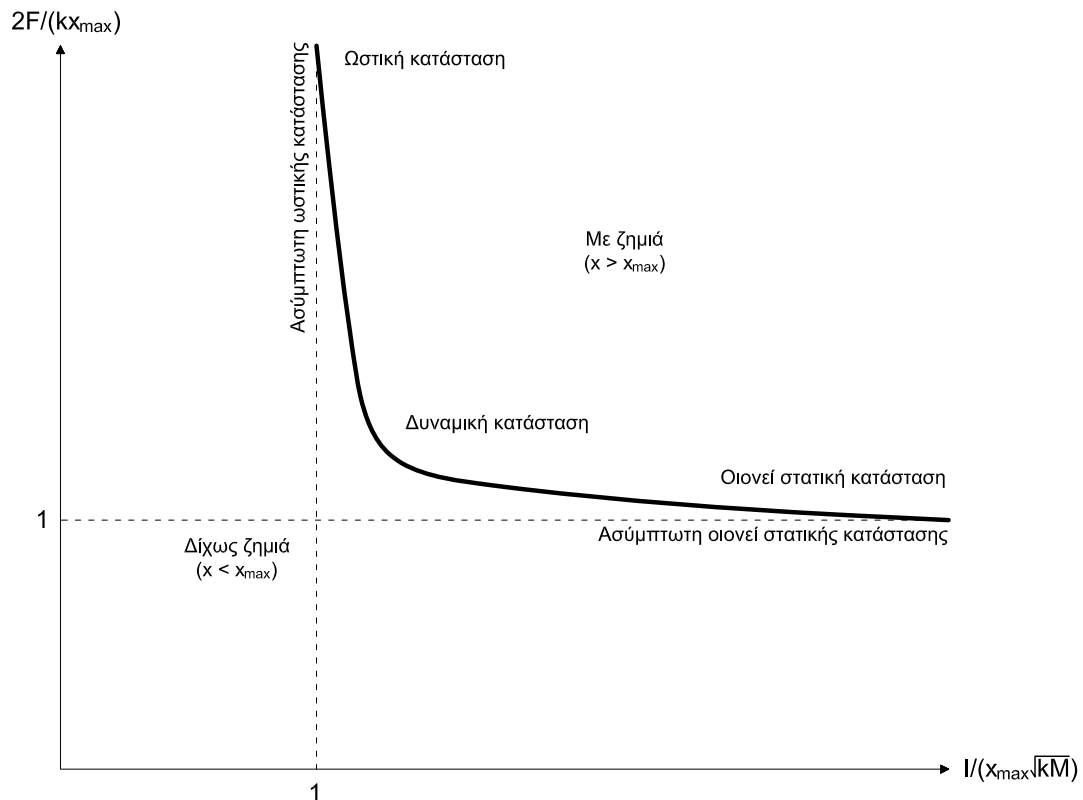
R: Μελετώμενη ακτίνα (m)

W: Μάζα εκρηκτικού σε κιλά TNT.

K': Σταθερά (= 5.6 για στάθμη βλάβης B).



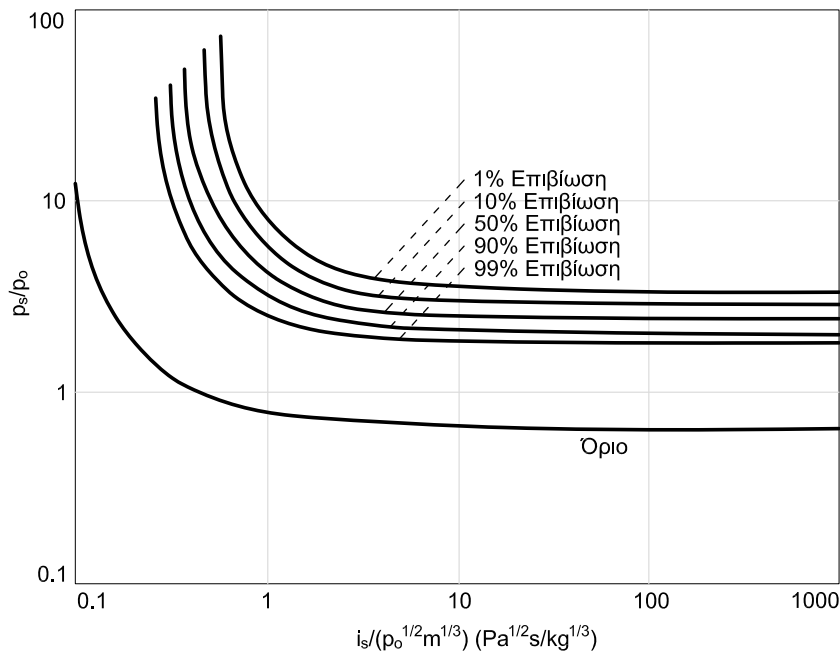
Σχήμα 5-3. Ασύμπτωτες τριών καταστάσεων απόκρισης.



Σχήμα 5-4. Διάγραμμα πίεσης - ώθησης για πρόκληση ζημιάς σε κατασκευή.

Αντίστοιχες στάθμες υπολογίζονται για ανθρώπινες ζωές με αντίστοιχα διαγράμματα, όπως το (Σχήμα 5-5), που προσδιορίζουν το επίπεδο τραυματισμού του ατόμου και μπορούν να είναι (και τα τρία μπορούν να προκαλέσουν ίδιο επίπεδο ζημιάς):

- Πρωτογενές τραύμα: Τραύμα που σχετίζεται με βλάβη στα όργανα του ανθρώπινου σώματος λόγω της πίεσης και διάρκειας του κύματος της έκρηξης. Γενικώς, πρωτεύων κίνδυνος όσων εκτίθενται σε έκρηξη αποτελεί η πρόκληση ζημιάς η οποία μπορεί και να είναι θανατηφόρα στους πνεύμονες. Έπειτα προκαλείται πρόβλημα και στην ακοή.
- Δευτερογενές τραύμα: Τραύμα που προκαλείται από θρύμματα που έρχονται σε επαφή με το ανθρώπινο σώμα.
- Τριτογενές τραύμα: Τραύμα που προκαλείται από κίνηση του ανθρώπινου σώματος και πρόκληση αντίστοιχου προβλήματος στα οστά.



Σχήμα 5-5. Διάγραμμα πίεσης – ώθησης για πρόκληση ζημιάς σε ανθρώπινο πνεύμονα [10].

5.3 Μέθοδοι ανάλυσης

5.3.1 Μέθοδος Rayleigh – Ritz

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή για την εκτίμηση των μέγιστων μετακινήσεων, παραμορφώσεων και τάσεων ακολουθείται η διαδικασία:

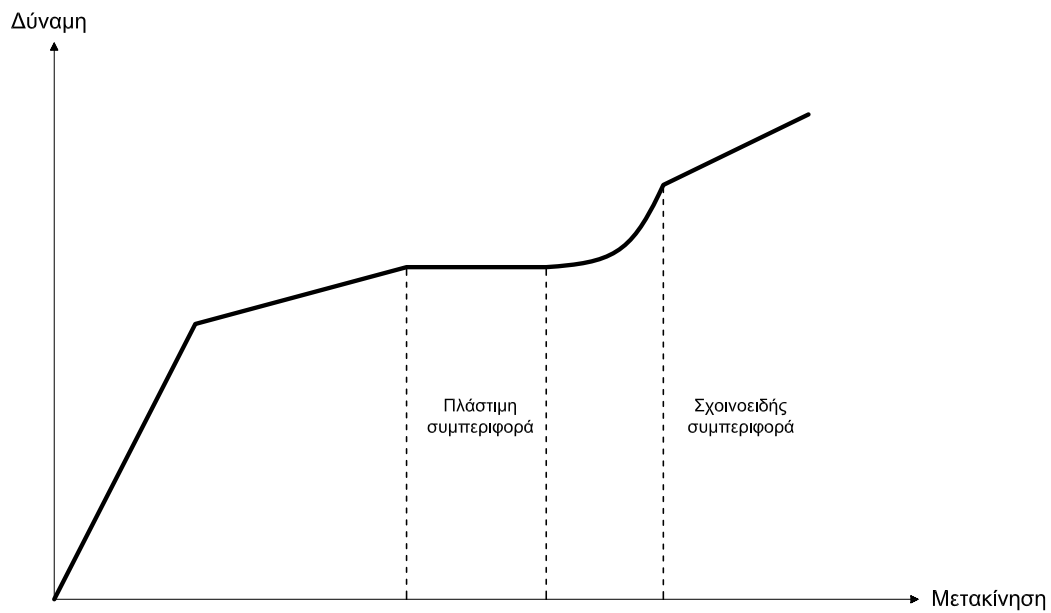
1. Επιλέγεται μία παραμορφωμένη κατάσταση που ανταποκρίνεται στη φόρτιση και ικανοποιεί τις συνοριακές συνθήκες.
2. Βάσει της παραμορφωμένης κατάστασης, εξάγεται η ενέργεια παραμορφώσεων.
3. Ανάλογα με το είδος φόρτισης από την έκρηξη (οιονεί στατική, δυναμική, ωστική) η ενέργεια παραμορφώσεων εξισώνεται με το παραγόμενο έργο μετακίνησης ή με την κινητική ενέργεια και προκύπτουν τα εκάστοτε αποτελέσματα.

5.3.2 Μέθοδος ισοδύναμης συγκεντρωμένης μάζας

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή για την εκτίμηση της συνολικής απόκρισης χρονικά ακολουθείται η διαδικασία:

1. Παράγεται ένας μονοβάθμιος ταλαντωτής ο οποίος προβλέπεται να έχει ισοδύναμη μάζα, ισοδύναμη φόρτιση και ισοδύναμη δυσκαμψία.
2. Εξισώνοντας το παραγόμενο έργο, την κινητική ενέργεια και την ενέργεια παραμορφώσεων του φορέα και του ταλαντωτή προκύπτουν τα απαραίτητα στοιχεία ισοδυναμίας.

Αυτά τα στοιχεία έχουν ερευνηθεί κατά τη διάρκεια των χρόνων και έχουν εξελιχθεί ώστε να καταφέρνουν να λαμβάνουν υπόψη διάφορες περίπλοκες συμπεριφορές των στοιχείων, όπως την πλάστιμη ή και τη σχοινοειδή τους συμπεριφορά (Σχήμα 5-6), καθώς και διάφορα είδη στήριξής τους.



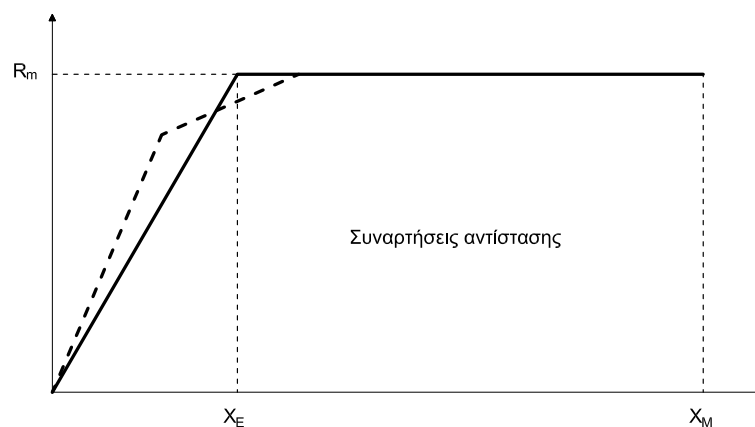
Σχήμα 5-6. Πλάστικη και σχοινοειδής συμπεριφορά φορέα.

Έτσι, προκύπτουν είτε μέσω υπολογισμών είτε από έτοιμους πίνακες τα ακόλουθα στοιχεία (με R τη συνάρτηση αντίστασης):

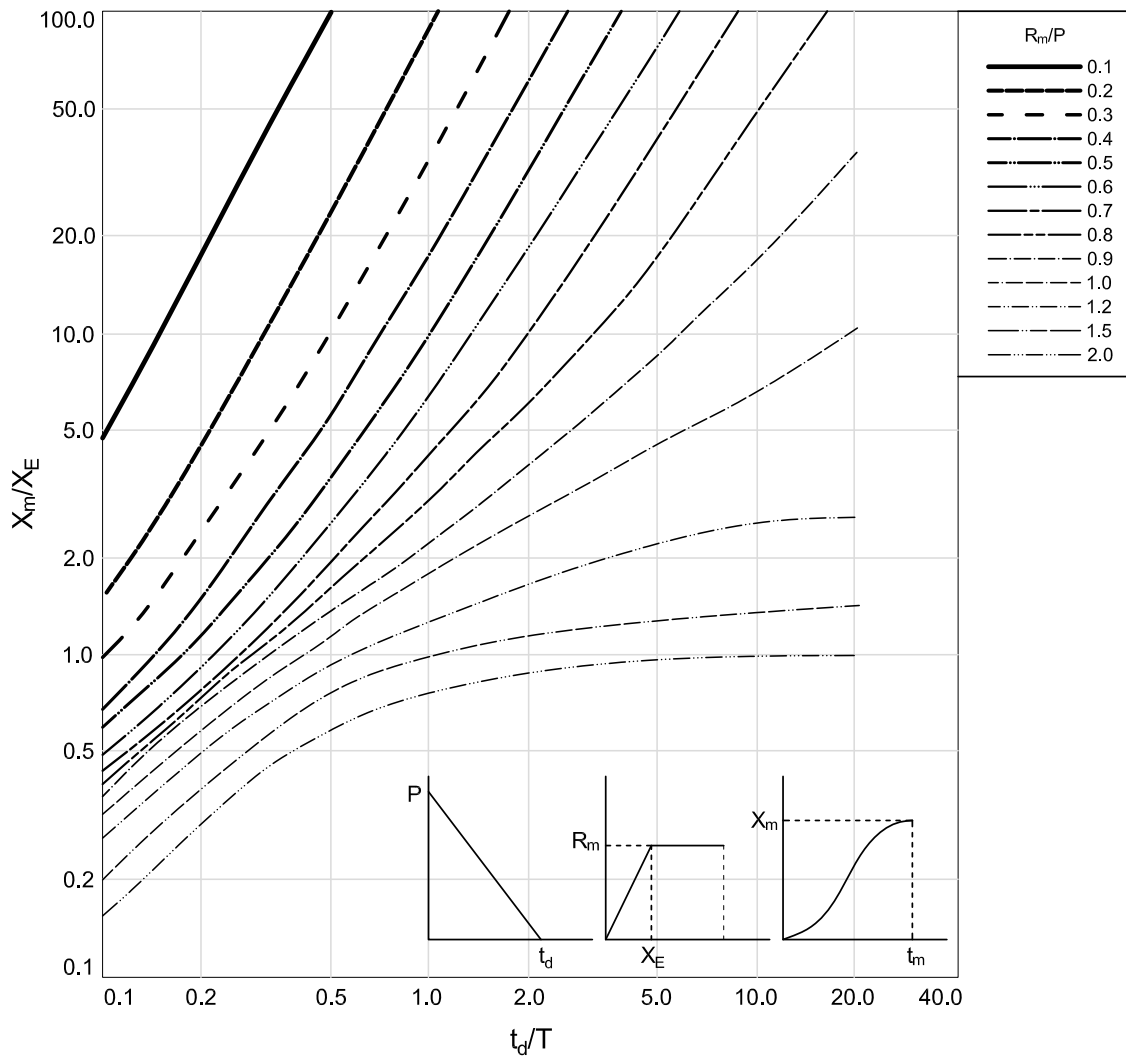
- Συντελεστής ισοδυναμίας φορτίου: $K_L = \frac{F_e}{F}$.
- Συντελεστής ισοδυναμίας στιβαρότητας: $K_S = \frac{k_e}{k}$.
- Συντελεστής ισοδυναμίας μάζας: $K_M = \frac{M_e}{M}$.
- Συντελεστής μετασχηματισμού φορτίου - μάζας: $K_{LM} = \frac{K_M}{K_L}$.
- Αντιδράσεις στήριξης: V . Πρόκειται για δυναμικές συν τω χρόνω αντιδράσεις, δηλαδή προκύπτουν μετά την επεξεργασία της χρονικά μεταβαλλόμενης δύναμης και την επίσης χρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση. Στον πίνακα παρουσιάζονται οι μέγιστες αντιδράσεις που εμφανίζονται σε κάποια χρονική στιγμή μετά την έκρηξη.

Τα K_S , K_L είναι ίσα μεταξύ τους λόγω του ότι υπό στατική φόρτιση ισχύει $F = k \cdot X$. Οπότε:

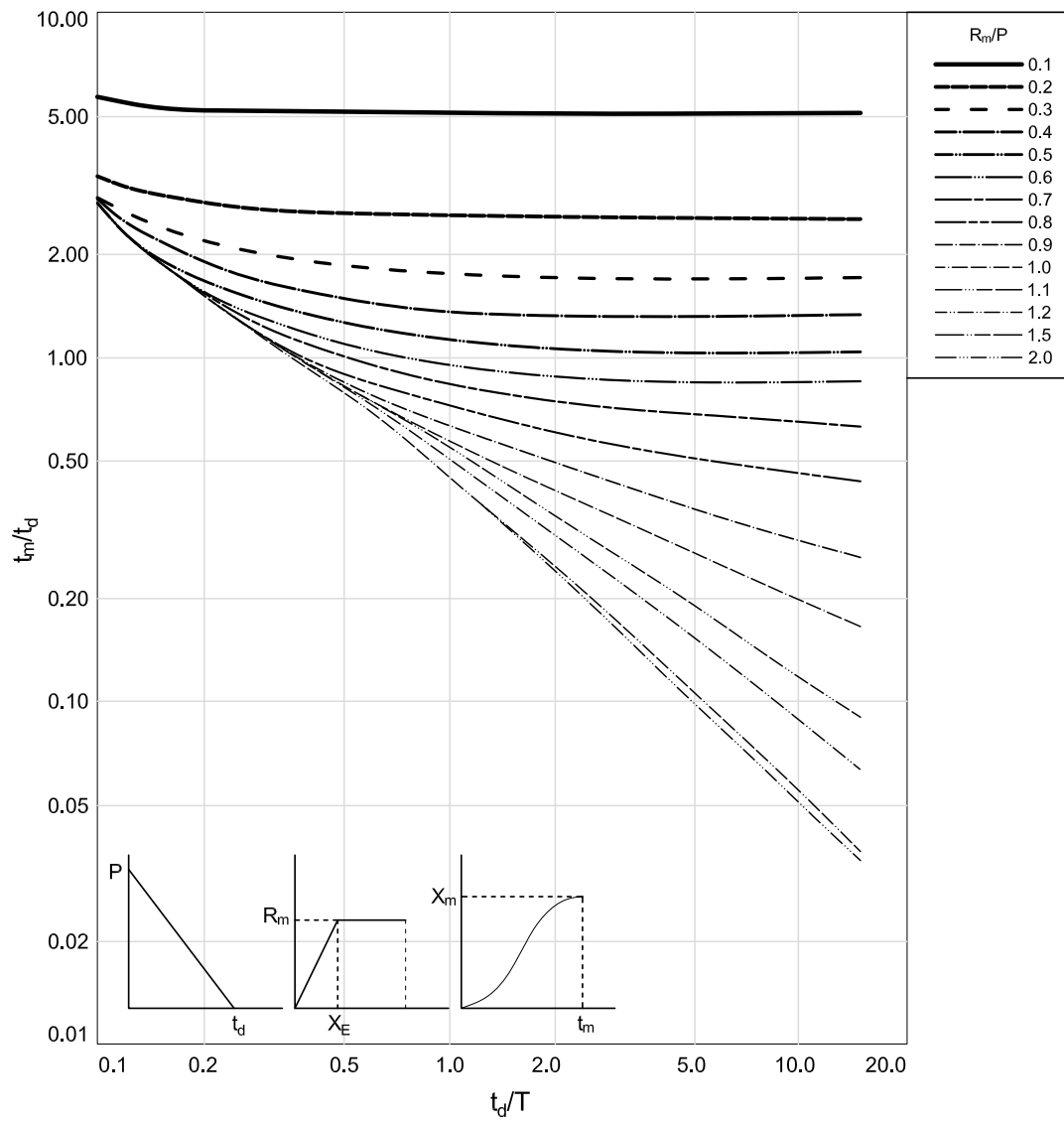
$$K_M \cdot M \cdot \ddot{x} + K_S \cdot k \cdot x = K_L \cdot F \rightarrow K_{LM} \cdot M \cdot \ddot{x} + k \cdot x = F \quad (5-10)$$



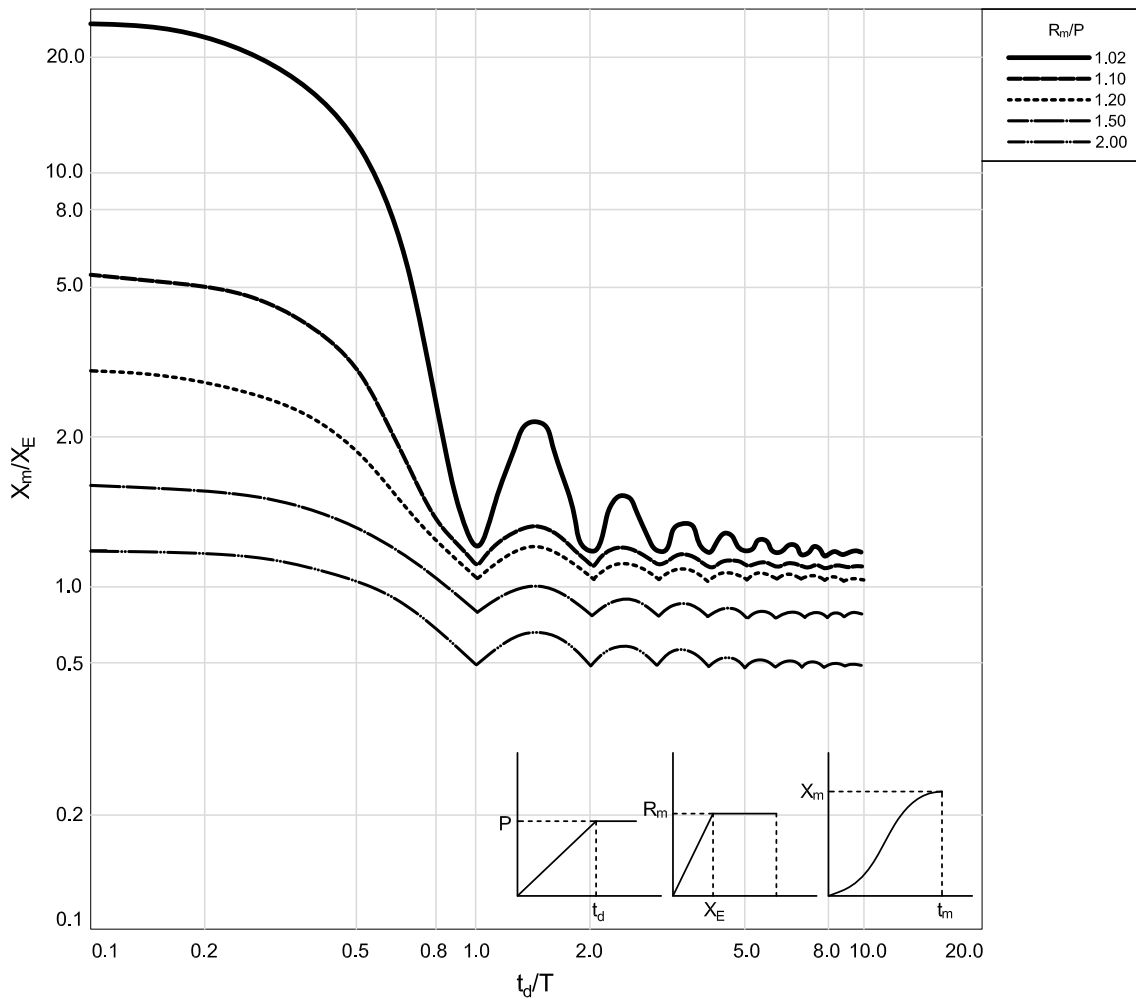
Σχήμα 5-7. Τυπικές συναρτήσεις αντίστασης.



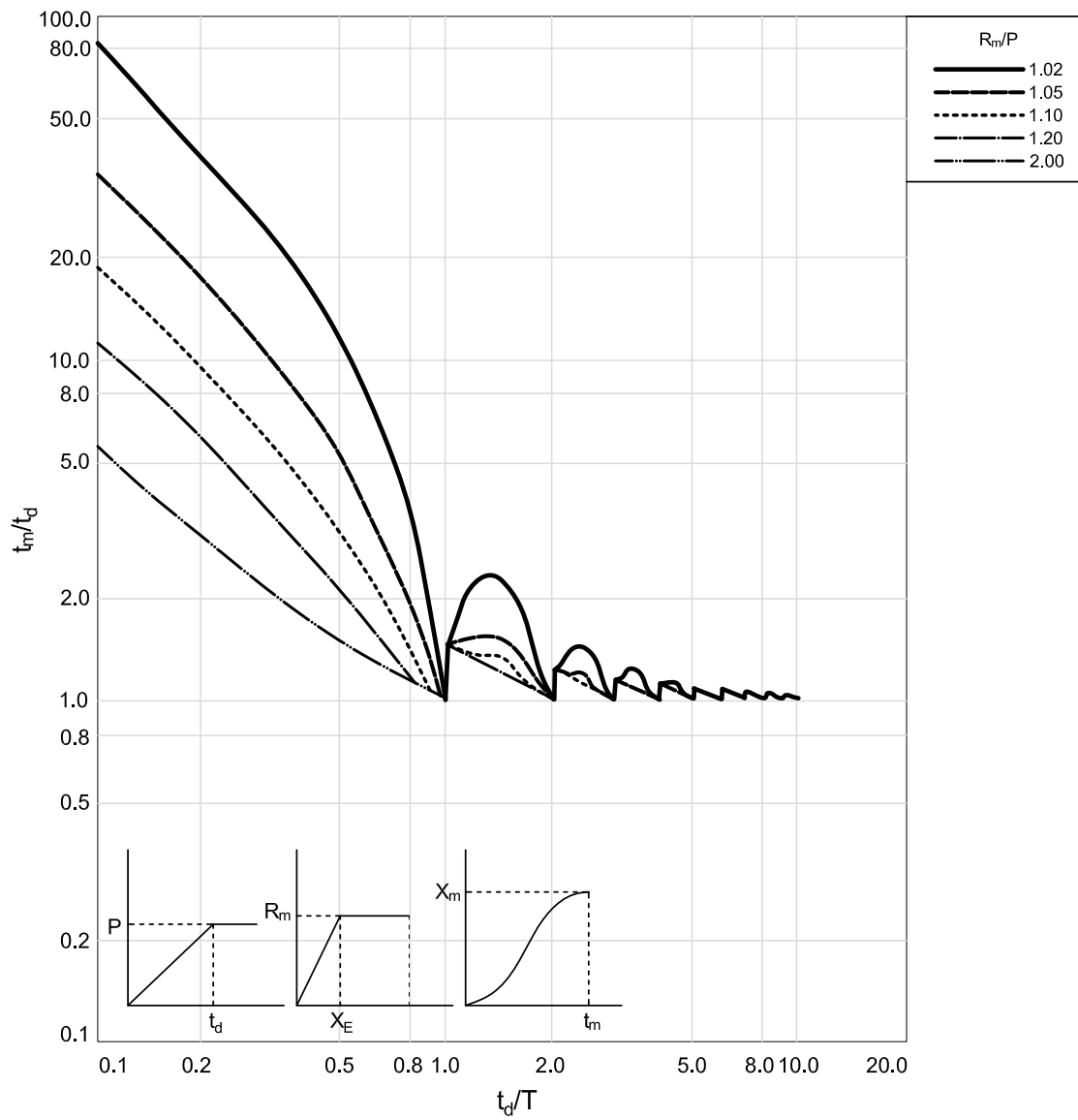
Σχήμα 5-8. Διάγραμμα μέγιστης μετακίνησης μονοβάθμιου ελαστοπλαστικού συστήματος υπό τριγωνική φόρτιση.



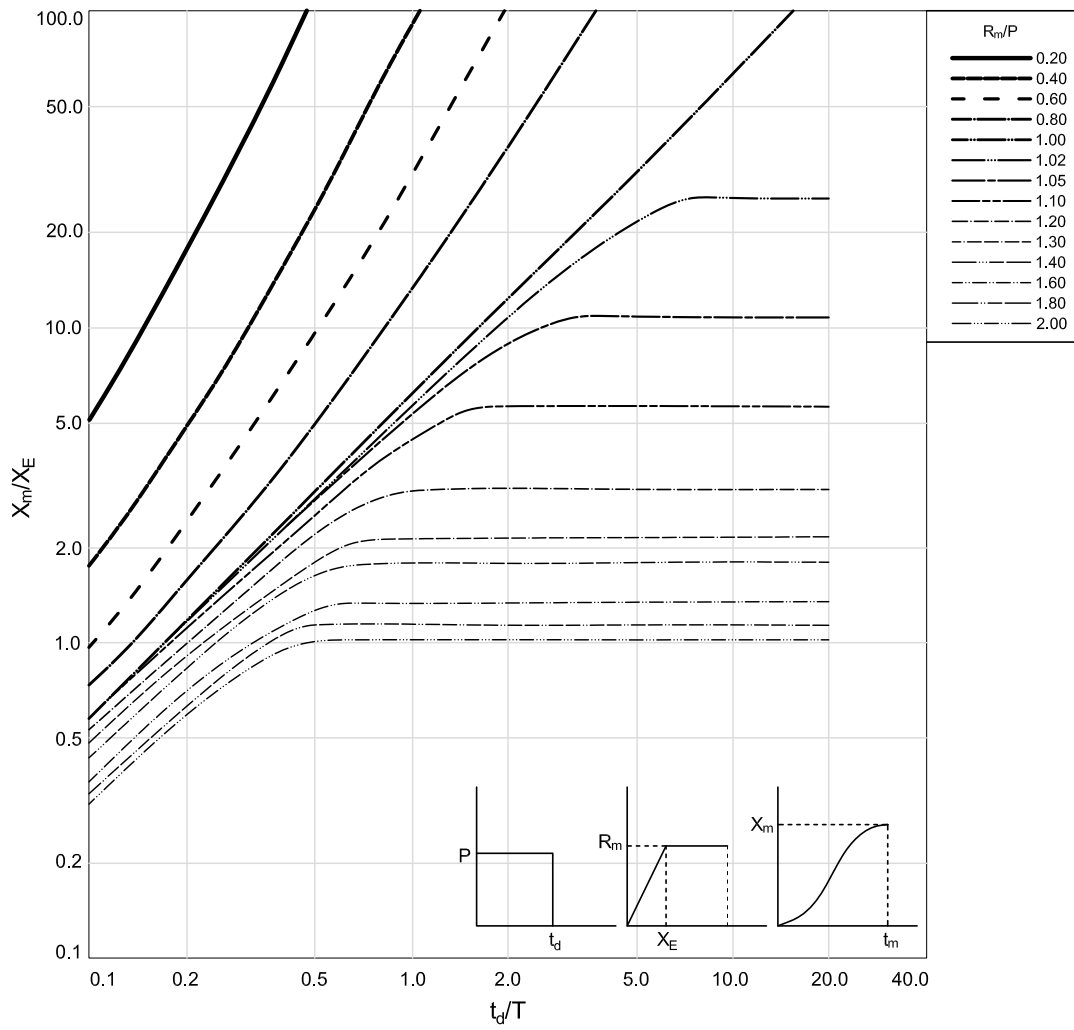
Σχήμα 5-9. Διάγραμμα χρόνου εμφάνισης μέγιστης μετακίνησης μονοβάθμιου ελαστοπλαστικού συστήματος υπό τριγωνική φόρτιση.



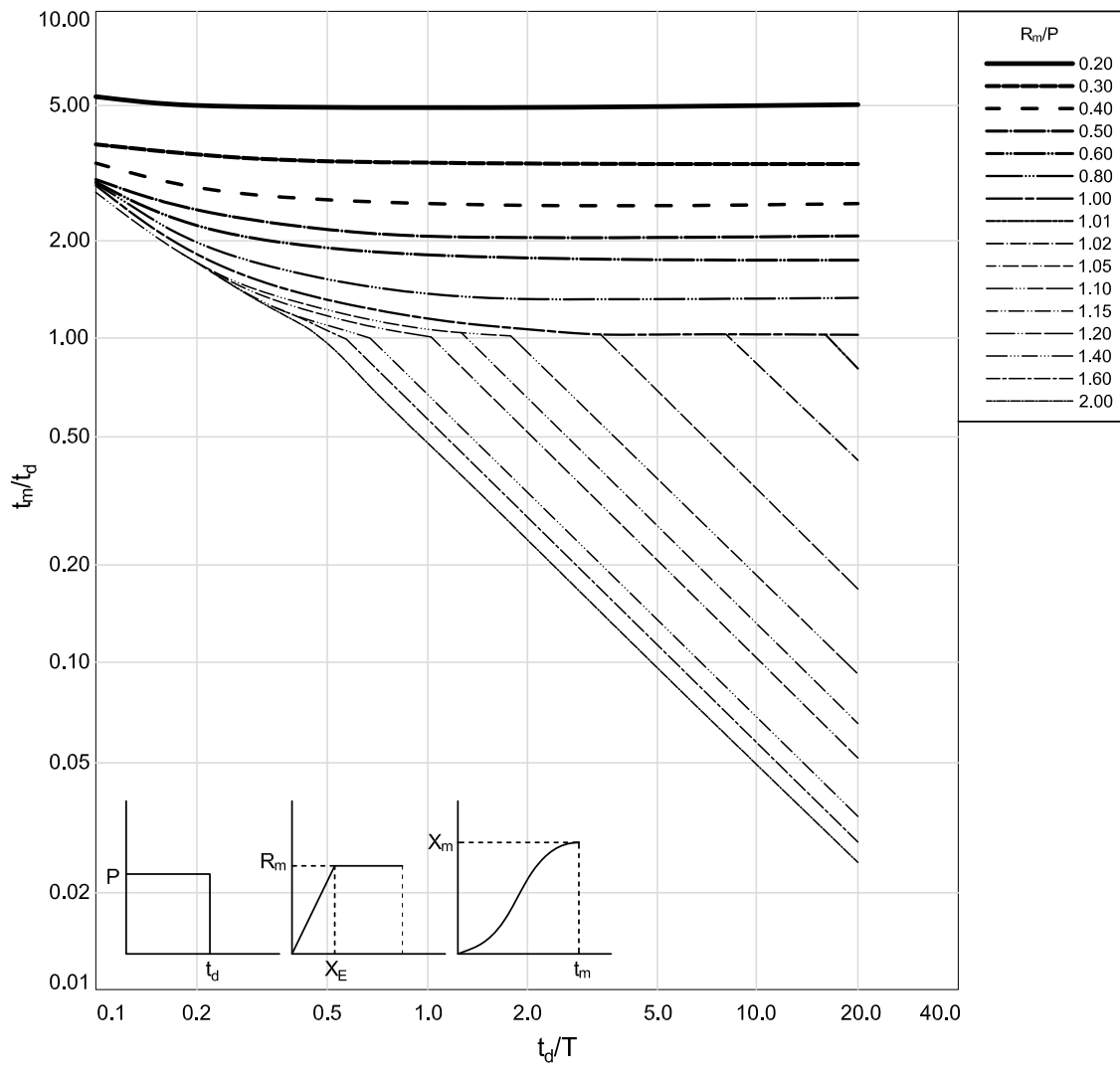
Σχήμα 5-10. Διάγραμμα μέγιστης μετακίνησης μονοβάθμιου ελαστοπλαστικού συστήματος υπό σταδιακά αυξανόμενη φόρτιση.



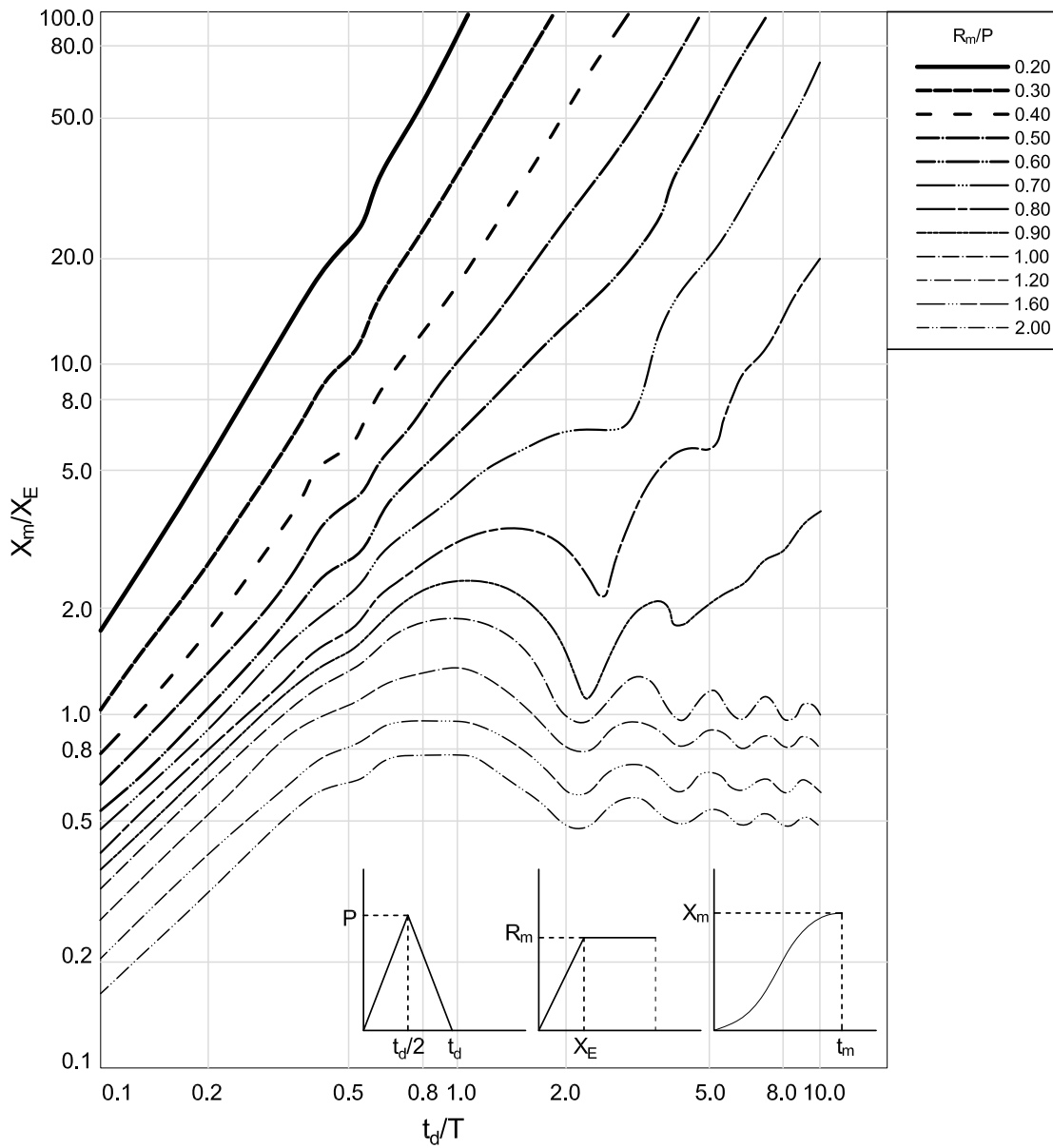
Σχήμα 5-11. Διάγραμμα χρόνου εμφάνισης μέγιστης μετακίνησης μονοβάθμιου ελαστοπλαστικού συστήματος υπό σταδιακά αυξανόμενη φόρτιση.



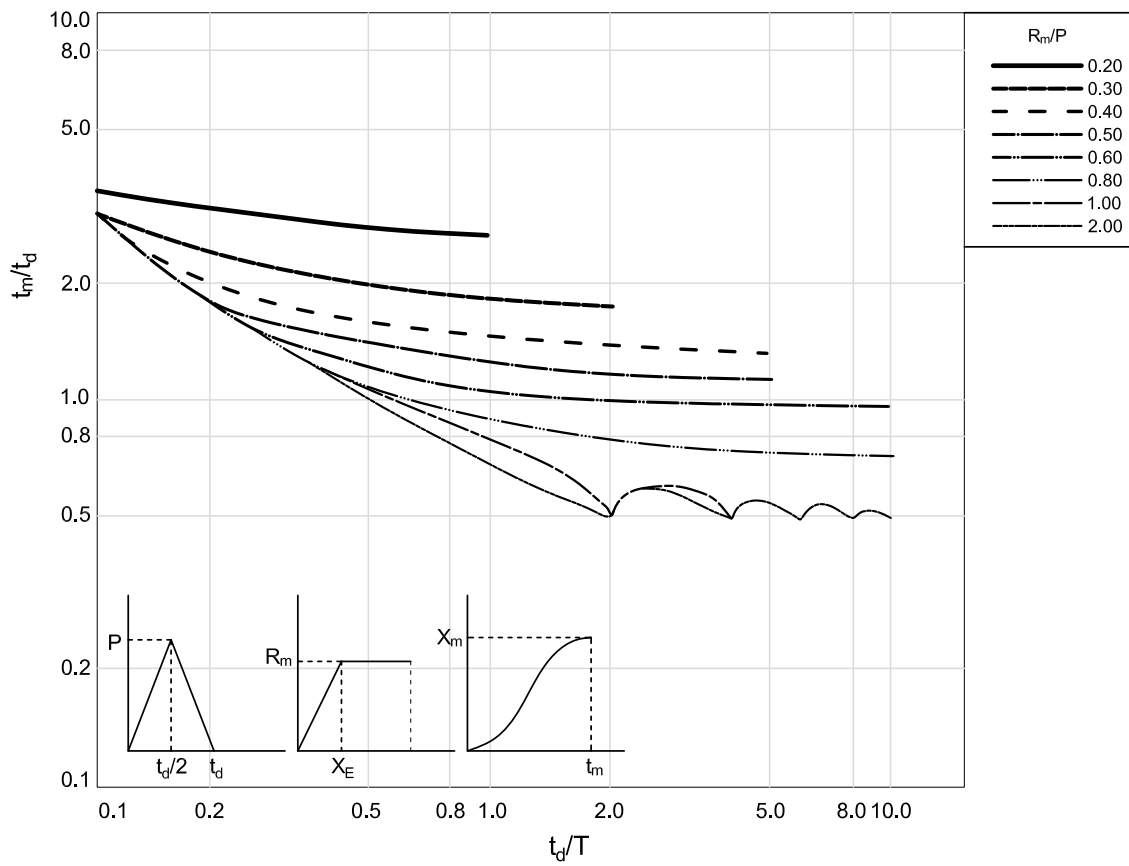
Σχήμα 5-12. Διάγραμμα μέγιστης μετακίνησης μονοβάθμιου ελαστοπλαστικού συστήματος υπό ορθογωνική φόρτιση.



Σχήμα 5-13. Διάγραμμα χρόνου εμφάνισης μέγιστης μετακίνησης μονοβάθμιου ελαστοπλαστικού συστήματος υπό ορθογωνική φόρτιση.



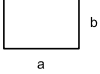
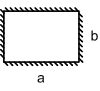
Σχήμα 5-14. Διάγραμμα μέγιστης μετακίνησης μονοβάθμιου ελαστοπλαστικού συστήματος υπό ισοσκελούς τριγωνική φόρτιση.



Σχήμα 5-15. Διάγραμμα χρόνου εμφάνισης μέγιστης μετακίνησης μονοβάθμιου ελαστοπλαστικού συστήματος υπό ισοσκελούς τριγωνική φόρτιση.

Φορτίο	Μάζα	Συμπεριφορά	K _κ	K _M	K _{CM}	R _n	k	k _E	V _s	v	V
		Ελαστική	0.64	0.50	0.78	$\frac{8M_{ps}}{L}$	$\frac{384EI}{5L^3}$	384EI	$\frac{R_n}{2}$	$R_n \left[\frac{1}{2d_s} \frac{1}{L} \right]$	0.39R+0.11F
		Πλαστική	0.50	0.33	0.66	$\frac{8M_{ps}}{L}$	0		$\frac{R_n}{2}$	$R_n \left[\frac{1}{2d_s} \frac{1}{L} \right]$	0.38R _n +0.12F
		Ελαστική	0.64	1.00	1.56	$\frac{8M_{ps}}{L}$	$\frac{384EI}{5L^3}$		$\frac{R_n}{2}$	$R_n \left[\frac{1}{2d_s} \frac{1}{L} \right]$	0.50R
		Πλαστική	0.50	1.00	2.00	$\frac{8M_{ps}}{L}$	0		$\frac{R_n}{2}$	$R_n \left[\frac{1}{2d_s} \frac{1}{L} \right]$	0.50R _n
		Ελαστική	1.00	0.49	0.49	$\frac{4M_{ps}}{L}$	$\frac{48EI}{L^3}$	48EI	$\frac{R_n}{2}$	$R_n \left[\frac{1}{2d_s} \frac{1}{L} \right]$	0.78R-0.28F
		Πλαστική	1.00	0.33	0.33	$\frac{4M_{ps}}{L}$	0		$\frac{R_n}{2}$	$R_n \left[\frac{1}{2d_s} \frac{1}{L} \right]$	0.75R _n -0.25F
		Ελαστική	1.00	1.00	1.00	$\frac{4M_{ps}}{L}$	$\frac{48EI}{L^3}$		$\frac{R_n}{2}$	$R_n \left[\frac{1}{2d_s} \frac{1}{L} \right]$	0.50R
		Πλαστική	1.00	1.00	1.00	$\frac{4M_{ps}}{L}$	0		$\frac{R_n}{2}$	$R_n \left[\frac{1}{2d_s} \frac{1}{L} \right]$	0.50R _n
		Ελαστική	0.87	0.50	0.58	$\frac{6M_{ps}}{L}$	$\frac{56.4EI}{L^3}$	56.4EI	$\frac{R_n}{2}$	$R_n \left[\frac{1}{2d_s} \frac{1}{L} \right]$	0.525R-0.025F
		Πλαστική	1.00	0.56	0.56	$\frac{6M_{ps}}{L}$	0		$\frac{R_n}{2}$	$R_n \left[\frac{1}{2d_s} \frac{1}{L} \right]$	0.52R _n -0.02F
		Ελαστική	0.87	0.76	0.87	$\frac{6M_{ps}}{L}$	$\frac{56.4EI}{L^3}$		$\frac{R_n}{2}$	$R_n \left[\frac{1}{2d_s} \frac{1}{L} \right]$	0.50R
		Πλαστική	1.00	1.00	1.00	$\frac{6M_{ps}}{L}$	0		$\frac{R_n}{2}$	$R_n \left[\frac{1}{2d_s} \frac{1}{L} \right]$	0.50R _n
		Ελαστική	0.53	0.41	0.77	$\frac{12M_{ps}}{L}$	$\frac{384EI}{L^3}$	307EI*	$\frac{R_n}{2}$	$R_n \left[\frac{1}{2d_s} \frac{1}{L} \right]$	0.36R+0.14F
		Ελαστοπλαστική	0.64	0.50	0.78	$\frac{8(M_{ps}+M_{psm})}{L}$	$\frac{384EI}{5L^3}$		$\frac{R_n}{2}$	$R_n \left[\frac{1}{2d_s} \frac{1}{L} \right]$	0.39R+0.11F
		Πλαστική	0.50	0.33	0.66	$\frac{8(M_{ps}+M_{psm})}{L}$	0		$\frac{R_n}{2}$	$R_n \left[\frac{1}{2d_s} \frac{1}{L} \right]$	0.38R _n +0.12F
		Ελαστική	0.53	1.00	1.88	$\frac{12M_{ps}}{L}$	$\frac{384EI}{L^3}$		$\frac{R_n}{2}$	$R_n \left[\frac{1}{2d_s} \frac{1}{L} \right]$	0.50R
		Ελαστοπλαστική	0.64	1.00	1.56	$\frac{8(M_{ps}+M_{psm})}{L}$	$\frac{384EI}{5L^3}$	192EI*	$\frac{R_n}{2}$	$R_n \left[\frac{1}{2d_s} \frac{1}{L} \right]$	0.50R
		Πλαστική	0.50	1.00	2.00	$\frac{8(M_{ps}+M_{psm})}{L}$	0		$\frac{R_n}{2}$	$R_n \left[\frac{1}{2d_s} \frac{1}{L} \right]$	0.50R _n
		Ελαστική	1.00	0.37	0.37	$\frac{4(M_{ps}+M_{psm})}{L}$	$\frac{192EI}{L^3}$		$\frac{R_n}{2}$	$R_n \left[\frac{1}{2d_s} \frac{1}{L} \right]$	0.71R-0.21F
		Πλαστική	1.00	0.33	0.33	$\frac{4(M_{ps}+M_{psm})}{L}$	0		$\frac{R_n}{2}$	$R_n \left[\frac{1}{2d_s} \frac{1}{L} \right]$	0.75R _n -0.25F
		Ελαστική	1.00	1.00	1.00	$\frac{4(M_{ps}+M_{psm})}{L}$	$\frac{192EI}{L^3}$	192EI*	$\frac{R_n}{2}$	$R_n \left[\frac{1}{2d_s} \frac{1}{L} \right]$	0.50R
		Πλαστική	1.00	1.00	1.00	$\frac{4(M_{ps}+M_{psm})}{L}$	0		$\frac{R_n}{2}$	$R_n \left[\frac{1}{2d_s} \frac{1}{L} \right]$	0.50R _n
		Ελαστική	1.00	1.00	1.00	$\frac{4(M_{ps}+M_{psm})}{L}$	$\frac{192EI}{L^3}$		$\frac{R_n}{2}$	$R_n \left[\frac{1}{2d_s} \frac{1}{L} \right]$	0.50R
		Πλαστική	1.00	1.00	1.00	$\frac{4(M_{ps}+M_{psm})}{L}$	0		$\frac{R_n}{2}$	$R_n \left[\frac{1}{2d_s} \frac{1}{L} \right]$	0.50R _n
		Ελαστική	0.58	0.45	0.78	$\frac{8M_{ps}}{L}$	$\frac{185EI}{L^3}$	160EI*	$V_{s1} = \frac{3R_n}{8} V_{s2} = \frac{5R_n}{8}$	$v_1 = R_n \left[\frac{3}{8d_s} \frac{1}{L} \right] v_2 = R_n \left[\frac{5}{8d_s} \frac{1}{L} \right]$	$V_1 = 0.26R + 0.12F V_2 = 0.43R + 0.19F$
		Ελαστοπλαστική	0.64	0.50	0.78	$\frac{4(M_{ps}+2M_{psm})}{L}$	$\frac{384EI}{5L^3}$		$V_{s1} = \frac{3R_n}{8} V_{s2} = \frac{5R_n}{8}$	$v_1 = R_n \left[\frac{3}{8d_s} \frac{1}{L} \right] v_2 = R_n \left[\frac{5}{8d_s} \frac{1}{L} \right]$	$V = 0.39R + 0.11F \frac{M_{ps}}{L}$
		Πλαστική	0.50	0.33	0.66	$\frac{4(M_{ps}+2M_{psm})}{L}$	0		$V_{s1} = \frac{3R_n}{8} V_{s2} = \frac{5R_n}{8}$	$v_1 = R_n \left[\frac{3}{8d_s} \frac{1}{L} \right] v_2 = R_n \left[\frac{5}{8d_s} \frac{1}{L} \right]$	$V = 0.38R_n + 0.12F \frac{M_{ps}}{L}$
		Ελαστική	0.58	1.00	1.73	$\frac{8M_{ps}}{L}$	$\frac{185EI}{L^3}$		$V_{s1} = \frac{3R_n}{8} V_{s2} = \frac{5R_n}{8}$	$v_1 = R_n \left[\frac{3}{8d_s} \frac{1}{L} \right] v_2 = R_n \left[\frac{5}{8d_s} \frac{1}{L} \right]$	$V = 0.375R V_2 = 0.625R$
		Ελαστοπλαστική	0.64	1.00	1.56	$\frac{4(M_{ps}+2M_{psm})}{L}$	$\frac{384EI}{5L^3}$	160EI*	$V_{s1} = \frac{3R_n}{8} V_{s2} = \frac{5R_n}{8}$	$v_1 = R_n \left[\frac{3}{8d_s} \frac{1}{L} \right] v_2 = R_n \left[\frac{5}{8d_s} \frac{1}{L} \right]$	$V = 0.50R \frac{M_{ps}}{L}$
		Πλαστική	0.50	1.00	2.00	$\frac{4(M_{ps}+2M_{psm})}{L}$	0		$V_{s1} = \frac{3R_n}{8} V_{s2} = \frac{5R_n}{8}$	$v_1 = R_n \left[\frac{3}{8d_s} \frac{1}{L} \right] v_2 = R_n \left[\frac{5}{8d_s} \frac{1}{L} \right]$	$V = 0.50R_n \frac{M_{ps}}{L}$
		Ελαστική	1.00	0.43	0.43	$\frac{16M_{ps}}{3L}$	$\frac{107EI}{L^3}$		$V_{s1} = \frac{5R_n}{16} V_{s2} = \frac{11R_n}{16}$	$v_1 = \frac{5R_n}{16d_s} v_2 = \frac{11R_n}{16d_s}$	$V_1 = 0.25R + 0.07F V_2 = 0.54R + 0.14F$
		Πλαστική	1.00	0.33	0.33	$\frac{2(M_{ps}+2M_{psm})}{L}$	0		$V_{s1} = \frac{5R_n}{16} V_{s2} = \frac{11R_n}{16}$	$v_1 = \frac{5R_n}{16d_s} v_2 = \frac{11R_n}{16d_s}$	$V = 0.78R - 0.28F \frac{M_{ps}}{L}$
		Ελαστική	1.00	1.00	1.00	$\frac{16M_{ps}}{3L}$	$\frac{107EI}{L^3}$	106EI*	$V_{s1} = \frac{5R_n}{16} V_{s2} = \frac{11R_n}{16}$	$v_1 = \frac{5R_n}{16d_s} v_2 = \frac{11R_n}{16d_s}$	$V = 0.75R_n - 0.25F \frac{M_{ps}}{L}$
		Πλαστική	1.00	1.00	1.00	$\frac{2(M_{ps}+2M_{psm})}{L}$	0		$V_{s1} = \frac{5R_n}{16} V_{s2} = \frac{11R_n}{16}$	$v_1 = \frac{5R_n}{16d_s} v_2 = \frac{11R_n}{16d_s}$	$V_1 = 0.375R V_2 = 0.625R$
		Ελαστική	1.00	1.00	1.00	$\frac{16M_{ps}}{3L}$	$\frac{107EI}{L^3}$		$V_{s1} = \frac{5R_n}{16} V_{s2} = \frac{11R_n}{16}$	$v_1 = \frac{5R_n}{16d_s} v_2 = \frac{11R_n}{16d_s}$	$V = 0.50R \frac{M_{ps}}{L}$
		Πλαστική	1.00	1.00	1.00	$\frac{2(M_{ps}+2M_{psm})}{L}$	0		$V_{s1} = \frac{5R_n}{16} V_{s2} = \frac{11R_n}{16}$	$v_1 = \frac{5R_n}{16d_s} v_2 = \frac{11R_n}{16d_s}$	$V = 0.50R_n \frac{M_{ps}}{L}$
		Ελαστική	0.81	0.45	0.55	$\frac{6M_{ps}}{L}$	$\frac{132EI}{L^3}$	122EI*	$V_{s1} = \frac{R_n}{3} V_{s2} = \frac{2R_n}{3}$	$v_1 = \frac{R_n}{3d_s} v_2 = \frac{2R_n}{3d_s}$	$V_1 = 0.17R + 0.17F V_2 = 0.33R + 0.33F$
		Ελαστοπλαστική	0.87	0.52	0.60	$\frac{2(M_{ps}+3M_{psm})}{L}$	$\frac{56EI}{L^3}$		$V_{s1} = \frac{R_n}{3} V_{s2} = \frac{2R_n}{3}$	$v_1 = \frac{R_n}{3d_s} v_2 = \frac{2R_n}{3d_s}$	$V = 0.525R - 0.025F \frac{M_{ps}}{L}$
		Πλαστική	1.00	0.56	0.56	$\frac{2(M_{ps}+3M_{psm})}{L}$	0		$V_{s1} = \frac{R_n}{3} V_{s2} = \frac{2R_n}{3}$	$v_1 = \frac{R_n}{3d_s} v_2 = \frac{2R_n}{3d_s}$	$V = 0.52R_n - 0.02F \frac{M_{ps}}{L}$
		Ελαστική	0.81	0.67	0.83	$\frac{6M_{ps}}{L}$	$\frac{132EI}{L^3}$		$V_{s1} = \frac{R_n}{3} V_{s2} = \frac{2R_n}{3}$	$v_1 = \frac{R_n}{3d_s} v_2 = \frac{2R_n}{3d_s}$	$V_1 = 0.375R V_2 = 0.625R$
		Ελαστοπλαστική	0.87	0.76	0.87	$\frac{2(M_{ps}+3M_{psm})}{L}$	$\frac{56EI}{L^3}$	122EI*	$V_{s1} = \frac{R_n}{3} V_{s2} = \frac{2R_n}{3}$	$v_1 = \frac{R_n}{3d_s} v_2 = \frac{2R_n}{3d_s}$	$V = 0.50R \frac{M_{ps}}{L}$
		Πλαστική	1.00	1.00	1.00	$\frac{2(M_{ps}+3M_{psm})}{L}$	0		$V_{s1} = \frac{R_n}{3} V_{s2} = \frac{2R_n}{3}$	$v_1 = \frac{R_n}{3d_s} v_2 = \frac{2R_n}{3d_s}$	$V = 0.50R_n \frac{M_{ps}}{L}$
		Ελαστική	0.40	0.26	0.65	$\frac{2M_{ps}}{L}$	$\frac{8EI}{L^3}$		$V_{s1} = \frac{R_n}{3} V_{s2} = \frac{2R_n}{3}$	$v_1 = \frac{R_n}{3d_s} v_2 = \frac{2R_n}{3d_s}$	$V = 0.69R + 0.31F$
		Πλαστική	0.50	0.33	0.66	$\frac{2M_{ps}}{L}$	0		$V_{s1} = \frac{R_n}{3} V_{s2} = \frac{2R_n}{3}$	$v_1 = \frac{R_n}{3d_s} v_2 = \frac{2R_n}{3d_s}$	$V = 0.75R_n + 0.25F$
		Ελαστική	0.40	1.00	2.50	$\frac{2M_{ps}}{L}$	$\frac{8EI}{L^3}$	8EI	R_n	$R_n \left[\frac{1}{d_s} \frac{1}{L} \right]$	0.50R+0.50F
		Πλαστική	0.50	1.00	2.00	$\frac{2M_{ps}}{L}$	0		R_n	$R_n \left[\frac{1}{d_s} \frac{1}{L} \right]$	0.50R _n +0.50F
		Ελαστική	1.00	0.24	0.24	$\frac{M_{ps}}{L}$	$\frac{3EI}{L^3}$		R_n	$R_n \left[\frac{1}{d_s} \frac{1}{L} \right]$	1.74R-0.74F
		Πλαστική	1.00	0.33	0.33	$\frac{M_{ps}}{L}$	0		R_n	$R_n \left[\frac{1}{d_s} \frac{1}{L} \right]$	1.50R _n -0.50F
		Ελαστική	1.00	1.00	1.00	$\frac{M_{ps}}{L}$	$\frac{3EI}{L^3}$	3EI	R_n	$R_n \left[\frac{1}{d_s} \frac{1}{L} \right]$	1.00R
		Πλαστική	1.00	1.00	1.00	$\frac{M_{ps}}{L}$	0		R_n	$R_n \left[\frac{1}{d_s} \frac{1}{L} \right]$	1.00R _n
		Ελαστική	1.00	1.00	1.00	$\frac{M_{ps}}{L}$	$\frac{3EI}{L^3}$		R_n	$R_n \left[\frac{1}{d_s} \frac{1}{L} \right]$	1.00R
		Πλαστική	1.00	1.00	1.00	$\frac{M_{ps}}{L}$	0		R_n	$R_n \left[\frac{1}{d_s} \frac{1}{L} \right]$	1.00R _n

Πίνακας 5-1. Στοιχεία ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή για δοκούς
 (*Μόνο για M_{ps}=M_{pm}, s support – m midspan).

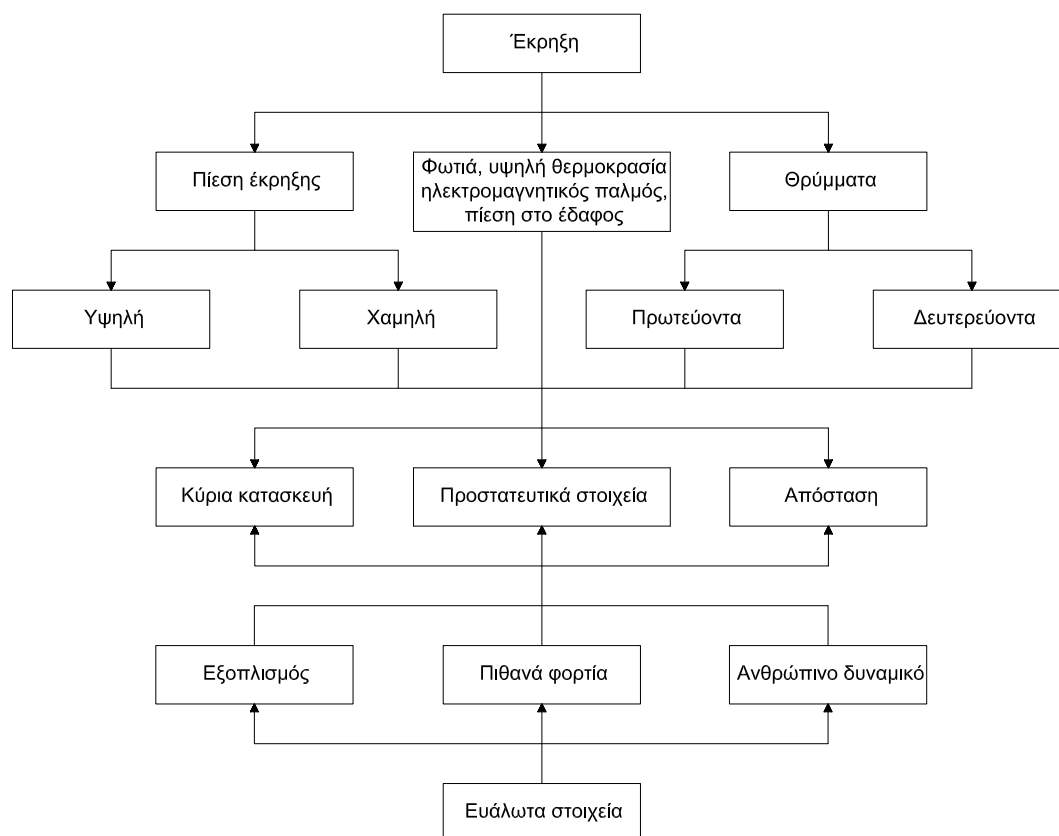
Είδος	Μάζα	Συμπεριφορά	a/b	K _L	K _M	K _{LM}	R _m	k	V
Απλή έδραση 	Κατανεμημένη	Ελαστική	1.00	0.46	0.31	0.67	$\frac{12}{a}(M_{pa}+M_{pb})$	$\frac{252EI}{a^2}$	$V_A=0.07F+0.18R$ $V_B=0.07F+0.18R$
			0.90	0.47	0.33	0.70	$\frac{1}{a}(12M_{pa}+11.0M_{pb})$	$\frac{230EI}{a^2}$	$V_A=0.06F+0.16R$ $V_B=0.08F+0.20R$
			0.80	0.49	0.35	0.71	$\frac{1}{a}(12M_{pa}+10.3M_{pb})$	$\frac{212EI}{a^2}$	$V_A=0.06F+0.14R$ $V_B=0.08F+0.22R$
			0.70	0.51	0.37	0.73	$\frac{1}{a}(12M_{pa}+9.8M_{pb})$	$\frac{201EI}{a^2}$	$V_A=0.05F+0.13R$ $V_B=0.08F+0.22R$
			0.60	0.53	0.39	0.74	$\frac{1}{a}(12M_{pa}+9.3M_{pb})$	$\frac{197EI}{a^2}$	$V_A=0.04F+0.11R$ $V_B=0.09F+0.26R$
			0.50	0.55	0.41	0.75	$\frac{1}{a}(12M_{pa}+9.0M_{pb})$	$\frac{201EI}{a^2}$	$V_A=0.04F+0.09R$ $V_B=0.09F+0.28R$
		Πλαστική	1.00	0.33	0.17	0.51	$\frac{12}{a}(M_{pa}+M_{pb})$	0.00	$V_A=0.09F+0.16R_m$ $V_B=0.09F+0.16R_m$
			0.90	0.35	0.18	0.51	$\frac{1}{a}(12M_{pa}+11.0M_{pb})$	0.00	$V_A=0.08F+0.15R_m$ $V_B=0.09F+0.18R_m$
			0.80	0.37	0.20	0.54	$\frac{1}{a}(12M_{pa}+10.3M_{pb})$	0.00	$V_A=0.07F+0.13R_m$ $V_B=0.10F+0.20R_m$
			0.70	0.38	0.22	0.58	$\frac{1}{a}(12M_{pa}+9.8M_{pb})$	0.00	$V_A=0.06F+0.12R_m$ $V_B=0.10F+0.22R_m$
			0.60	0.40	0.23	0.58	$\frac{1}{a}(12M_{pa}+9.3M_{pb})$	0.00	$V_A=0.05F+0.10R_m$ $V_B=0.10F+0.25R_m$
			0.50	0.42	0.25	0.59	$\frac{1}{a}(12M_{pa}+9.0M_{pb})$	0.00	$V_A=0.04F+0.08R_m$ $V_B=0.11F+0.27R_m$
Έδραση πάκτωσης 	Κατανεμημένη	Ελαστική	1.00	0.33	0.21	0.63	$29.2M_{sb}^p$	$\frac{810EI}{a^2}$	$V_A=0.10F+0.15R$ $V_B=0.10F+0.15R$
			0.90	0.34	0.23	0.68	$27.4M_{sb}^p$	$\frac{742EI}{a^2}$	$V_A=0.09F+0.14R$ $V_B=0.10F+0.17R$
			0.80	0.36	0.25	0.69	$26.4M_{sb}^p$	$\frac{705EI}{a^2}$	$V_A=0.08F+0.12R$ $V_B=0.11F+0.19R$
			0.70	0.38	0.27	0.71	$26.2M_{sb}^p$	$\frac{692EI}{a^2}$	$V_A=0.07F+0.11R$ $V_B=0.11F+0.21R$
			0.60	0.41	0.29	0.71	$27.3M_{sb}^p$	$\frac{724EI}{a^2}$	$V_A=0.06F+0.09R$ $V_B=0.12F+0.23R$
			0.50	0.43	0.31	0.72	$30.2M_{sb}^p$	$\frac{806EI}{a^2}$	$V_A=0.05F+0.08R$ $V_B=0.12F+0.25R$
		Ελαστοπλαστική	1.00	0.46	0.31	0.67	$\frac{1}{a}[12(M_{pa}+M_{psa})+12.0(M_{pfb}+M_{psb})]$	$\frac{252EI}{a^2}$	$V_A=0.07F+0.18R$ $V_B=0.07F+0.18R$
			0.90	0.47	0.33	0.70	$\frac{1}{a}[12(M_{pa}+M_{psa})+11.0(M_{pfb}+M_{psb})]$	$\frac{230EI}{a^2}$	$V_A=0.06F+0.16R$ $V_B=0.08F+0.20R$
			0.80	0.49	0.35	0.71	$\frac{1}{a}[12(M_{pa}+M_{psa})+10.3(M_{pfb}+M_{psb})]$	$\frac{212EI}{a^2}$	$V_A=0.06F+0.14R$ $V_B=0.08F+0.22R$
			0.70	0.51	0.37	0.73	$\frac{1}{a}[12(M_{pa}+M_{psa})+9.8(M_{pfb}+M_{psb})]$	$\frac{201EI}{a^2}$	$V_A=0.05F+0.13R$ $V_B=0.08F+0.24R$
			0.60	0.53	0.39	0.74	$\frac{1}{a}[12(M_{pa}+M_{psa})+9.3(M_{pfb}+M_{psb})]$	$\frac{197EI}{a^2}$	$V_A=0.04F+0.11R$ $V_B=0.09F+0.26R$
			0.50	0.55	0.41	0.75	$\frac{1}{a}[12(M_{pa}+M_{psa})+9.0(M_{pfb}+M_{psb})]$	$\frac{201EI}{a^2}$	$V_A=0.04F+0.09R$ $V_B=0.09F+0.28R$
		Πλαστική	1.00	0.33	0.17	0.51	$\frac{1}{a}[12(M_{pa}+M_{psa})+12.0(M_{pfb}+M_{psb})]$	0.00	$V_A=0.09F+0.16R_m$ $V_B=0.09F+0.16R_m$
			0.90	0.35	0.18	0.51	$\frac{1}{a}[12(M_{pa}+M_{psa})+11.0(M_{pfb}+M_{psb})]$	0.00	$V_A=0.08F+0.15R_m$ $V_B=0.09F+0.18R_m$
			0.80	0.37	0.20	0.54	$\frac{1}{a}[12(M_{pa}+M_{psa})+10.3(M_{pfb}+M_{psb})]$	0.00	$V_A=0.07F+0.13R_m$ $V_B=0.10F+0.20R_m$
			0.70	0.38	0.22	0.58	$\frac{1}{a}[12(M_{pa}+M_{psa})+9.8(M_{pfb}+M_{psb})]$	0.00	$V_A=0.06F+0.12R_m$ $V_B=0.10F+0.22R_m$
			0.60	0.40	0.23	0.58	$\frac{1}{a}[12(M_{pa}+M_{psa})+9.3(M_{pfb}+M_{psb})]$	0.00	$V_A=0.05F+0.10R_m$ $V_B=0.10F+0.25R_m$
			0.50	0.42	0.25	0.59	$\frac{1}{a}[12(M_{pa}+M_{psa})+9.0(M_{pfb}+M_{psb})]$	0.00	$V_A=0.04F+0.08R_m$ $V_B=0.11F+0.27R_m$

Πίνακας 5-2. Στοιχεία ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή για πλάκες.

Εναλλακτικά δομικά στοιχεία με διάφορες συνθήκες στήριξης υπάρχουν σε αφθονία στο [7].

6 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΝΑΝΤΙ ΕΚΡΗΞΕΩΝ

Ο σχεδιασμός κατά των εκρήξεων έχει να κάνει με διάφορα στοιχεία που αλληλεμπλέκονται μεταξύ τους και συνοψίζονται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Σχήμα 6-1. Στοιχεία σχεδιασμού έναντι εκρήξεων.

6.1 Προπαρασκευαστικό στάδιο

Για να επιτευχθεί ο σχεδιασμός της κατασκευής επιδιώκεται η σύσταση ενός πλάνου δράσης προκειμένου να υπολογιστούν τα φορτία που επενεργούν στην κατασκευή υπό τα εξής βήματα:

1. Εκτίμηση σεναρίου έκρηξης βάσει γεωμετρίας κατασκευής, πιθανών εμποδίων και κυκλοφορούντων οχημάτων, όπου προσδιορίζεται το είδος της εκρηκτικής ύλης, η απόστασή της από την κατασκευή, το μέγεθός της μέσα από τον όγκο του οχήματος. Σε περίπτωση που είναι πολλά τα σενάρια έκρηξης, εκτελούνται τα δυσμενέστερα εκ των σεναρίων.
2. Διακριτοποίηση της κατασκευής ώστε να υπολογιστούν τα εκρηκτικά φορτία σε διαφορετικά σημεία. Τα διάφορα σημεία θα έχουν διαφορετικά φορτία λόγω της διαφορετικής γεωμετρίας της κατασκευής.
3. Υπολογισμός του ισοδύναμου φορτίου TNT.
4. Υπολογισμός της κλιμακωτής απόστασης και αντιστοίχιση στα διαγράμματα με ανάλογη προσαρμογή στις επιφάνειες της κατασκευής (αν πρόκειται για μπροστινή όψη, πίσω όψη κ.τ.λ.) ή χρήση κατάλληλου λογισμικού.
5. Εκτίμηση τελικού φορτίου κάθε μέρους της κατασκευής και μορφής φορτίου, δηλαδή αν θα είναι τριγωνικό ή όχι.

6.2 Σχεδιασμός χαλύβδινων στοιχείων

Ο σχεδιασμός χαλύβδινων κατασκευών έναντι έκρηξης αποτελεί μια γενική περίπτωση αφού μεγάλη μερίδα των έργων δημοσίας χρήσης (που έχουν μεγαλύτερο κίνδυνο τρομοκρατικής επίθεσης) έχουν υλοποιηθεί με τη χρήση δομικού χάλυβα.

Οι βασικές διαφοροποιήσεις του σχεδιασμού του δομικού χάλυβα έναντι έκρηξης σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις είναι:

- Αύξηση της αντοχής του δομικού χάλυβα.
- Υποχρεωτική ανάγκη πλαστιμότητας.
- Όρια παραμορφώσεων.
- Μέθοδοι υπολογισμού διατομών.
- Διαφορετική στατική λειτουργία έναντι έκρηξης.

6.2.1 Αύξηση της αντοχής του δομικού χάλυβα

Ο δομικός χάλυβας εμφανίζει έναντι έντονης δυναμικής φόρτισης αυξημένη αντοχή. Αυτή η αντοχή παρουσιάζεται ως δυναμική αντοχή χάλυβα. Αυτή η αύξηση αντοχής έγκειται τόσο στην αύξηση της αντοχής θραύσης όσο και στην αύξηση της αντοχής διαρροής ενώ το μέτρο ελαστικότητας και το όριο πλαστικών στρωφών δεν φαίνεται να μεταβάλλονται. Η αύξηση της στατικής αντοχής στα επίπεδα της δυναμικής αντοχής γίνεται μέσω του δυναμικού συντελεστή αύξησης (Dynamic increase factor – DIF). Αυτός ποικίλλει ανάλογα με το είδος του χρησιμοποιηθέντος χάλυβα και κάθε φορά θα πρέπει να αναζητείται ή να προσεγγίζεται προς την πλευρά της ασφαλείας. Διαφέρει ως προς το εάν πρόκειται για τον υπολογισμό της αντοχής θραύσης ή της αντοχής διαρροής, για κάμψη, διάτμηση, θλίψη ή εφελκυσμό και σχετίζεται άμεσα με τον ρυθμό παραμόρφωσης.

Ενώ, επιπλέον, υπάρχει και ο συντελεστής αύξησης αντοχής που έχει να κάνει με το γεγονός ότι η αντοχή που λαμβάνεται υπόψιν στον σχεδιασμό είναι χαμηλότερη της πραγματικής (Strength increase factor – SIF). Τα UFC 3-340-02 ορίζουν ότι στην περίπτωση του δομικού χάλυβα ο SIF μπορεί να ληφθεί ίσος με 1.10 για χάλυβα αντοχής έως και 355MPa ενώ για τα υπόλοιπα είδη θεωρείται ίσος με 1.00. Για διατομές δε ψυχρής έλασης θεωρείται συνήθως ίσος με 1.21.

$$f_{y,dyn} = DIF \cdot SIF \cdot f_y \quad (6-1)$$

Πίνακας 6-1. Δυναμική αντοχή χαλύβδινων στοιχείων σύμφωνα με τα UFC 3-340-02.

Είδος φόρτισης	Κατηγορία προστασίας	Δυναμική αντοχή
Κάμψη	1	$f_{yd,dyn} = f_{y,dyn}$ με συντελεστή 0.90 για διατομές ψυχρής έλασης
	2	$f_{yd,dyn} = f_{y,dyn} + \frac{1}{4} \cdot (f_{u,dyn} - f_{y,dyn})$
Διάτμηση	Όλες	$0.55 \cdot f_{yd,dyn}$

f_y : Αντοχή διαρροής.

$f_{y,dyn}$: Δυναμική αντοχή διαρροής.

$f_{yd,dyn}$: Δυναμική αντοχή διαρροής σχεδιασμού.

f_u : Αντοχή θραύσης.

$f_{u,dyn}$: Δυναμική αντοχή θραύσης.

6.2.2 Υποχρεωτική ανάγκη πλαστιμότητας

Για τον σχεδιασμό έναντι έκρηξης είναι απαραίτητη η εμφάνιση πλαστιμότητας από την πλευρά της κατασκευής προκειμένου να αποφευχθεί η πιθανότητα ψαθυρής αστοχίας στην οποία είναι επιρρεπής μια κατασκευή υπό έκρηξη. Έτσι, αναγκαίος είναι ο σχεδιασμός με διατομές κατηγορίας 1.

Η απαίτηση αυτή προκύπτει από την ανάγκη αποτροπής εμφάνισης τοπικής αστάθειας σε κάποιο σημείο της κατασκευής που μπορεί να οδηγήσει σε αλυσιδωτές επιπτώσεις. Το ενδεχόμενο τοπικής αστάθειας είναι έντονο έναντι δυναμικής ή ωστικής φόρτισης από έκρηξη ιδιαίτερα στις μεταλλικές κατασκευές. Επιπλέον, δεν πρέπει να παραλείπεται η εξασφάλιση της αντοχής σε εναλλαγή του προσήμου φόρτισης λόγω της έκρηξης. Ενώ, συνολικά, η κατασκευή θα πρέπει να εμφανίζει έναν αξιόπιστο πλαστικό μηχανισμό κατάρρευσης.

Τέλος, κατάλληλη μέριμνα πρέπει να δίνεται στις μεταλλικές συνδέσεις οι οποίες πρέπει να έχουν την ανάλογη στιβαρότητα και αντοχή ώστε να δίνουν τη δυνατότητα ανάπτυξης πλαστικών στροφών, ώστε να αντιμετωπίζεται η φόρτιση της έκρηξης. Σε αυτές, επιπρόσθετο βαρύνοντα ρόλο παίζει ο ικανοτικός σχεδιασμός ο οποίος επιβάλλει η αντοχή του κόμβου να είναι μεγαλύτερη της αντοχής των συνδεόμενων μελών. Εκεί ελλοχεύει ο κίνδυνος εμφάνισης αυξημένης αντοχής (δυναμικής αντοχής) στα συνδεόμενα μέλη. Ωστόσο, τόσο οι συγκολλήσεις όσο και οι κοχλίες έχουν ανάλογη αύξηση στην αντοχή τους.

6.2.3 Όρια παραμορφώσεων

Το όριο παραμορφώσεων είναι ιδιαίτερα σημαντικό στον σχεδιασμό χαλύβδινων κατασκευών έναντι έκρηξης καθώς είναι αυτό που κρίνει σε σημαντικό βαθμό την τελική προστασία που επιβάλλεται και, άρα, αποτελεί βασικό παράγοντα κατά τη φάση διαστασιολόγησης. Για την προστασία της ανθρώπινης ζωής τα όρια ενισχύονται σε σχέση με εκείνα που επιβάλλονται για την προστασία των δομικών στοιχείων.

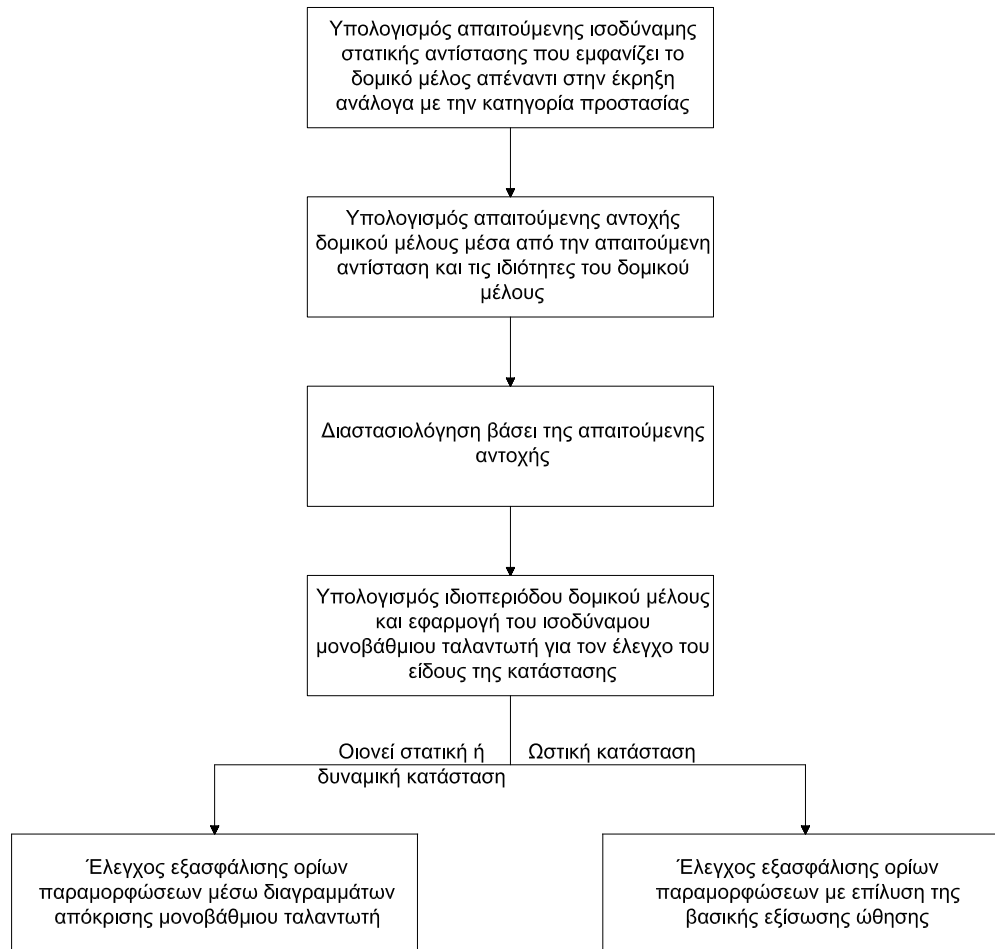
Σύμφωνα με το [7] τα όρια είναι:

Πίνακας 6-2. Όρια παραμορφώσεων για χαλύβδινα στοιχεία σύμφωνα με τα UFC 3-340-02.

Είδος στοιχείου	Κατηγορία προστασίας	Ειδικότερα στοιχεία	Είδος επικρατούσας παραμόρφωσης	Μέγιστη παραμόρφωση
Δοκοί, τεγίδες, μηκίδες	1		θ	2°
			μ	10
	2		θ	12°
			μ	20
Πλαίσια	1		δ	H/25
			μ	2°
Μεταλλικά φύλλα ψυχρής έλασης, πανέλα	1	Χωρίς δράση μεμβράνης	θ	1.25°
			μ	1.75
		Με δράση μεμβράνης	θ	4°
			μ	6
Δικτυώματα	1		θ	2°
			μ	4
		Επικρατούσα δράση τέννουσας	θ	1°
			μ	1
Πλάκες	1		θ	2°
			μ	10
	2		θ	12°
			μ	20

6.2.4 Μέθοδος υπολογισμού

Όπως προαναφέρθηκε, σημαντικό ρόλο παίζουν τα όρια παραμορφώσεων ανάλογα με την προστασία που επιβάλλεται. Έτσι, ανάλογα με την απαιτούμενη προστασία ακολουθείται η κάτωθι διαδικασία:



Σχήμα 6-2. Διάγραμμα ροής υπολογισμού διατομής χάλυβα έναντι έκρηξης.

Όπου η βασική εξίσωση ώθησης για στροφές στήριξης $\theta < 5^\circ$ προκύπτει ως:

$$\frac{i^2 \cdot A^2}{2 \cdot K_{LM} \cdot M} = \frac{R_m \cdot X_E}{2} + R_m \cdot (X_m - X_E) \quad (6-2)$$

Συνήθως, προκύπτει οιονεί στατική ή δυναμική κατάσταση για τα δομικά στοιχεία από χάλυβα.

Επιπλέον, για χαμηλές πιέσεις μπορεί να εκτελεστεί ένας προκαταρκτικός υπολογισμός διατομής σύμφωνα με την ισοδύναμη στατική αντίσταση:

Πίνακας 6-3. Ισοδύναμη στατική αντίσταση σύμφωνα με τα UFC 3-340-02.

Κατηγορία προστασίας	Ισοδύναμη στατική αντίσταση
1	$1.0 \cdot p_{\max} \cdot A$
2	$0.5 \cdot p_{\max} \cdot A$

6.3 Σχεδιασμός στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος

Ο σχεδιασμός κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος έναντι έκρηξης αποτελεί μια γενική περίπτωση αφού τα περισσότερα οικοδομικά έργα και έργα υποδομής έχουν κατασκευαστεί με τη χρήση σκυροδέματος.

Οι βασικές διαφοροποιήσεις του σχεδιασμού του οπλισμένου σκυροδέματος έναντι έκρηξης σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις είναι:

- Αύξηση της αντοχής του οπλισμένου σκυροδέματος.
- Υποχρεωτική ανάγκη πλαστιμότητας.
- Όρια παραμορφώσεων.
- Μέθοδοι υπολογισμού διατομών.
- Διαφορετική στατική λειτουργία έναντι έκρηξης.

6.3.1 Αύξηση της αντοχής του οπλισμένου σκυροδέματος

Το οπλισμένο σκυροδέμα εμφανίζει έναντι έντονης δυναμικής φόρτισης αυξημένη αντοχή. Αυτή η αντοχή παρουσιάζεται ως δυναμική αντοχή οπλισμένου σκυροδέματος. Διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος της φόρτισης στο δομικό μέλος, δηλαδή ανάλογα με το αν υπόκειται σε θλίψη, κάμψη, διάτμηση κ.τ.λ. Αυτή η αύξηση αντοχής έγκειται τόσο στην αύξηση της αντοχής θραύσης σκυροδέματος και χάλυβα όσο και στην αύξηση της αντοχής διαρροής του χάλυβα ενώ το μέτρο ελαστικότητας και το όριο πλαστικών στροφών δεν φαίνεται να μεταβάλλονται. Η αύξηση της στατικής αντοχής στα επίπεδα της δυναμικής αντοχής γίνεται μέσω του δυναμικού συντελεστή αύξησης (Dynamic increase factor – DIF).

Πίνακας 6-4. Συντελεστές DIF οπλισμένου σκυροδέματος σύμφωνα με τα UFC 3-340-02.

Είδος φόρτισης	Μακρινή απόσταση			Κοντινή απόσταση		
	Ράβδοι οπλισμού		Σκυρόδεμα	Ράβδοι οπλισμού		Σκυρόδεμα
Κάμψη	1.17	1.05	1.19	1.23	1.05	1.25
Διαγώνιος εφελκυσμός	1.00	1.00	1.00	1.10	1.00	1.00
Διάτμηση	1.10	1.00	1.10	1.10	1.00	1.10
Συνάφεια	1.17	1.05	1.00	1.23	1.05	1.00
Θλίψη	1.10	1.00	1.12	1.13	1.00	1.13

Πίνακας 6-5. Δυναμική αντοχή οπλισμένου σκυροδέματος σύμφωνα με τα UFC 3-340-02.

Είδος φόρτισης	Είδος οπλισμού	Στροφή (°)	Δυναμική αντοχή	
			Οπλισμός	Σκυρόδεμα
Κάμψη	Εφελκυσόμενος και θλιβόμενος	$0 < \theta \leq 2$	f_{yd}	f_{cd}
		$2 < \theta \leq 6$	$f_{yd} + (f_{ud} - f_{yd})/4$	0
		$6 < \theta \leq 12$	$(f_{ud} + f_{yd})/2$	0
Διαγώνιος εφελκυσμός	Συνδετήρες	$0 < \theta \leq 2$	f_{yd}	f_{cd}
		$2 < \theta \leq 6$	f_{yd}	f_{cd}

		$6 < \theta \leq 12$	f_{yd}	f_{cd}
Διαγώνιος εφελκυσμός	Lacing	$0 < \theta \leq 2$	f_{yd}	f_{cd}
		$2 < \theta \leq 6$	$f_{yd} + (f_{ud} - f_{yd})/4$	f_{cd}
		$6 < \theta \leq 12$	$(f_{ud} + f_{yd})/2$	f_{cd}
Διάτμηση	Diagonal	$0 < \theta \leq 2$	f_{yd}	f_{cd}
		$2 < \theta \leq 6$	$f_{yd} + (f_{ud} - f_{yd})/4$	0
		$6 < \theta \leq 12$	$(f_{ud} + f_{yd})/2$	0
Θλίψη	Στύλου	-	f_{yd}	f_{cd}

f_y : Αντοχή διαρροής.

$f_{y,dyn}$: Δυναμική αντοχή διαρροής.

$f_{yd,dyn}$: Δυναμική αντοχή διαρροής σχεδιασμού.

f_u : Αντοχή θραύσης.

$f_{u,dyn}$: Δυναμική αντοχή θραύσης.

6.3.2 Υποχρεωτική ανάγκη πλαστιμότητας

Ιδιαίτερα στο οπλισμένο σκυρόδεμα, για τον σχεδιασμό έναντι έκρηξης είναι απαραίτητη η εμφάνιση πλαστιμότητας από την πλευρά της κατασκευής προκειμένου να αποφευχθεί η πιθανότητα ψαθυρής αστοχίας στην οποία είναι επιρρεπής μια κατασκευή υπό έκρηξη. Έτσι, αναγκαίος είναι ο σχεδιασμός με μεγάλη δυνατότητα ανάληψης πλαστικών στροφών. Σε αυτό το σημείο οι διατομές οπλισμένου σκυροδέματος έρχονται να διακριθούν σε δύο βασικούς τύπους ανάλογα με τη δράση τους για $\theta > 2^\circ$:

- Στον πρώτο τύπο για $\theta > 2^\circ$ έντονες θλιπτικές δυνάμεις μεταφέρονται στον θλιβόμενο οπλισμό δίχως τον οποίο θα συνέβαινε θραύση του σκυροδέματος. Η επικάλυψη του σκυροδέματος παραμένει σταθερή.
- Στον δεύτερο τύπο για $\theta > 2^\circ$ έντονες θλιπτικές δυνάμεις μεταφέρονται στον θλιβόμενο οπλισμό δίχως τον οποίο θα συνέβαινε θραύση του σκυροδέματος. Όμως, η επικάλυψη του σκυροδέματος σε αυτήν την περίπτωση θραύεται ή και αποκολλάται. Στην περίπτωση της αποκόλλησης παύει να συμμετέχει στην αδρανειακή συμπεριφορά του στοιχείου.

Οι δύο τύποι έχουν διαφορετικό τρόπο σχεδιασμού και διαφορετική αντοχή. Οι απαιτήσεις πλαστιμότητας προκύπτουν από την ανάγκη αποτροπής εμφάνισης τοπικής αστάθειας σε κάποιο σημείο της κατασκευής που μπορεί να οδηγήσει σε αλυσιδωτές επιπτώσεις. Η κατασκευή θα πρέπει να εμφανίζει έναν αξιόπιστο πλαστικό μηχανισμό κατάρρευσης.

Ενώ, κατάλληλη μέριμνα πρέπει να δίνεται στις συνδέσεις στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος οι οποίες πρέπει όσο το δυνατόν καλύτερα να συγκρατούν την επικάλυψη του σκυροδέματος και να δημιουργούν συνθήκες επαρκούς πλαστιμότητας.

Βέβαια, δεν πρέπει να παραλείπεται η διαρρηκτική ικανότητα της εκρηκτικής ύλης η οποία μπορεί να προκαλέσει αποφλοίωση και θρυμματισμό στην όψη του στοιχείου οπλισμένου σκυροδέματος από την πλευρά της έκρηξης. Συνήθως, ο θρυμματισμός λαμβάνει χώρα από την εξωτερική παρειά του σκυροδέματος μέχρι τον διαμήκη οπλισμό ενώ το στοιχείο εσωτερικά μπορεί να υποστεί διάρρηξη σε μεγάλο βάθος, δεδομένης και της υψηλής ταχύτητας που αναπτύσσουν τα θρύμματα. Έτσι, ο εγκάρσιος και ο διαμήκης οπλισμός αποκτούν την επιπλέον δράση εγκιβωτισμού των θρυμμάτων. Αντίστοιχη δράση μπορούν να αποκτήσουν επικολλημένες μεταλλικές πλάκες ή μετατροπή των στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος σε σύμμικτα στοιχεία για πιο ευεργετική λειτουργία με τον περιορισμό της αποφλοίωσης.

Ενδεικτικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι κάτωθι δείκτες για να φανεί αν μπορεί να αντιμετωπίσει το στοιχείο οπλισμένου σκυροδέματος τη διαρρηκτική ικανότητα της εκρηκτικής ύλης:

$$h/W^{1/3} > 0.07 \cdot (R/W^{1/3})^{-0.62}, \text{ καθόλου ζημιά} \quad (6-3)$$

$$h/W^{1/3} > 0.03 \cdot (R/W^{1/3})^{-0.62}, \text{ καθόλου διάρρηξη} \quad (6-4)$$

h: Πάχος δομικού στοιχείου.

6.3.3 Όρια παραμορφώσεων

Το όριο παραμορφώσεων είναι ιδιαίτερα σημαντικό στον σχεδιασμό κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος έναντι έκρηξης καθώς είναι αυτό που κρίνει σε σημαντικό βαθμό την τελική προστασία που επιβάλλεται και, άρα, αποτελεί βασικό παράγοντα κατά τη φάση διαστασιολόγησης.

Για την προστασία της ανθρώπινης ζωής τα όρια ενισχύονται σε σχέση με εκείνα που επιβάλλονται για την προστασία των δομικών στοιχείων.

Σύμφωνα με το [7] τα όρια είναι:

Πίνακας 6-6. Όρια παραμορφώσεων για στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος σύμφωνα με τα UFC 3-340-02.

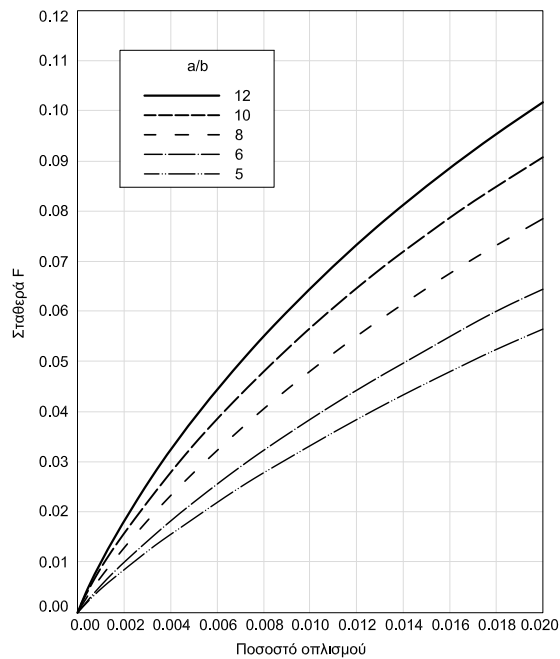
Είδος στοιχείου	Επίπεδο προστασίας	Ειδικότερα στοιχεία	Είδος επικρατούσας παραμόρφωσης	Μέγιστη παραμόρφωση
Δοκοί	1	-	θ	2°
	2		θ	8°
Εξωτερικοί στύλοι	1	-	μ	3
Πλάκες	1	Χωρίς δράση μεμβράνης	θ	1°
		Με δράση μεμβράνης	θ	2°
	2	-	θ	8°
Προεντεταμένα στοιχεία	1	-	θ	2°
			μ	1
Προκατασκευασμένα στοιχεία	1	-	θ	2°
			μ	3
Προκατασκευασμένα στοιχεία θλίψης	1	-	μ	1.3

6.3.4 Μέθοδος υπολογισμού

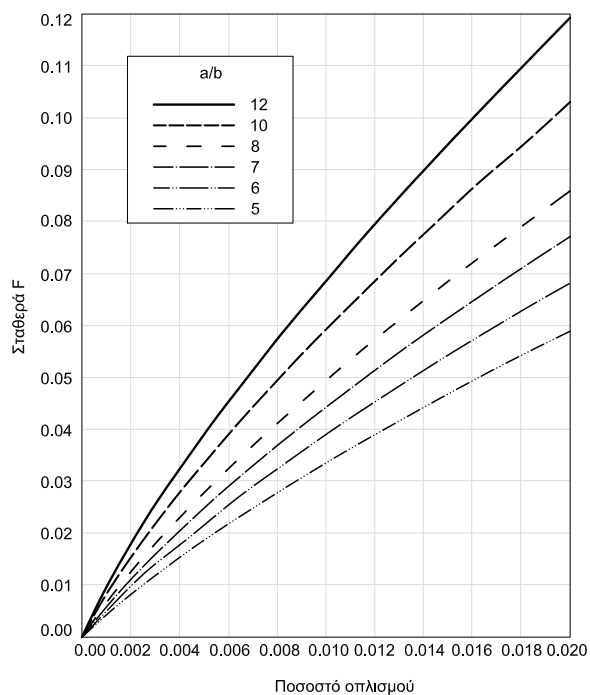
Η βασική εξίσωση ώθησης για στροφές στήριξης $\theta < 5^\circ$ προκύπτει ως:

$$\frac{i^2 \cdot A^2}{2 \cdot K_{LM} \cdot M} = \frac{R_m \cdot X_E}{2} + R_m \cdot (X_m - X_E) \quad (6-5)$$

Συνήθως, προκύπτει ωστική κατάσταση για τα δομικά στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα.



Σχήμα 6-3. Διάγραμμα σταθεράς ρηγματωμένης διατομής με συμμετρικό οπλισμό.



Σχήμα 6-4. Διάγραμμα σταθεράς ρηγματωμένης διατομής μόνο με εφελκόμενο οπλισμό.

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_c} \quad (6-6)$$

$$I_c = F \cdot b \cdot d^3 \quad (6-7)$$

6.3.5 Πλάκες οπλισμένου σκυροδέματος

Οι πλάκες οπλισμένου σκυροδέματος αποτελούν μια ιδιαίτερη περίπτωση για το αντικείμενο των εκρήξεων. Αυτό συμβαίνει διότι συνήθως οι πλάκες ανωδομής που αποτελούνται από οπλισμένο σκυρόδεμα διαστασιολογούνται κατά κόρον υπό κατακόρυφα φορτία δίχως να έχει ληφθεί σχεδιαστικά αντιστροφή του φορτίου. Αντιθέτως, δοκοί, υποστυλώματα και θεμελίωση σχεδιάζονται σε διάφορες φορές φόρτισης λόγω του σεισμού, του ανέμου κ.τ.λ.

Έτσι, κατά την περίπτωση μιας έκρηξης που ωθεί την πλάκα προς τα πάνω, είναι πολύ πιθανό να μην υπάρχει οπλισμός στην άνω παρειά ώστε να παραλάβει τις άνω εφελκυστικές τάσεις που οδηγούν σε ρηγμάτωση του σκυροδέματος. Αυτό έχει ιδιαίτερα δυσμενείς συνέπειες, αφού οι πλάκες είναι αυτές που φέρουν πιθανόν τους ανθρώπους που χρησιμοποιούν το εκάστοτε κτίριο και τον εξοπλισμό.

Μάλιστα, δεν είναι απαραίτητο η έκρηξη να λαμβάνει χώρα κάτω από μία πλάκα, ώστε να την ωθήσει προς τα πάνω. Ακόμη κι αν η έκρηξη συμβαίνει πάνω από την πλάκα, θα προκαλέσει ταλάντωση στην πλάκα κι έτσι ενώ στην αρχή θα την ωθήσει προς τα κάτω, έπειτα θα ωθηθεί προς τα πάνω.

Οπότε, πρέπει να προβλέπεται και άνω και κάτω οπλισμός, ενώ για παχιές πλάκες καθίσταται απαραίτητη και η χρήση διατμητικού οπλισμού.

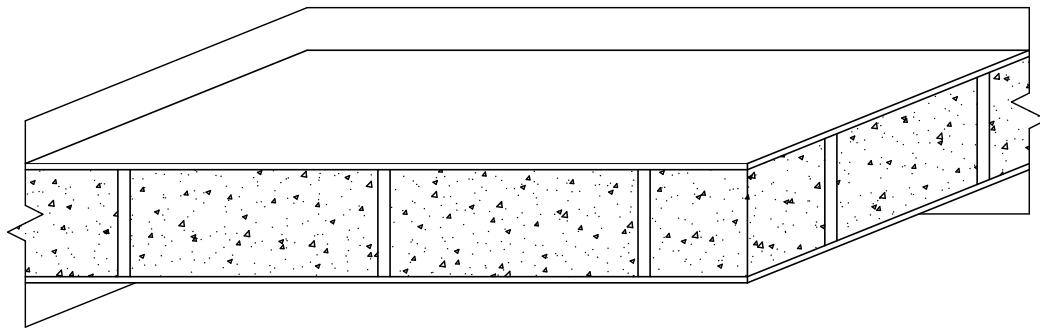
6.4 Σχεδιασμός σύμμικτων στοιχείων

Ο σχεδιασμός σύμμικτων στοιχείων αντί συμβατικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος ή δομικού χάλυβα αποτελεί ένα πεδίο που κερδίζει όλο και περισσότερο έδαφος δεδομένων των πολλαπλών πλεονεκτημάτων που προσφέρει.

Οι βασικές διαφοροποιήσεις του σχεδιασμού των σύμμικτων στοιχείων έναντι έκρηξης σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις είναι:

- Αύξηση της αντοχής του οπλισμένου σκυροδέματος.
- Υποχρεωτική ανάγκη πλαστιμότητας.
- Όρια παραμορφώσεων.
- Μέθοδοι υπολογισμού διατομών.
- Διαφορετική στατική λειτουργία έναντι έκρηξης.

Δίνεται ειδικό βάρος στην περίπτωση σύμμικτων panels, δηλαδή panels που έχουν χαλύβδινες πλάκες εξωτερικά και εγκιβωτίζουν εσωτερικά σκυρόδεμα.



Σχήμα 6-5. Απεικόνιση σύμμικτου panel.

6.4.1 Όρια παραμορφώσεων

Όπως και στα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος ή δομικού χάλυβα, έτσι και στα σύμμικτα στοιχεία τα αντίστοιχα όρια παραμορφώσεων ανάλογα με την κατηγορία προστασίας παίζουν βαρύνοντα ρόλο στον σχεδιασμό.

Πίνακας 6-7. Όρια παραμορφώσεων για σύμμικτα στοιχεία σύμφωνα με το [11].

Είδος στοιχείου	Κατηγορία προστασίας	Είδος επικρατούσας παραμόρφωσης	Μέγιστη παραμόρφωση
Σύμμικτα στοιχεία	1	θ	2°
	2	θ	5°

6.4.2 Στατική λειτουργία σύμμικτων στοιχείων

Για την επίτευξη του ορίου παραμορφώσεων των 5° δεν μπορεί να συμμετάσχει το σκυρόδεμα. Έτσι, διακρίνονται δύο τύποι πλαστικού σχεδιασμού:

- Τύπος I: Συνεργασία σκυροδέματος – χάλυβα.
- Τύπος II: Συμμετοχή μόνο του χάλυβα στη συνολική αντοχή της διατομής. Χρησιμοποιείται για κατηγορία προστασίας 2.

Η δράση των σύμμικτων panels είναι κοινή με εκείνη των στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος με τη διαφορά ότι αντί θλιβόμενου και εφελκόμενου οπλισμού, υπάρχουν χαλύβδινες πλάκες.

Ωστόσο, υπάρχει η σημαντική διαφορά του πιθανού λυγισμού των πλακών αυτών. Ο αντίστοιχος λυγισμός του θλιβόμενου οπλισμού στην περίπτωση του οπλισμένου σκυροδέματος περιορίζεται λόγω του εγκιβωτισμού τους εντός του σκυροδέματος. Στα σύμμικτα στοιχεία, λοιπόν, ο λυγισμός των χαλύβδινων πλακών εξαρτάται από τους ήλους σύνδεσης και την πυκνότητά τους, από το πάχος των ελασμάτων και τη γεωμετρία τους. Σε περίπτωση έκρηξης, οι ήλοι σύνδεσης έχουν διαφορετικό τύπο αστοχίας από τη συνήθη περίπτωση. Για μεταλλικές πλάκες πάχους < 10mm συμβαίνει διάσχιση του ελάσματος ενώ για πλάκες μεγαλύτερου πάχους συμβαίνει αποκόλληση των ήλων. Σε περίπτωση πιο κοντινής έκρηξης, μάλιστα, διάσχιση του ελασμάτων μπορεί να συμβεί και για μεγαλύτερα πάχη.

Επιπλέον σημαντική διαφορά έχει να κάνει με την αποφλοιώση που συμβαίνει στο οπλισμένο σκυρόδεμα. Η αντίστοιχη αποφλοιώση και θρυμματισμός στην περίπτωση των σύμμικτων στοιχείων έχει εντελώς διαφορετική λειτουργία αφού τα διαρρηγμένα κομμάτια σκυροδέματος παραμένουν εντός της χαλύβδινης διατομής. Ενώ, ακόμη και στην περίπτωση θραύσης του χάλυβα (λόγω για παράδειγμα

υψηλής εγγύτητας με την εκρηκτική ύλη) τα θρύμματα σκυροδέματος που δημιουργούνται είναι λιγότερα και με χαμηλότερη ταχύτητα.

6.4.3 Μέθοδος υπολογισμού

Η βασική εξίσωση ώθησης για στροφές στήριξης $\theta < 5^\circ$ προκύπτει ως:

$$\frac{i^2 \cdot A^2}{2 \cdot K_{LM} \cdot M} = \frac{R_m \cdot X_E}{2} + R_m \cdot (X_m - X_E) \quad (6-8)$$

6.5 Σχεδιασμός τοιχοποιίας

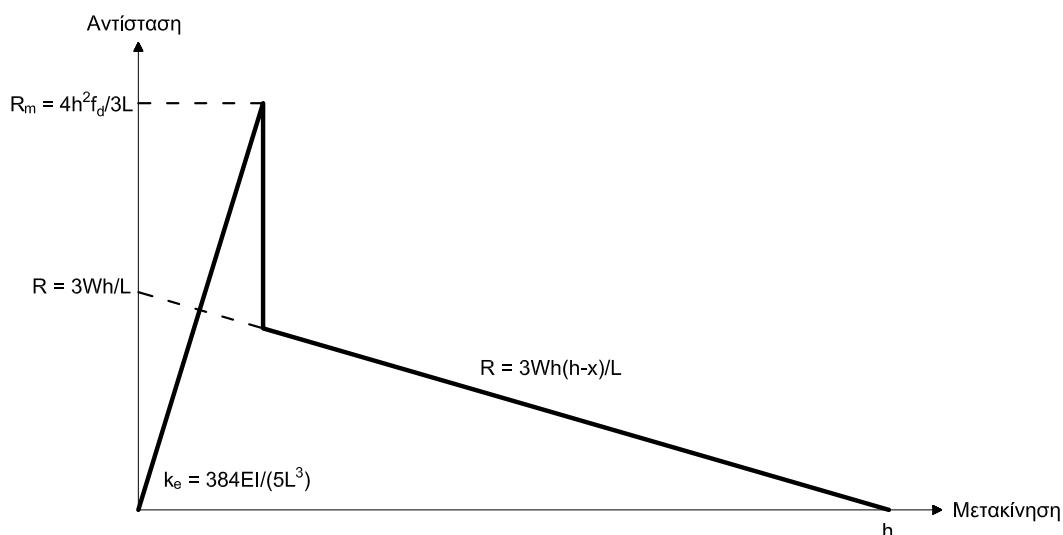
Οι τοιχοποιίες έχουν τη δυνατότητα να προβάλουν περιορισμένη αντίσταση σε εκρήξεις, ιδιαίτερα οι άοπλες τοιχοποιίες.

Για τη διαστασιολόγηση των οπλισμένων τοιχοποιιών ακολουθείται κοινή διαδικασία με αυτήν του οπλισμένου σκυροδέματος. Τα όρια παραμόρφωσης από [7] δίνονται ως:

Πίνακας 6-8. Όρια παραμορφώσεων για τοιχοποιίες.

Είδος στοιχείου	Ειδικότερα στοιχεία	Είδος επικρατούσας παραμόρφωσης	Μέγιστη παραμόρφωση
Οπλισμένη τοιχοποιία	Μονή	θ	1°
	Διπλή	θ	2°

Για τη διαστασιολόγηση των άοπλων τοιχοποιιών που είναι συνήθης περίπτωση όσον αφορά τις υφιστάμενες κατασκευές και την εκτίμηση της αντίστασής του σε έκρηξη, θεωρείται ότι δημιουργείται πλαστική άρθρωση στα 2/3 του ύψους του τοίχου.



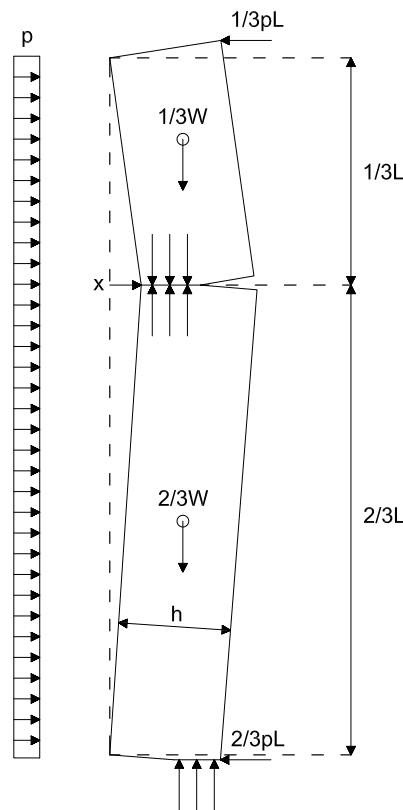
Σχήμα 6-6. Διάγραμμα αντίστασης - μετακίνησης άοπλης τοιχοποιίας σε έκρηξη.

L: Ύψος τοιχοποιίας.

h: Πάχος τοιχοποιίας

f_d : Θλιπτική αντοχή τοιχοποιίας.

W: Βάρος.



Σχήμα 6-7. Εφαρμοζόμενες δυνάμεις σε άοπλη τοιχοποιία κατά την έκρηξη.

6.6 Σχεδιασμός υαλοπινάκων

Ο σχεδιασμός των υαλοπινάκων έχει ιδιαίτερη σημασία για τον σχεδιασμό έναντι εκρήξεων. Ενώ τα υπόλοιπα δομικά στοιχεία ακολουθούν κοινή λογική με αυτήν που ισχύει για παράδειγμα στον αντισεισμικό σχεδιασμό, οι υαλοπίνακες αποτελούν ένα εντελώς διαφορετικό αντικείμενο που είναι μια εξατομικευμένη εργασία στον σχεδιασμό έναντι εκρήξεων.

Το γυαλί δύναται να κατασκευαστεί είτε ως να έχει ψαθυρή συμπεριφορά είτε ως να έχει πλαστική συμπεριφορά. Η πλαστική συμπεριφορά γενικώς επιδιώκεται έτσι ώστε να μην αναπτυχθούν τα θρύμματα που αναπτύσσονται στην περίπτωση της ψαθυρής συμπεριφοράς και τα οποία με την αυξημένη ταχύτητα που αποκτούν αποτελούν ανθρώπινο κίνδυνο. Επιπλέον, με πλαστική συμπεριφορά οι υαλοπίνακες μπορούν να αντισταθούν στην πίεση της έκρηξης και να την περιορίσουν εντός του κτιρίου τόσο παραμένοντας ανέπαφοι όσο και καθυστερώντας τη θραύση τους.

6.6.1 Είδη γυαλιού

Τα είδη γυαλιού που χρησιμοποιούνται είναι τα:

- Πλωτό γυαλί (floating glass) και ρολαρισμένο γυαλί: Επιδεικνύουν ψαθυρή συμπεριφορά και μεγάλη ευθραυστότητα λόγω των υπαρχουσών μικρορηγματώσεων στην επιφάνεια του γυαλιού υπό τη δράση εφελκυστικών τάσεων. Έτσι, η θραύση ξεκινά από μία τυχαία ορισμένη ατέλεια και ο υαλοπίνακας θραύεται ακανόνιστα σε γωνιακά και αιχμηρά θρύμματα.
- Θερμικώς σκληρυμένο γυαλί (ESG): Προκύπτει από την επαναθέρμανση απλού γυαλιού προς δημιουργία παραμενουσών θλιπτικών τάσεων στην επιφάνεια και εφελκυστικών στον πυρήνα λόγω της δημιουργούμενης αυτεντατικής κατάστασης. Έτσι, εξισορροπούνται οι εφελκυστικές τάσεις που

δημιουργούνται λόγω εξωτερικής φόρτισης. Κατά τη φόρτιση και θραύση του, δημιουργούνται μικρά σε μέγεθος ζαριού θρύμματα με αμβλυμένες γωνίες. Ωστόσο, παρά τις αμβλυμένες γωνίες τους, αναπτύσσουν τόσο υψηλή ταχύτητα κατά την έκρηξη που εξακολουθούν να αποτελούν σημαντικότερο κίνδυνο για την ανθρώπινη ζωή. Παρ' όλα αυτά, εμφανίζουν μεγαλύτερη αντοχή σε σχέση με το πλωτό και το ρολαρισμένο γυαλί.

- Θερμικώς ενισχυμένο γυαλί (TVG): Για την παραγωγή του ακολουθείται κοινή διαδικασία με αυτήν του θερμικώς σκληρυμένου γυαλιού αλλά σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Εμφανίζει αντοχή ανάμεσα σε αυτήν του πλωτού γυαλιού ή του ρολαρισμένου γυαλιού και του θερμικώς σκληρυμένου γυαλιού. Ενώ έχει κοινή μορφή θραύσης με αυτήν του πλωτού γυαλιού και του ρολαρισμένου γυαλιού αλλά με μεγαλύτερα θρύμματα.
- Laminated ή Triplex γυαλί: Πρόκειται για σύνθετο στοιχείο που αποτελείται από διαδοχικές στρώσεις γυαλιού και ενδιάμεσης πλαστικής μεμβράνης συνήθως πολυβινολομπουτυραλίου (PVB) η οποία είναι ιδιαίτερα πλάστιμη. Η μεμβράνη αυτή έχει πολύ καλή συνάφεια με το γυαλί σε σημείο που μετά τη θραύση του υαλοπίνακα τα θρύμματα γυαλιού παραμένουν συνδεδεμένα με αυτήν. Έτσι, κατά τη θραύση του γυαλιού τα θρύμματα είναι επικολλημένα στην πλαστική μεμβράνη που πλέον λειτουργεί στατικά μόνη της ως εφελκόμενη μεμβράνη μέχρις ότου αρχίσει να διατρυπάται από τα θρύμματα ή μέχρις ότου αποκολληθεί ολόκληρο του πλαίσιο του υαλοπίνακα. Η πλαστική μεμβράνη μπορεί να είναι και από πολυουρεθάνη διατηρώντας κοινές ιδιότητες με αυτές του πολυβινολομπουτυραλίου αλλά έχοντας τα επιπλέον πλεονεκτήματα της διατήρησής τους σε θερμοκρασίες κάτω του μηδενός και της διατήρησης της στιβαρότητας σε υψηλές θερμοκρασίες. Ακρυλικές ρητίνες μπορούν, επίσης, να χρησιμοποιηθούν ως μεμβράνη αλλά δεν είναι επιθυμητές λόγω χαμηλότερης αντοχής.
- Πολυκαρβονικά φύλλα: Δεν αποτελούνται από γυαλί αλλά από διαφανές πλαστικό το οποίο όμως μπορεί να συνδυαστεί με στρώσεις γυαλιού. Δεν είναι εύθραυστα αλλά κάμπτονται έντονα με ελαστικό τρόπο σε σημείο που μπορεί να αποκολληθούν από το πλαίσιο τους. Επιπλέον, λόγω της ελαστικότητάς τους προκαλούν έντονες τόσο εντός όσο και εκτός επιπέδου δυνάμεις στήριξης σε σημείο που καθίσταται δυσχερής ο σχεδιασμός τους.

Συνολικά, επομένως, η επικρατέστερη επιλογή υαλοπινάκων για τον σχεδιασμό έναντι εκρήξεων είναι το Laminated ή Triplex γυαλί.

Πίνακας 6-9. Δυναμική αντοχή διαφόρων ειδών γυαλιού.

	Δυναμική αντοχή γυαλιού $f_{gk,dyn}$ (MPa)
Πλωτό γυαλί	80
Θερμικώς σκληρυμένο γυαλί	100-120 (~120)
Θερμικώς ενισχυμένο γυαλί	120-250 (~180)

6.6.2 Βελτιωτικά υαλοπινάκων

Πέρα από την επιλογή του είδους του γυαλιού περαιτέρω βελτίωση των υαλοπινάκων στο σύνολο τους μπορεί να επέλθει με άλλες τροποποιήσεις, ιδιαίτερα για τις υφιστάμενες κατασκευές:

- Μεμβράνη κατά του θρυμματισμού (anti-shatter film) με ή χωρίς δίχτυ προστασίας (bomb blast net curtain): Η μεμβράνη κατά του θρυμματισμού αποτελεί διαφανή πολυεστερική μεμβράνη εξαιρετικής πρόσφυσης η οποία επικολλάται στην εσωτερική πλευρά του γυαλιού ώστε να συγκρατήσει τα θρύμματα σε περίπτωση αποκόλλησης του γυαλιού από το πλαίσιο. Το δίχτυ προστασίας έχει διαστάσεις διπλάσιες αυτές του υαλοπίνακα, τέτοιες ώστε το επιπλέον μήκος να κρατείται χαλαρό σε ειδικό κουτί και να ελευθερώνεται σε περίπτωση έκρηξης με σκοπό τη μείωση της ταχύτητας του γυαλιού. Για διάφορους λόγους, όμως, που έχουν να κάνουν με την αισθητική και τη λειτουργικότητά τους, έχει περιοριστεί η χρήση των δικτυών προστασίας. Αντιθέτως, οι μεμβράνες κατά του

θρυμματισμού χρησιμοποιούνται και επεκτείνουν τη δράση τους σε συστήματα αγκύρωσής τους στο πλαίσιο έτσι ώστε να μπορούν να αναπτύξουν τη δράση μεμβράνης των γυαλιών Triplex. Παρ' όλα αυτά, εξακολουθούν να μην έχουν την πλαστική συμπεριφορά τους και αναπτύσσουν έντονες δυνάμεις στήριξης που είναι δύσκολες στη διαχείριση. Έτσι, οι μεμβράνες κατά του θρυμματισμού με ή χωρίς δίχτυ προστασίας έχουν χρήση κυρίως σε υφιστάμενες κατασκευές.

- Τροποποίηση των υαλοπινάκων με γυαλί Triplex και χρήση σιλικόνης: Σε αυτήν την περίπτωση, το γυαλί Triplex πρέπει να ενσωματώνεται στο πλαίσιο και σιλικόνη στεγάνωσης επαρκούς αντοχής να χρησιμοποιείται γύρω γύρω. Ενώ τα στοιχεία του πλαισίου θα πρέπει να έχουν αντοχή μεγαλύτερη από αυτήν που εφαρμόζεται σε αυτά κατά την έκρηξη από το γυαλί.

6.6.3 Πλαίσιο υαλοπινάκων

Για την επαρκή λειτουργία του υαλοπίνακα σε συνθήκες έκρηξης επιβάλλεται η επιλογή ανάλογης επάρκειας πλαισίου το οποίο πρέπει να μπορεί να υπομένει τις δράσεις που εφαρμόζονται σε αυτό από το γυαλί. Οι μηχανισμοί αστοχίας του είναι η αποκόλληση του πλαισίου από τον τοίχο, η θραύση των στοιχείων του ή η αστοχία του ίδιου του τοίχου.

Έτσι, βασικά στοιχεία των πλαισίων είναι ότι πρέπει:

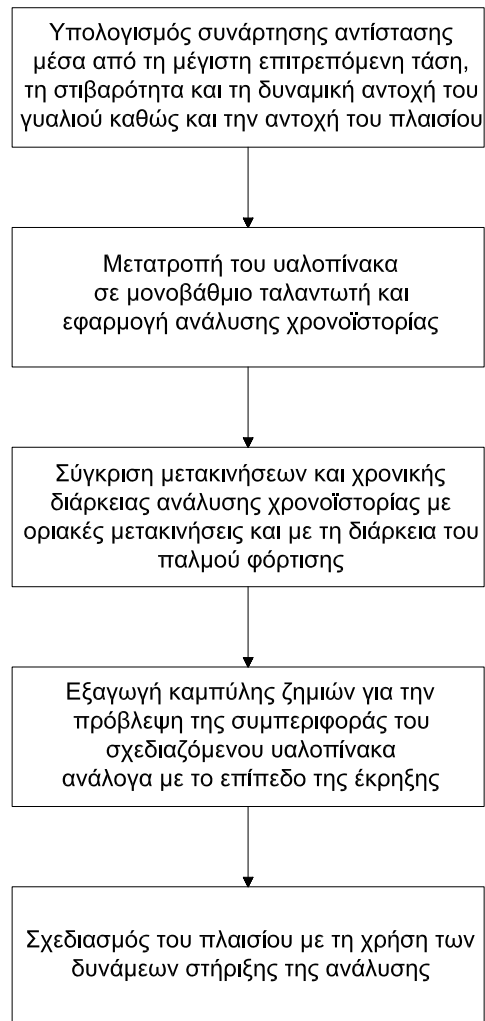
- Κατά το δυνατόν να στηρίζονται στις πλάκες και όχι σε υποστυλώματα, για να αποφευχθεί ο κίνδυνος υπερφόρτισης των υποστυλωμάτων.
- Ως μονωτικό να χρησιμοποιείται σιλικόνη η οποία έχει επαρκή αντοχή σε απόσχιση και όχι ελαστομερή περιβλήματα. Τα ελαστομερή περιβλήματα δεν επιτρέπουν την αναμενόμενη λειτουργία μεμβράνης του γυαλιού λόγω της περιορισμένης αντοχής τους.

Η στήριξη του γυαλιού στο πλαίσιο μπορεί να είναι:

- Σημειακή: Γίνεται με τη χρήση κατάλληλων κοχλιών που περνάνε μέσα από οπές στις γωνίες ή γενικότερα στις πλευρές του γυαλιού. Οι κοχλίες μεταφέρουν έπειτα τις δυνάμεις σε ένα άλλο δομικό στοιχείο συγκράτησης των γυαλιών. Η στήριξη αυτή απαιτεί ένα αρκετά ικανό γυαλί που να μπορεί να συγκρατήσει τις συγκεντρωμένες τάσεις που αναπτύσσονται γύρω από τις οπές. Έτσι, λόγω του ευπαθούς αυτού σημείου συνήθως αποφεύγεται η χρήση σημειακών στηρίξεων εκτός αν το γυαλί έχει τέτοιο πάχος που να αποτρέπει η αστοχία τοπικά στις οπές. Αλλά και πάλι, η λειτουργία μεμβράνης που αναμένεται να εμφανίσει το γυαλί δεν φαντάζει επιδιώξιμη.
- Γραμμική στήριξη: Μπορεί να γίνει είτε και στις τέσσερις πλευρές είτε στις δύο από τις τέσσερις. Η αποτελεσματικότητα της στήριξης είναι καταφανώς μεγαλύτερη στην περίπτωση της στήριξης και στις τέσσερις πλευρές. Αυτό συμβαίνει γιατί και η αποκόλληση είναι ευκολότερη κατά τη στήριξη στις δύο πλευρές αλλά και η γενικότερη αντίσταση που προβάλλει η στήριξη στις δύο πλευρές είναι χαμηλότερη. Κατά τη στήριξη και στις τέσσερις πλευρές, η αντοχή είναι μεγαλύτερη αφού καταφέρνουν να αναπτύσσονται εσωτερικά καμπτικές τάσεις πριν τη θραύση.

6.6.4 Υπολογισμός απαιτούμενων ιδιοτήτων υαλοπίνακα Triplex

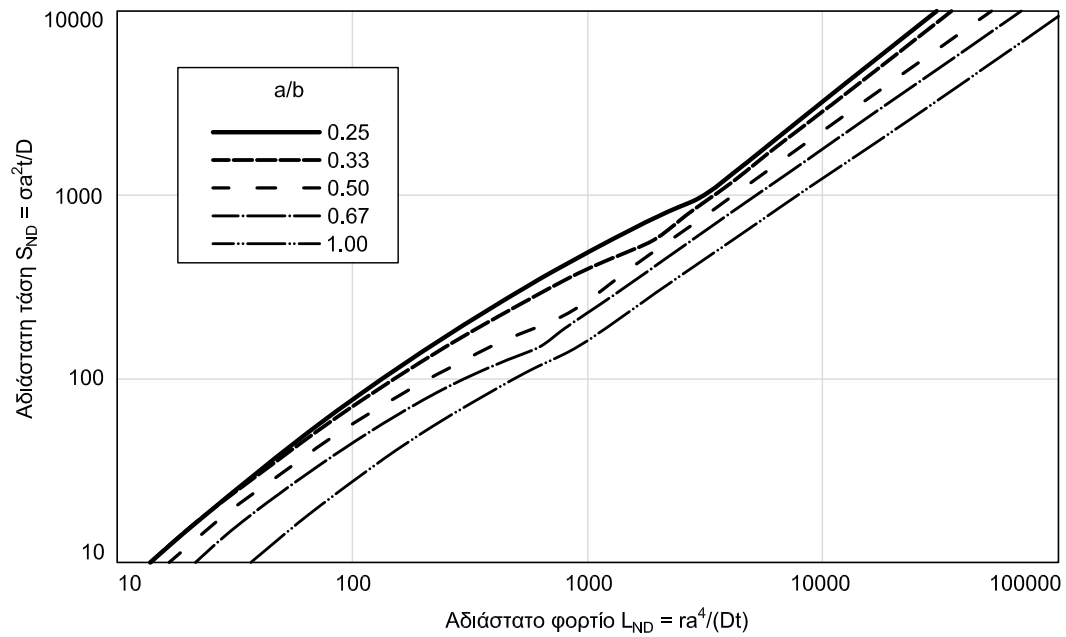
Για τον υπολογισμό των απαιτούμενων ιδιοτήτων των υαλοπινάκων, δηλαδή είδος, διαστάσεις, αντοχή, είναι απαραίτητη η εξαγωγή της συνάρτησης αντίστασής τους. Επειδή, όμως, η λειτουργία των υαλοπινάκων αφορούν μη γραμμική λειτουργία μεμβράνης πλακών καθίσταται δυσχερής η ανάλυσή τους. Έτσι, υπεισέρχεται η χρονική ανάλυση των υαλοπινάκων βασικός γνώμονας της οποίας θα πρέπει να είναι η απόκριση του γυαλιού με τρόπο ώστε να εμφανίζει υψηλή αντοχή πριν τη αρχική ρηγμάτωση και λειτουργία μεμβράνης μετά τη ρηγμάτωση. Ενώ, το πλαίσιο θα πρέπει να μπορεί να αντέχει αυτή τη δράση.



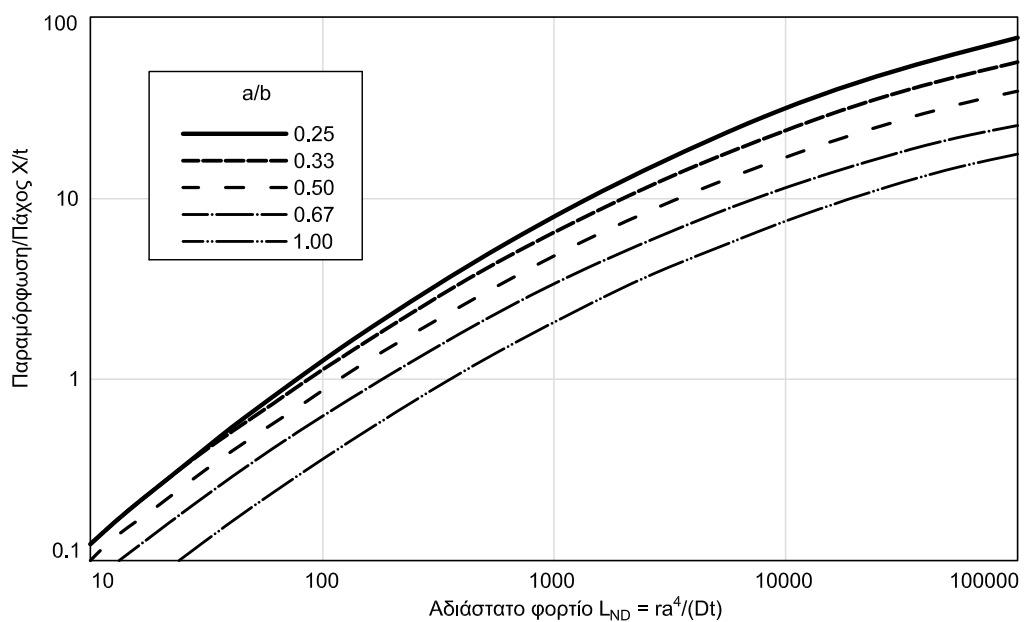
Σχήμα 6-8. Διάγραμμα ροής υπολογισμού υαλοπίνακα έναντι έκρηξης.

Για τον υπολογισμό της συνάρτησης αντίστασης του υαλοπίνακα σημαντικό ρόλο παίζουν δύο φάσεις, πριν και μετά τη ρηγμάτωση. Πριν τη ρηγμάτωση εμφανίζει ελαστική λειτουργία με καμπτικές τάσεις ενώ μετά τη ρηγμάτωση υπάρχει λειτουργία μεμβράνης και ελάχιστη καμπτική αντίσταση.

Έτσι, πριν τη ρηγμάτωση εφαρμόζεται θεωρία πλακών μεγάλων μετακινήσεων, αφού οι μετακινήσεις είναι ιδιαίτερα μεγάλες σε σχέση με τις διαστάσεις του υαλοπίνακα. Σε αυτήν την ανάλυση θεωρείται δίχως απώλεια ακρίβειας ως ενιαίου πάχους η διατομή του υαλοπίνακα παρά τις διαδοχικές στρώσεις που μπορεί να έχει. Ενώ μετά τη ρηγμάτωση λαμβάνει χώρα και η περισσότερη κατανάλωση ενέργειας. Βασικό στοιχείο σε αυτήν τη μετάβαση αποτελεί η εφελκυστική τάση που εφαρμόζεται στο γυαλί στην αρχική ρωγμή.



Σχήμα 6-9. Διάγραμμα αδιάστατης τάσης προς αδιάστατη φόρτιση υαλοπίνακα.



Σχήμα 6-10. Διάγραμμα παραμόρφωσης/πάχους προς αδιάστατη φόρτιση υαλοπίνακα.

a, b: Διαστάσεις υαλοπίνακα.
 D: Δυσκαμψία υαλοπίνακα.
 σ: Τάση.
 t: Πάχος γυαλιού.
 r: Αντίσταση.

Γενικά, η αντοχή του γυαλιού ως την αρχική ρηγμάτωση προσδιορίζεται, όπως και στον χάλυβα και στο σκυρόδεμα, για εφαρμογή έναντι εκρήξεων ως δυναμική αντοχή. Αυτή η δυναμική αντοχή ως την αρχική ρηγμάτωση προκύπτει διαφορετική ανάλογα με το ρυθμό παραμόρφωσης. Ο υπολογισμός της μπορεί να γίνει λογαριθμικά με τρόπο ώστε για το ίδιο γυαλί να μπορούν να υπάρξουν δυο διαφορετικές τάσεις

θραύσεις σ_1, σ_2 οι οποίες προκύπτουν από δύο διαφορετικούς ρυθμούς φόρτισης R_1, R_2 σε δύο διαφορετικά διαστήματα t_1, t_2 . Οπότε:

$$\log\left(\frac{t_1}{t_2}\right) = k \cdot \log\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right) \quad (6-9)$$

$$\frac{1}{k} \int \sigma(t)^k \geq 1 \quad (6-10)$$

$$\int_{t_1} \sigma(t)^k dt = \int_{t_2} \sigma(t)^k dt \rightarrow \int_{t_1} (R_1 \cdot t_1)^k dt = \int_{t_2} (R_2 \cdot t_2)^k dt \quad (6-11)$$

$$R_2 = R_1 \cdot \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{\frac{k+1}{k}} \rightarrow \sigma_2 = R_1 \cdot \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{\frac{17}{16}} \cdot t_2 \quad (6-12)$$

k: Σταθερά (≈ 16).

K: Σταθερά.

Ενώ, μετά τη ρηγμάτωση, όπως προαναφέρθηκε, παύει να υπάρχει καμπτική λειτουργία και υπάρχει μόνο λειτουργία μεμβράνης. Το ραγισμένο γυαλί που συγκρατείται από την πλαστική μεμβράνη εξαρτημένο από το ρυθμό παραμόρφωσης αποτελεί ένα σύνθετο ζήτημα που αναγκάζει τον σχεδιαστή να χρησιμοποιήσει απλές μεθόδους προσομοίωσης, όπως τη χρήση στοιχείου μεμβράνης με ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας και με μία οριακή παραμόρφωση. Αυτά τα δύο βασικά στοιχεία προκύπτουν από πειραματική παρατήρηση. Ειδικά η οριακή αντοχή κατά την οριακή παραμόρφωση φέρεται να είναι ανάλογη με το πάχος της πλαστικής μεμβράνης η οποία αποτελεί την οπισθοφυλακή του υαλοπίνακα ενώ η οριακή παραμόρφωση εξαρτάται καθοριστικά από τον ρυθμό παραμόρφωσης. Έτσι, έχοντας ως αναφορά τον υαλοπίνακα ενός πειράματος, μπορεί να εφαρμοστεί στατική ανάλυση μεμβράνης για να προκύψει η συνάρτηση αντίστασης ενός υαλοπίνακα με άλλες ιδιότητες.

Συνολικά, αφού εξαχθεί η συνάρτηση αντίστασης ενός υαλοπίνακα, μπορεί με άθροιση συναρτήσεων αντίστασης να προσδιοριστεί η τελική συνάρτηση αντίστασης ενός άλλου υαλοπίνακα με πολλαπλές στρώσεις του αρχικού υαλοπίνακα, γεγονός που αποτελεί ασφαλή υπόθεση.

Στοιχεία που δεν συμπεριλαμβάνονται συνήθως είναι:

- Η αλληλεπίδραση αέρα – υαλοπίνακα δεδομένων των μεγάλων μετακινήσεων του δευτέρου που λειτουργούν ευεργετικά.
- Η αρνητική φάση της έκρηξης η οποία μπορεί να βοηθάει και όχι να χειροτερεύει την κατάσταση.
- Οι ερπυστικές παραμορφώσεις της πλαστικής μεμβράνης, δηλαδή η μεταβολή του μέτρου ελαστικότητάς της χρονικά.
- Η εμφάνιση μεγαλύτερων του πρότυπου πειράματος παραμορφώσεις και η χρησιμοποίηση της παραμόρφωσης του πειράματος συντηρητικά.

6.6.5 Κατάταξη υαλοπινάκων με μονολιθικό γυαλί

Οι υαλοπίνακες που δεν συντίθεται από ενδιάμεση στρώση πλαστικής μεμβράνης έχουν διαφορετική λειτουργία. Είναι πιο εύθραυστοι και, άρα, πιο επιρρεπείς σε κίνδυνο ανθρώπινης ζωής, γεγονός που χρήζει μελέτης. Έτσι, έχουν δημιουργηθεί διάφοροι κανονισμοί, όπως της ASTM, του ISO, της GSA ή υπηρεσιών διαφόρων χωρών που ταξινομούν τον κίνδυνο που προκύπτει από τον εκάστοτε υαλοπίνακα.

Η κατάταξη γίνεται σε όρους υλικού και σε όρους γεωμετρίας του χώρου. Έτσι, η εκτόξευση θρυμμάτων από τη θραύση ενός υαλοπίνακα σε μεγάλη απόσταση ή σε μεγάλο ύψος, το μέγεθος και ο αριθμός των θρυμμάτων αποτελεί ένα δείγμα του τρόπου αξιολόγησης.

Η συγκεκριμένη ταξινόμηση είναι ουσιώδους σημασίας και λαμβάνει χώρα μετά τη θραύση του υαλοπίνακα. Ο σχεδιασμός είναι αυτός που δείχνει τι ταχύτητα θα αναπτύξουν τα θρύμματα κατά τη θραύση και, άρα, πόσο επικίνδυνα είναι.

6.7 Σχεδιασμός εξοπλισμού

Κατάλληλη μέριμνα πρέπει να λαμβάνεται και για τον σχεδιασμό των υπολοίπων στοιχείων της κατασκευής που μπορεί να μην αποτελούν μέρος του φέροντος οργανισμού αλλά δεν παύουν να είναι ουσιαστικής σημασίας, αφού πολλές φορές σκοπός της τρομοκρατίας δεν είναι η απώλεια ζωής αλλά η πρόκληση οικονομικής και κοινωνικής ζημίας.

Έτσι, το κύμα που παράγεται κατά την έκρηξη μπορεί να προκαλέσει σημαντική καταστροφή και, μάλιστα, συνήθως όχι άμεσα αλλά να είναι το εφιαλτήριο για μια μετέπειτα μεγαλύτερη ζημιά στον μηχανολογικό και ηλεκτρολογικό εξοπλισμό. Οι βασικοί τρόποι επενέργειας της έκρηξης πάνω στον εξοπλισμό είναι μέσω:

- Απευθείας εφαρμογή δυνάμεων από το εκρηκτικό κύμα.
- Εκτόξευση πάνω του θρυμμάτων με υψηλή ταχύτητα από άλλα τμήματα της κατασκευής.
- Θερμικές επιπτώσεις από την πύρινη σφαίρα που προκαλείται από την έκρηξη.

Ενώ, οι μετέπειτα επιδράσεις μπορεί να είναι ηλεκτρικές εκρήξεις, θραύση σωληνώσεων και διαρροή, δυσλειτουργία κυκλωμάτων. Αυτά είναι θέματα που χρειάζονται δέουσα προσοχή ειδικά στην περίπτωση που αποτελούν μέσο αποθήκευσης επικίνδυνων ουσιών για το περιβάλλον και τον άνθρωπο. Έχει σημασία, λοιπόν, το τι πρεσβεύει ο εξοπλισμός και ανάλογα με αυτόν κατανέμονται τα επίπεδα ασφαλείας που επιδιώκονται (όπως προστασία ζωής, απρόσκοπτη λειτουργία και ούτω καθεξής).

Έτσι, καθορίζονται διάφοροι τρόποι προστασίας του εξοπλισμού:

- Εφαρμογή κατάλληλων με την περίπτωση αρμών.
- Διαμόρφωση ευελιξίας στις στηρίξεις του εξοπλισμού για αποφυγή θραύσης από διαφορικές μετακινήσεις.
- Απομάκρυνση ηλεκτρολογικού εξοπλισμού από στοιχεία που φέρουν υγρά, όπως δεξαμενές και σωληνώσεις.
- Προσθήκη επιπλέον εξωτερικού τοιχώματος σε κρίσιμες σωληνώσεις, ώστε αυτό να υποστεί τη ζημιά κατά την έκρηξη και όχι η κύρια σωλήνωση.

Το κομμάτι των σωληνώσεων είναι ιδιαίτερα σημαντικό και χρήζει περαιτέρω ανάλυσης. Κατά την έκρηξη οι σωληνώσεις υπόκεινται σε διάφορες επιδράσεις:

- Διατμητική δράση: Οι σωληνώσεις δέχονται σημαντική διάτμηση κατά τη μεταφορά τους διαμέσου τοίχων ή πλακών. Πριν και μετά, λοιπόν, από το σημείο επαφής των σωληνώσεων με τον τοίχο ή την πλάκα πρέπει να αυξηθεί η ευελιξία τους. Αντίστοιχη κατάσταση επικρατεί κατά τη σύνδεση σωληνώσεων διαφορετικών στοιχείων μεταξύ τους, όπως συμβαίνει στην περίπτωση σύνδεσης του σωλήνα ενός μηχανήματος με τον σωλήνα ενός τοίχου. Επειδή η απόκριση του κτιρίου και του τοίχου είναι διαφορετική αυτής του μηχανήματος κατά την έκρηξη, η μετακίνηση των σωληνών δεν είναι κοινή κι έτσι το σημείο σύνδεσης των σωληνώσεων έχει ανάγκη ευελιξίας.
- Θλιπτική και εφελκυστική δράση: Οι σωληνώσεις δέχονται σημαντική θλίψη αλλά και εφελκυσμό όπως και τα καλώδια σε περίπτωση που διατρέχουν κατά μήκος κάποιο δομικό στοιχείο αλλά η στήριξή τους είναι ακλόνητη, όπως στην περίπτωση που αλλάζουν κατεύθυνση. Εκεί επιδιώκεται πάλι ευελιξία στις σωληνώσεις ή κατάλληλοι αρμοί διαστολής, ενώ στα καλώδια επιδιώκεται απλώς ένα περιθώριο επιμήκυνσής τους.

- Παραμόρφωση: Σε περίπτωση που οι σωληνώσεις διατρέχουν κατά μήκος έναν τοίχο ο οποίος παραμορφώνεται εγκάρσια πρέπει να έχουν σχεδιαστεί ώστε να μπορούν να παραλάβουν και εκείνες αυτήν την παραμόρφωση.
- Διάρρηξη: Λόγω των θρυμμάτων που προκαλούνται κατά την έκρηξη, είναι αναγκαία η προστασία των σωληνώσεων για να αποφύγουν τον κίνδυνο διάρρηξης.
- Στηρίξεις: Οι στηρίξεις σωληνώσεων στο μέσο τοίχων και πλακών επιφέρει ένα πρόβλημα που σχετίζεται με το γεγονός ότι ενώ αρχικά έχουν κοινή υψηλή ταχύτητα τα στοιχεία, στην πορεία ο τοίχος ή η πλάκα επιβραδύνει και η σωλήνωση που έχει ήδη υψηλή ταχύτητα εμφανίζει τον κίνδυνο αποκόλλησης. Αλλά και στην περίπτωση που η στήριξη είναι στα άκρα, επειδή υπάρχει πιθανότητα βλάβης στη στήριξη ή στο ίδιο το κύριο το δομικό στοιχείο, η σωλήνωση πρέπει να είναι ικανή να φέρει το βάρος της.

Σύνδεση σωληνώσεων με αγωγούς ρεύματος: Οι σωληνώσεις πρέπει ως γείωση να βρίσκονται σε συνέργεια με το έδαφος και η σύνδεση τους με τους αγωγούς ρεύματος να είναι άριστη για να γίνει μεταφορά τυχόν σφάλματος με ασφάλεια στο έδαφος.

Παρ' όλα αυτά, πρέπει να σχεδιάζεται και ένα πλάνο δράσης για τα διάφορα ζητήματα που ανακύπτουν και που σχετίζονται με τη σχεδιαζόμενη επιτελεστικότητα:

- Προστασία ζωής και ευκολία εκκένωσης.
- Άμεση χρήση.
- Απρόσκοπτη λειτουργία.

6.7.1 Προστασία ζωής και ευκολία εκκένωσης

Βασική στόχευση της προστασίας ζωής είναι η θωράκιση των προστατευόμενων χώρων (οι οποίοι μπορεί να υπάρχουν είτε ως δωμάτια ελέγχου είτε ως χώροι έκτακτης ανάγκης) στους οποίους θα βρίσκεται το ανθρώπινο δυναμικό για την αποφυγή των κινδύνων που εγκυμονούν από καταστροφή του εξοπλισμού σε περίπτωση έκρηξης.

Οι προστατευόμενοι χώροι, λοιπόν, σχεδιάζονται με μέριμνα όσον αφορά:

- Την πιθανή εξάπλωση επικίνδυνων ουσιών για την ανθρώπινη ζωή που υπάρχουν στον χώρο.
- Τις εγκαταστάσεις υψηλών ηλεκτρικών τάσεων από τις οποίες μπορεί να προκύψει ηλεκτρική έκρηξη και άρα απομάκρυνση από αυτές.
- Την πιθανή διαρροή αερίου και, άρα, τη σωστή τοποθεσία των προστατευόμενων χώρων υψομετρικά ανάλογα με το αν το αέριο είναι ελαφρύτερο ή βαρύτερο του αέρα.
- Τη φύλαξη υγρών σε δεξαμενές ή σωληνώσεις και, άρα, απομάκρυνση προστατευόμενων χώρων από αυτές, αφού μπορούν να οδηγήσουν σε πλημμύρα.
- Την πιθανή θραύση διαφόρων επικίνδυνων στοιχείων της κατασκευής.
- Τις ίδιες τις λειτουργίες τους, όπως την παροχή πόσιμου νερού (π.χ. με προαποθήκευση νερού στους χώρους), ικανοποιητικής αποχέτευσης (π.χ. με χημικές τουαλέτες για την αποφυγή σωληνώσεων), φωτισμού (που θα είναι σε συνέχεια με την οδό διαφυγής και θα έχει κοινό φωτισμό με αυτήν για να είναι ευδιάκριτη), επικοινωνίας (βασισμένης σε σταθερή τηλεφωνία), ηλεκτρικού ρεύματος, εξαερισμού και φυσιολογικής θερμοκρασίας (π.χ. με τη χρήση ανθεκτικού εξοπλισμού που θα προστατεύεται από τις διάφορες διαρροές που μπορεί να υπάρχουν) και αντιπυρικής προστασίας (π.χ. με πυροσβεστήρες).

Η θωράκιση των προστατευόμενων χώρων θα πρέπει να γίνεται σε σύμπραξη με τη θωράκιση των οδών διαφυγής. Αυτές θα πρέπει να έχουν σχεδιαστεί με κατάλληλο φωτισμό για να ευδιάκριτες σε περίπτωση πανικού και να έχουν κατάλληλο εξαερισμό ο οποίος προτιμάται να είναι φυσικός. Σε αυτήν την κατεύθυνση δεν πρέπει να αμελείται το είδος των ανθρώπων που κάνουν χρήση της κατασκευής, καθώς μπορεί να είναι καταρτισμένοι και ευκίνητοι τεχνίτες σε μία βιομηχανία αλλά μπορεί και να είναι και άτομα

με κινητικές δυσκολίες, οπότε οι οδοί διαφυγής πρέπει να έχουν κατάλληλη διαμόρφωση και οι ανελκυστήρες να είναι άτρωτοι και συνδεδεμένοι με το δωμάτιο ελέγχου.

6.7.2 Άμεση χρήση

Προκειμένου να γίνει άμεση χρήση της κατασκευής με περιορισμένες βλάβες μετά την έκρηξη πρέπει να λαμβάνονται κάποιες προφυλάξεις. Αυτές σχετίζονται με την ποσότητα, τη διασπορά στο χώρο και τη διαχείριση του εξοπλισμού.

Η ποσότητα πρέπει να είναι επαρκής ώστε ακόμη και μετά την καταστροφή σημαντικού μέρους τους να είναι εφικτή η άμεση λειτουργία με τη χρήση εφεδρειών. Ενώ, αναγκαία καθίσταται και η διασπορά του εξοπλισμού στον χώρο προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος ξαφνικής απώλειας ολόκληρου του εξοπλισμού που βρίσκεται κοντά στην έκρηξη. Παράλληλα, πρέπει να υπάρχει εφεδρική παροχή ηλεκτρικού ρεύματος με τη χρήση γεννητριών. Σημαντικός παράγοντας, όμως, είναι η διαχείριση της έκτακτης κατάστασης όσον αφορά τον εξοπλισμό. Πρέπει να ακολουθούνται τακτικές μείωσης της πιθανότητας ζημιάς και αύξησης της εποπτείας της κατάστασης εκτάκτου ανάγκης. Έτσι επιδιώκεται:

- Η διακοπή της παροχής του ηλεκτρικού ρεύματος σε μη κρίσιμα στοιχεία.
- Η διακοπή της παροχής αερίου αν υπάρχει.
- Η επιβολή των ανελκυστήρων να κατέβουν στη βάση τους.
- Το αυτόματο κλείσιμο των πορτών των προστατευόμενων χώρων
- Η παύση της λειτουργίας των μη κρίσιμων στοιχείων εξοπλισμού.

6.7.3 Απρόσκοπη λειτουργία

Για την επιτυχή λειτουργία ολόκληρης της κατασκευής ή μέρους της ως να μην είχε συμβεί έκρηξη πρέπει να επιχειρηθεί η επέκταση των προαναφερθέντων μεθόδων αντιμετώπισης της έκρηξης.

Με αυτόν τον τρόπο, αναζητείται η ταχύτερη αντικατάσταση του πληγμένου εξοπλισμού με προσχεδιασμένες οδηγίες εφαρμογής και με προετοιμασμένο τον χώρο για ένα τέτοιο ενδεχόμενο ενώ επιδιώκεται από πριν η τοποθέτησή του στον εσωτερικό χώρο για να περιοριστεί η βλάβη. Δίνεται έμφαση στη συνεχή αποθήκευση των δεδομένων για την αποφυγή της πιθανότητας απώλειάς τους. Πολλές φορές, υπάρχουν ήδη δευτερεύουσες (ίσως κρυφές) εγκαταστάσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν αμέσως μετά την έκρηξη.

6.8 Ολιστικός σχεδιασμός κατασκευής

Οι υπολογισμοί των προαναφερθέντων παραγράφων συνίστανται στη διαστασιολόγηση μεμονωμένων μελών δίχως να ληφθεί υπόψη ο υπόλοιπος φορέας ή λαμβάνοντάς τον υπόψιν σε περιορισμένο βαθμό. Τούτη η τακτική πρέπει να χρησιμοποιείται ως γενική λύση έτσι ώστε να υπάρχει άμεσος και όχι χρονοβόρος σχεδιασμός. Ωστόσο, παράλληλα επιβάλλεται και η συνολική θεώρηση του φορέα, ειδικά στην περίπτωση που κάποιο μεμονωμένο μέλος αστοχεί και αποτελεί κίνδυνο για την υπόλοιπη κατασκευή.

Αυτός ο κίνδυνος έχει ως δυσμενέστερη μορφή τη δυσαναλογική κατάρρευση αντί της προοδευτικής κατάρρευσης. Η βασική διαφοροποίηση αυτών των δύο μορφών κατάρρευσης είναι ότι μετά την αστοχία ενός στοιχείου στην περίπτωση της προοδευτικής κατάρρευσης η φόρτιση ακολουθεί επιτυχώς εναλλακτικούς δρόμους ενώ στη δυσαναλογική κατάρρευση όχι. Επιτυχής χαρακτηρίζεται ο εναλλακτικός δρόμος που επιτρέπει τη διανομή του φορτίου από την περιοχή αστοχίας στην υπόλοιπη κατασκευή με σταδιακή αστοχία των συντρεχόντων στοιχείων ως την ολική κατάρρευση του φορέα.

Οι διάφοροι κανονισμοί αντιμετωπίζουν την πιθανότητα της δυσαναλογικής κατάρρευσης επιβάλλοντας την ευστάθεια του φορέα με την απώλεια τοπικών κρίσιμων στοιχείων, όπως μίας δοκού ή ενός στύλου και με τον περιορισμό των δομικών αστοχιών στα πέριξ στοιχεία. Αυτοί οι κανονισμοί ταξινομούν το επίπεδο του κινδύνου έναντι έκρηξης το οποίο θα πρέπει να αντιμετωπίσει ο εκάστοτε φορέας έχοντας ως κριτήρια:

- Τον αριθμό των ατόμων που κάνουν χρήση της κατασκευής.
- Το είδος της χρήσης της κατασκευής.
- Την παλαιότητα της κατασκευής.
- Τον τρόπο κατασκευής.
- Το είδος και το επίπεδο της τρομοκρατικής απειλής.
- Τον χρόνο εκκένωσης.
- Τις κοινωνικές απαιτήσεις.

Με οδηγό τους κανονισμούς πρέπει να αναζητείται η χρυσή τομή ανάμεσα στην οικονομία και στην όσο το δυνατόν μεγαλύτερη στιβαρότητα στον φορέα. Γενικώς, σε έναν φορέα από δομικό χάλυβα ή οπλισμένο σκυρόδεμα αυτή η τομή προσεγγίζεται χωρίς υψηλή δυσχέρεια. Ιδίως στην Ελλάδα όπου οι κατασκευές διαστασιολογούνται με πρώτιστο τον σεισμικό κίνδυνο, οι απαιτήσεις σε υλικό και πλάστιμη λειτουργία έχουν ανάλογες επιδράσεις στην αντιμετώπιση του κινδύνου έκρηξης.

Η βασική επιδίωξη της αντιμετώπισης του ενδεχομένου δυσαναλογικής κατάρρευσης μπορεί να επιτευχθεί ακολουθώντας τους εξής τρόπους:

- Παγίωση εναλλακτικών δρόμων φόρτισης.
- Εφαρμογή γενικών κανόνων πλαστιμότητας, συνέχειας και συνδέσεων.
- Σχεδιασμός μεμονωμένων χαρακτηριστικών στοιχείων.

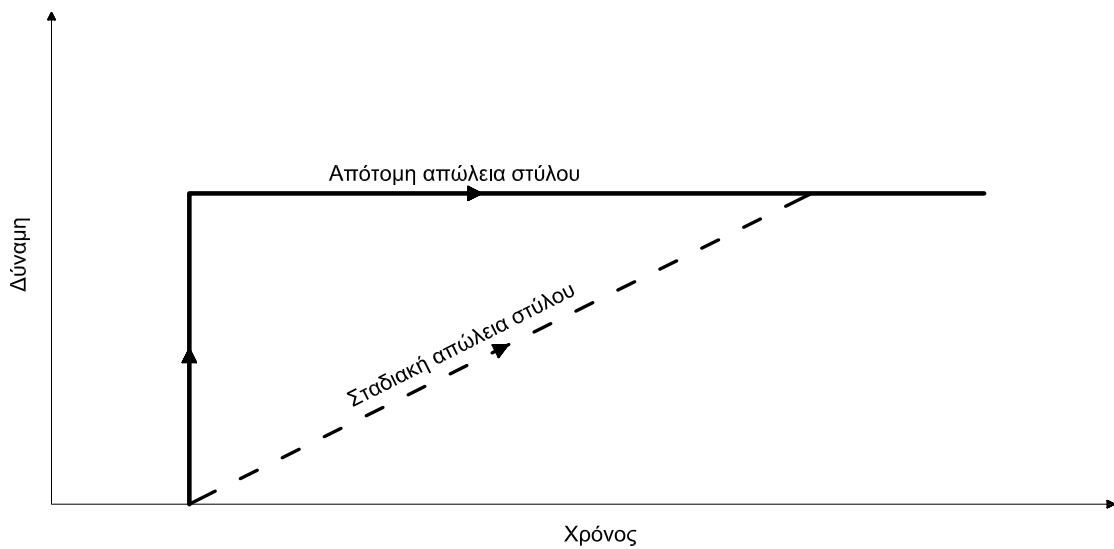
6.8.1 Παγίωση εναλλακτικών δρόμων φόρτισης

Είναι αναγκαία η επιβολή επαρκούς αντοχής εναλλακτικών δρόμων διανομής του φορτίου μετά την απώλεια κάποιου στοιχείου το οποίο έχει αστοχήσει εξαιτίας της έκρηξης. Οπισθοφυλακή των εναλλακτικών δρόμων φόρτισης αποτελούν οι:

- Σχοινοειδής δράση, δηλαδή απώλεια καμπτικής και διατμητικής αντίστασης και παραμονή μόνο της αξονικής (για παράδειγμα δοκοί που συντρέχουν σε στύλο).
- Δράση μηχανισμού Vierendeel (για παράδειγμα δοκοί που συντρέχουν σε στύλους).
- Δράση μεμβράνης (για παράδειγμα πλάκα στην οποία στηρίζεται στύλος).

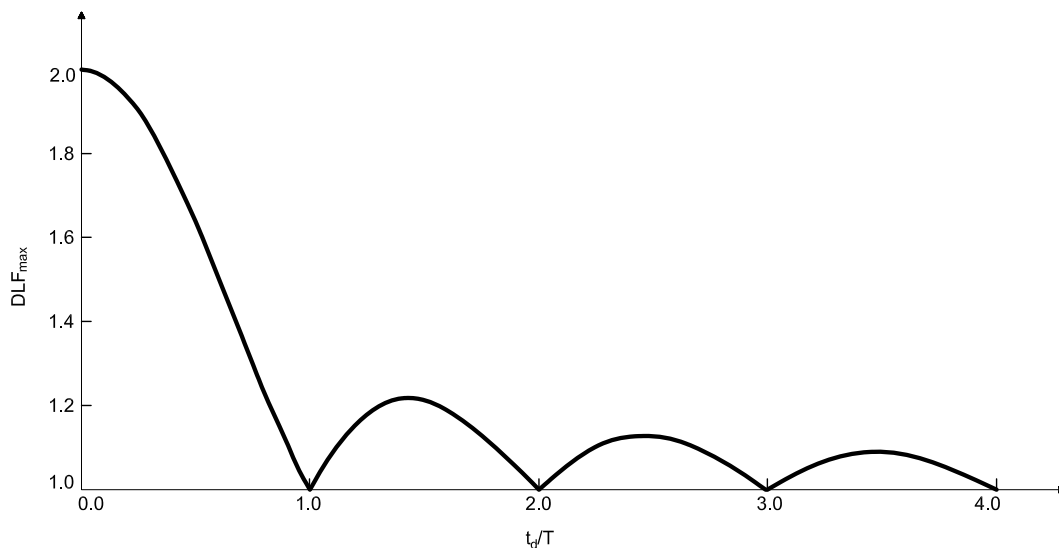
Όταν, λοιπόν αστοχεί ένα υποστύλωμα που αποτελεί βασικό στοιχείο της στατικότητας ενός κτιρίου, κρίσιμη είναι η μεταφορά των άνωθεν βαρυτικών φορτίων, δηλαδή των φορτίων που φέρνει ο υπερκείμενος στύλος που δεν έχει αστοχήσει και οι αντίστοιχες υπερκείμενες πλάκες και δοκοί.

Η μεταφορά αυτή των βαρυτικών δυνάμεων μπορεί να είναι είτε απότομη είτε σταδιακή. Αυτό το γεγονός επηρεάζει ανάλογα και την τελική φόρτιση. Έτσι, η απότομη απώλεια του υποστυλώματος οδηγεί σε φόρτιση διπλάσια της τελείως αργής απώλειας.



Σχήμα 6-11. Διαφοροποίηση απότομης απώλειας και σταδιακής απώλειας στύλου.

Όμως, το τελικό φορτίο που επιδρά στα πέριξ στοιχεία πρέπει να λαμβάνει υπόψιν και τη πλαστικότητα τους. Έτσι, το αποτέλεσμα τους θα είναι διαφορετικό του διπλάσιου στην περίπτωση της απότομης απώλειας και, μάλιστα, χαμηλότερο.



Σχήμα 6-12. Αύξηση τελικού φορτίου ανάλογα με τη διάρκεια φόρτισης και την ιδιοπερίοδο μονοβάθμιου ελαστικού ταλαντωτή χωρίς απόσβεση.

Η απώλεια δομικών στοιχείων δύναται να θεωρηθεί ανεξαρτήτως σεναρίου πρόκλησης έκρηξης ή εξαρτημένα από σεναριο πρόκλησης έκρηξης. Το σεναριο πρόκλησης έκρηξης έγκειται στον προσδιορισμό των αιτιών της έκρηξης, στα σημεία που αυτή θα προκληθεί, στον όγκο της εκρηκτικής ύλης και ούτω καθεξής. Η πρόβλεψη του σεναρίου από την πλευρά του σχεδιαστή έχει σημασία καθώς αυτή είναι που θα κρίνει ποια είναι τα κρίσιμα στοιχεία της κατασκευής που θα θεωρηθεί ότι αστοχούν και που, άρα, ο στατικός ρόλος τους μεταφέρεται στα παράπλευρα στοιχεία. Δίνει την ευκαιρία να προσομοιωθεί η απώλεια του δομικού στοιχείου με ακρίβεια και όχι με τρόπο συντηρητικό ως απότομη.

Όμως, η τακτική του σεναρίου πρόκλησης έκρηξης αποτελεί συνήθως μια σχοινοτενή διαδικασία και χάριν απλούστευσης και γενίκευσης συνήθως ακολουθείται η τακτική της απώλειας δομικών στοιχείων ανεξαρτήτως σεναρίων πρόκλησης έκρηξης. Ωστόσο, μια εικόνα του ποια στοιχεία είναι τα πιο κρίσιμα έχοντας μια γενική ιδέα πιθανών σεναρίων πρόκλησης έκρηξης αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο στο να ληφθεί ιδιαίτερη μέριμνα για εκείνα τα στοιχεία.

Αφού επιλεγεί το στοιχείο που αστοχεί, τότε έρχεται η στιγμή της στατικής ανάλυσης η οποία μπορεί να είναι:

- Γραμμική ή μη γραμμική στατική ανάλυση βάσει των δυναμικών συντελεστών φορτίου.
- Μη γραμμική στατική ανάλυση βάσει της εξίσωσης ενέργειας θεωρώντας απλοποιημένη δυναμική απόκριση.
- Γραμμική ή μη γραμμική δυναμική ανάλυση.

Γραμμική ή μη γραμμική στατική ανάλυση βάσει των δυναμικών συντελεστών φορτίου

Το μειονέκτημα αυτών των αναλύσεων είναι ότι εξαρτώνται από τον δυναμικό συντελεστή φορτίου, ο υπολογισμός του οποίου αποτελεί μια διαδικασία επίπονη. Όπως προαναφέρθηκε, ένας συνήθης αλλά συντηρητικός δυναμικός συντελεστής φορτίου αποτελεί το 1.0 το οποίο αντιστοιχεί σε ελαστική συμπεριφορά χωρίς απόσβεση. Αν θεωρηθεί, όμως, ως εγγυημένη η πλαστιμότητα, τότε ο συντελεστής αυτός είναι αρκετά υψηλός αφού στην περίπτωση της πλαστικής συμπεριφοράς οι τιμές κυμαίνονται ανάμεσα στο 1.3 και το 1.5. Έτσι, είναι προτιμότερος ο ακριβής προσδιορισμός του δυναμικού συντελεστή φορτίου και η μετέπειτα εφαρμογή στατικής ανάλυσης.

Η ανάλυση μπορεί να είναι γραμμική, δηλαδή να υπάρχει γραμμικότητα υλικού, γεωμετρική γραμμικότητα και οιονεί στατικά εφαρμοζόμενο φορτίο. Αυτό έχει άμεση συνέπεια και ο σχεδιασμός να είναι ελαστικός και τα στοιχεία να διαστασιολογούνται ως να παραμένουν στην ελαστική περιοχή. Αυτή η κατεύθυνση είναι συντηρητική και άρα η γραμμική ανάλυση είναι γενικά μια συντηρητική αλλά απλή μέθοδος.

Στον αντίποδα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μη γραμμική στατική ανάλυση τόσο σε όρους μη γραμμικότητας υλικού όσο και σε όρους μη γραμμικότητας γεωμετρίας. Αυτή η ανάλυση είναι προς την πλευρά της ακρίβειας με άμεσα αποτελέσματα για τη διαστασιολόγηση του φορέα.

Μη γραμμική στατική ανάλυση βάσει της εξίσωσης ενέργειας θεωρώντας απλοποιημένη δυναμική απόκριση.

Η μη γραμμική στατική ανάλυση επιτυγχάνεται με στόχο την ενεργειακή ισορροπία, δηλαδή την εξίσωση του εξωτερικού έργου με την εσωτερική ενέργεια που αποτελείται από την ενέργεια ελαστικών παραμορφώσεων, την ενέργεια πλαστικών παραμορφώσεων και την καταναλισκόμενη ενέργεια σε απόσβεση.

Όσον αφορά την προσομοίωση, η ενδεχόμενη αστοχία ενός στύλου προσδιορίζεται με τη σταδιακή αύξηση του βαρυντικού φορτίου που προηγουμένως έφερε και ξεκινώντας από γραμμική απόκριση, στην πορεία συναντά τόσο μη γραμμικότητα υλικού όσο και γεωμετρική μη γραμμικότητα. Αυτό δίνει την ευκαιρία να επιστρατευτεί η πλαστική συμπεριφορά των δομικών στοιχείων. Η μορφή παραμόρφωσης προσδιορίζεται όπως είναι αναμενόμενο να συμβεί κατά την απώλεια του δομικού στοιχείου.

Έτσι μπορούν να προσδιοριστούν οι μέγιστες μετακινήσεις που μπορεί να αναπτύξει ο φορέας. Όσο διατηρείται η ενεργειακή ισορροπία, ο φορέας δεν έχει καταρρεύσει. Αντιθέτως, αν το εξωτερικό έργο είναι μεγαλύτερο της εσωτερικής ενέργειας, τότε ο φορέας έχει υποστεί κατάρρευση. Ενώ δεν χρειάζεται

ο υπολογισμός των δυναμικών συντελεστών φορτίου που απαιτούν εμπειρία, τουναντίον ο δυναμικός συντελεστής φορτίου μπορεί να υπολογιστεί μέσα από τη μη γραμμική ανάλυση.

Η μέθοδος γενικά αποτελεί μια ενδιάμεση εναλλακτική ανάμεσα στη μη γραμμική δυναμική ανάλυση και στην ανάλυση βάσει των δυναμικών συντελεστών φορτίου. Μετριάζει, λοιπόν, τη δυσκολία που βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα κατά τη δυναμική ανάλυση αλλά και την ακρίβεια μια που για παράδειγμα δεν λαμβάνει υπόψιν την απόσβεση.

Γραμμική ή μη γραμμική δυναμική ανάλυση.

Οι αναλύσεις αυτές είναι χρονικές αναλύσεις και αποτελούν τις ιδανικές μεθόδους όταν επιδιώκεται ακρίβεια σε βάρος της απλούστευσης και της ευκολίας. Ωστόσο, γλιτώνεται η ανάγκη υπολογισμού του δυναμικού συντελεστή φορτίου, γεγονός άρδην βοηθητικό. Και στις δύο περιπτώσεις η φόρτιση μπορεί να αναπτυχθεί μέσα από σενάριο πρόκλησης έκρηξης ή χωρίς αυτό. Το μέτρο για την επιλογή παραμένει και πάλι η ακρίβεια και η απλούστευση.

Πιο συγκεκριμένα η περίπτωση της γραμμικής ανάλυσης αποτελεί την ευκολότερη εκδοχή, αφού δεν συμπεριλαμβάνει τη μη γραμμικότητα του υλικού. Όμως, αυτός είναι και ο λόγος που πάσχει, γι' αυτό και η χρήση της περιορίζεται μόνο σε προπαρασκευαστικό στάδιο της μελέτης.

Αντιθέτως, η μη γραμμική δυναμική ανάλυση αποτελεί την πεμπτουσία της ακρίβειας όσον αφορά τη συμπεριφορά της κατασκευής απέναντι στην έκρηξη. Παρόλα αυτά, όμως, είναι και ιδιαίτερα περίπλοκη. Η κατάσταση, μάλιστα, γίνεται ακόμη δυσμενέστερη σε υπολογιστικό κόστος όταν η ανάλυση εκτελείται μέσα από σενάριο πρόκλησης έκρηξης, πράγμα όμως που μπορεί να αποφευχθεί χωρίς εισδοχή αξιοσημείωτου σφάλματος. Έτσι, η μη γραμμικότητα υλικού, η μη γραμμικότητα γεωμετρίας και η ολοκλήρωση τους χρονικά καθιστούν τη μη γραμμική δυναμική ανάλυση τη βέλτιστη μέθοδο ανάλυσης.

6.8.2 Εφαρμογή γενικών κανόνων πλαστιμότητας και συνδέσεων

Ικανοποιητική τακτική για την αποφυγή δυσαναλογικής κατάρρευσης αποτελεί η εφαρμογή κάποιων γενικών κανόνων. Κάποιοι εξ αυτών μπορεί να είναι:

- Τοποθέτηση εφεδρειών στις μεταλλικές συνδέσεις.
- Τοποθέτηση εγκάρσιου οπλισμού σε κρίσιμες θέσεις προς αποφυγή ψαθυρών αστοχιών.
- Χρήση διατομών με μεγάλη δυνατότητα ανάπτυξης πλαστικών στρωφών.
- Αποφυγή φυτευτών υποστρωμάτων.
- Αποφυγή μεγάλου αριθμού έμμεσων στηρίξεων δοκού επί δοκού.
- Εφαρμογή ικανοτικών διατάξεων.

Έτσι, επιτυγχάνεται έμμεσος σχεδιασμός με στόχο την αύξηση της στιβαρότητας και την προοδευτική κατάρρευση.

6.8.3 Σχεδιασμός μεμονωμένων χαρακτηριστικών στοιχείων

Ο σχεδιασμός αυτός συνδέεται άμεσα με το γεγονός ότι υπάρχει ισχυρή πιθανότητα η ενδεχόμενη απώλεια κάποιου δομικού στοιχείου να μη συντείνει σε προοδευτική κατάρρευση αλλά σε δυσαναλογική σε επίπεδο σχεδιαστικό λόγω της φύσης του φορέα. Αυτή η διαπίστωση μπορεί να επιλυθεί με τον σχεδιασμό του εκάστοτε στοιχείου με τρόπο τέτοιο ώστε να αντέχει σίγουρα τη φόρτιση της έκρηξης.

Η μέθοδος αυτή εγείρει ανησυχίες γύρω από το γεγονός ότι πιθανή αστοχία του στοιχείου (όσο άρτια κι αν έχει σχεδιαστεί - κατασκευαστεί) οδηγεί μάταια σε δυσαναλογική κατάρρευση. Αυτό αποτελεί ένα ρίσκο που είναι σε κάθε περίπτωση απευκταίο.

6.9 Σχεδιασμός έναντι τρομοκρατίας

Στην κατεύθυνση του περιορισμού των τρομοκρατικών επιθέσεων σε επίπεδο διεθνές, έχουν τεθεί σε εφαρμογή κανονιστικές διατάξεις που περιορίζουν στην ουσία την κατοχή, τη μεταφορά και τη χρήση εκρηκτικών υλών από τους κοινούς πολίτες. Έτσι, η χρήση στρατιωτικών εκρηκτικών υλών έχει περιοριστεί στο στρατιωτικό σώμα, η χρήση εκρηκτικών κατεδαφίσεων ή διάνοιξης ορυχείων έχει περιοριστεί στους επαγγελματίες του κατασκευαστικού κλάδου και ούτω καθεξής.

Ωστόσο, αυτές οι προσπάθειες δεν έχουν τελεσφορήσει πλήρως δεδομένου ότι έχουν παρατηρηθεί κλοπές εκρηκτικών υλών από στρατόπεδα και εργοτάξια. Το πλέον εύστοχο ελληνικό παράδειγμα ενός τέτοιου περιστατικού είναι η κλοπή γενικότερα πολεμοφοδίων (και εκρηκτικών υλών) στις 24 Δεκεμβρίου του 1989 από το στρατόπεδο Συκουρίου με τη δράση της τρομοκρατικής οργάνωσης 17 Νοέμβρη.

Παρ' όλα αυτά, οι κανονιστικές διατάξεις έχουν επιβάλει σαφή περιορισμό της διακίνησης εκρηκτικών υλών παγκοσμίως. Έτσι, οι πιθανοί τρομοκράτες έχουν καταφύγει κυρίως στην παραγωγή αυτοσχέδιων εκρηκτικών μηχανισμών. Αυτοί οι μηχανισμοί μπορεί μεν να έχουν χαμηλότερο εκρηκτικό φορτίο αλλά λόγω του γεγονότος ότι χρησιμοποιούνται σε μεγάλες ποσότητες (για παράδειγμα σε οχήματα τύπου van) καταλήγουν να είναι ιδιαίτερα αποδοτικοί.

6.9.1 Διαχείριση κινδύνου τρομοκρατίας

Η τρομοκρατία έχει τους εξής τρόπους εφαρμογής:

- Αποστολή ταχυδρομικού δέματος που εμπεριέχει εκρηκτική ύλη
- Αυτοσχέδιος εκρηκτικός μηχανισμός εντός του κτιρίου
- Αυτοσχέδιος εκρηκτικός μηχανισμός εκτός του κτιρίου, είτε σε κάποιο είδος όπως σακίδιο είτε με τη χρήση οχήματος.

Η διαχείριση των κινδύνων αυτών πρέπει να ακολουθεί πρότυπες διαδικασίες για την κατά το δυνατόν επαρκέστερη αντιμετώπισή τους. Έτσι, συστήνονται πλάνα δράσης για παράδειγμα στην περίπτωση ύπαρξης τηλεφωνήματος για βόμβα, στον καθημερινό σωματικό έλεγχο στην είσοδο και ούτω καθεξής.

Η κατανόηση αυτών των μεθόδων μπορεί να επιτευχθεί με την εξής βιβλιογραφία:

- PAS 97: Mail screening and security, British standards institution.
- Protecting against terrorism, Centre for the protection of national infrastructure.
- Personnel security, Centre for the protection of national infrastructure.
- Pre-employment screening, Centre for the protection of national infrastructure.
- Secure in the knowledge, Centre for the protection of national infrastructure.

6.9.2 Απειλή με τη χρήση οχημάτων

Γενικώς, τα οχήματα αποτελούν ένα ιδανικό μέσο για να τεθεί σε λειτουργία ένα πλάνο τρομοκρατικής δράσης. Υπάρχουν διάφορες επιλογές για ένα τρομοκρατικό χτύπημα όπου μπορεί να υπάρχει είτε παραπλανητική είτε επιθετική δράση:

- Μέσω παρκαρίσματος, όπου μπορεί να βρεθεί παρκαρισμένο το όχημα των τρομοκρατών είτε υπέργεια είτε ακόμη δυσμενέστερα υπόγεια, σε περίπτωση που υπάρχει ελλιπής επιτήρηση του χώρου από την πλευρά του προσωπικού ασφαλείας.
- Μέσω εισβολής χωρίς κρούση με κάποιο στοιχείο του χώρου, όπου δηλαδή μπορεί να υπάρχει μπάρα ελέγχου αλλά το εκάστοτε όχημα, όπως μια μοτοσυκλέτα, περνάει διαμέσου της λωρίδας κίνησης των πεζών ή το εκάστοτε όχημα ακολουθούσε κολλητά από πίσω κάποιο όχημα το οποίο έχει ήδη ελεγχθεί και η μπάρα έχει ανοίξει για τη δίοδό του.

- Μέσω εισβολής με κρούση όπου το μπροστινό ή πίσω μέρος του οχήματος χρησιμοποιείται για την καταστροφή των στοιχείων προστασίας και εισβάλλει εντός του κυρίως χώρου επιθετικά.
- Μέσω παραπλάνησης των ελεγκτών όπου μπορεί να επιτευχθεί η είσοδος εντός του κυρίως χώρου εκμεταλλεύοντας κάποιο κενό ασφαλείας.
- Μέσω δούρειου ίππου, όπου ο εκρηκτικός μηχανισμός τοποθετείται σε όχημα που ανήκει στη λίστα εξουσιοδοτημένων οχημάτων, απλώς ο οδηγός του δεν έχει συνειδητοποιήσει ότι μεταφέρει τον εκρηκτικό μηχανισμό ο οποίος έχει τοποθετηθεί προηγουμένως.
- Μέσω απειλής είτε του οδηγού ενός εξουσιοδοτημένου οχήματος είτε των ελεγκτών του προσωπικού ασφαλείας.

Τα βασικά στοιχεία που πρέπει να εκτιμηθούν για τον κίνδυνο που ελλοχεύει από τα οχήματα είναι:

- Τοποθεσία οχήματος ή πιο απλοποιητικά απόσταση οχήματος από στόχο (Stand-off distance), όπως για παράδειγμα στα όρια φράχτη ενός οικοπέδου.
- Εκρηκτικό φορτίο που μεταφέρει το όχημα.

Κεντρικός στόχος από την πλευρά των τρομοκρατών είναι η επίτευξη έκρηξης όσο πιο κοντά στον στόχο είναι δυνατό, ακόμη και εντός της κατασκευής (με την εκτόξευση οχήματος εντός του στόχου). Έτσι, κατά τον σχεδιασμό ενός κτιρίου, αναγκαία είναι επισφράγιση κάποιας συγκεκριμένης απόστασης μέσα στην οποία δεν υπάρχει παρά ελάχιστη πιθανότητα πυροδότησης έκρηξης με τη χρήση φραχτών, μπαρών εισόδου και άλλων μέσων.

Όμως, κάτι τέτοιο δεν είναι πάντα εφικτό, ιδιαίτερα στις υφιστάμενες κατασκευές. Έτσι, θα πρέπει να εκτελεστεί ένας έλεγχος διαχείρισης κινδύνου ώστε να υπολογιστούν οι πιθανοί κίνδυνοι που εγκυμονούν.

Έτσι, ο σχεδιασμός καταλήγει να αποτελεί έναν συνδυασμό των:

- Εξασφάλιση επαρκούς απόστασης ασφαλείας από στόχο, τέτοιας που να μη μπορεί να προσβάλλεται από οχήματα, και, άρα, ο σχεδιασμός να γίνεται με ελάχιστα φορτία έκρηξης.
- Προστασία του φορέα από τα φορτία που μπορεί να προκύψουν από τον πιθανό κίνδυνο μιας έκρηξης μέσα από τον έλεγχο διαχείρισης κινδύνου θεωρώντας περιορισμένη ή μηδενική απόσταση ασφαλείας από στόχο και, άρα, θεωρώντας υψηλά φορτία έκρηξης.

Η ακριβής τομή ανάμεσα στις δύο ακραίες εναλλακτικές που λαμβάνεται προκύπτει έπειτα από ανάλυση της δυναμικής των οχημάτων, όπου εξετάζεται:

- Το είδος του οχήματος.
- Η επιφάνεια του εδάφους.
- Η ταχύτητα που μπορεί να αναπτύξει το όχημα.
- Η μηκοτομή και η οριζοντιογραφία της οδοποιίας πρόσβασης.
- Οι εναλλακτικές προσβάσεις που μπορεί να υπάρχουν.
- Διάφορα στοιχεία που έχουν κατασκευαστεί, όπως τάφροι.
- Τα γειτονικά οικοπέδα.

Αφού ληφθούν αυτά υπόψη υπάρχουν διάφορα είδη μέτρων ασφαλείας που μπορούν να επιστρατευτούν:

- Τοποθέτηση πεδίου κίνησης οχημάτων, συμπεριλαμβανομένου και του χώρου παρκαρίσματος, απομακρυσμένα από την κατασκευή και έπειτα μετακίνηση ως την κυρίως κατασκευή είτε πεζοί είτε με τη χρήση υπηρεσιακών οχημάτων.

- Κατασκευή σημείων ελέγχου οχημάτων, προκειμένου να περιοριστεί ο κίνδυνος μεταφοράς εκρηκτικών μηχανισμών.
- Επέκταση χώρου διακίνησης των οχημάτων, ώστε να περιοριστεί ο έλεγχος οχημάτων σε αυτά που μεταβαίνουν σε κρίσιμες τοποθεσίες.
- Κατασκευή στηθαίων ασφαλείας, κιγκλιδωμάτων ασφαλείας ή ανάλογης μορφής μέτρων ασφαλείας κατά των οχημάτων (Vehicle security barrier - VSB) που άλλοτε επιτρέπουν και άλλοτε δεν επιτρέπουν την δίοδο των πεζών. Αυτά μπορεί να είναι είτε παθητικά είτε ενεργητικά. Τα παθητικά συνήθως είναι κολωνάκια, τάφροι, αναχώματα, καλώδια, δέντρα, παρτέρια, χαμηλά κτίρια, κιγκλιδώματα, στηθαία ενώ τα ενεργητικά συνήθως είναι ανεβοκατεβαζόμενα κολωνάκια και ανοιγοκλεινόμενες πύλες, μπάρες και φραγμοί οδοστρωμάτων. Οι στρώσεις των μέτρων ασφαλείας μπορεί να είναι είτε μονές είτε πολλαπλές ανάλογα με την ασφάλεια που επιδιώκεται.
- Μέτρα μείωσης της ταχύτητας των οχημάτων για την άμεση αντιμετώπιση εκείνων που κινούνται ύποπτα. Αυτό επιτυγχάνεται με σαμαράκια, με κλίσεις στην οδοποιία και οριζοντιογραφικά μειώνοντας την ορατότητα των οδηγών σε στροφές. Αυτά τα μέτρα συνδυάζονται με την κατασκευή προστατευτικών στοιχείων, όπου η πλέον μειωμένη ταχύτητα χρησιμοποιείται για το φορτίο κρούσης και την επικείμενη διαστασιολόγησή τους. Αυτό σημαίνει ότι βάσει της κινητικής ενέργειας των οχημάτων, δηλαδή του $1/2 \cdot m \cdot u^2$, σχεδιάζονται και τα μέτρα ασφαλείας.

7 ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

7.1 Κανονισμοί και εγχειρίδια

Οι πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενοι κανονισμοί για τον σχεδιασμό έναντι εκρήξεων είναι:

Πίνακας 7-1. Κανονισμοί εκρήξεων και περιγραφή τους.

American Petroleum Institute

API RP 2FB Design of offshore facilities against fire and blast Loading
API RP 752 Management of hazards associated with location of process plant buildings
API RP 753 Management of hazards associated with location of process plant portable buildings
Γενικά στοιχεία για εκρήξεις. Ειδική περιγραφή για πετρελαϊκές εγκαταστάσεις.

American Society of Civil Engineers

2010	ASCE: Design of blast-resistant buildings in petrochemical facilities
Γενικές οδηγίες για τον υπολογισμό των φορτίων από τις εκρήξεις, την απόκριση των κατασκευών, των μεθόδων ανάλυσης, την αρχιτεκτονική σκοπιά, τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες και την επισκευή. Στοιχεία δομικού χάλυβα, οπλισμένου σκυροδέματος (προκατασκευασμένου και μη) και οπλισμένης τοιχοποιίας. Ειδική περιγραφή για βιομηχανικές μονάδες.	
2011	ASCE SEI 59-11: Blast protection of buildings
Γενικές οδηγίες για τις εκρήξεις.	

Air Force Engineering and Services Center

1989	Protective Construction Design Manual
------	---------------------------------------

Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers

CCPS Guidelines for evaluating process plant buildings for external explosions and fires and toxic releases
 CCPS Guidelines for evaluating the characteristics of vapor cloud explosions, flash fires, and bleves

Περιγραφή των εκρήξεων.

Centre of the Protection of National Infrastructure

Protecting against terrorism
 Personnel security: managing the risk
 Pre-employment screening
 Expecting the unexpected
 Secure in the knowledge

Οδηγίες για προστατευτικά μέτρα έναντι εκρήξεων.

Federal Emergency Management Agency

2003	FEMA 427: Primer for design of commercial buildings to mitigate terrorist attacks
Οδηγίες για τη μείωση της τρωτότητας έναντι τρομοκρατικών επιθέσεων. Ειδική περιγραφή για εμπορικά κτίρια.	
2003	FEMA 428: Primer to design safe school projects in case of terrorist attacks
Οδηγίες για τη μείωση της τρωτότητας έναντι τρομοκρατικών επιθέσεων. Ειδική περιγραφή για σχολικά κτίρια.	
2003	FEMA 429: Insurance finance and regulation primer for terrorism risk management in buildings
Οδηγίες για την χρηματοοικονομική ανάλυση των κτιρίων έναντι τρομοκρατικών επιθέσεων.	
2007	FEMA 430: Site and urban design for security guidance against potential terrorist attacks
Οδηγίες για τον σχεδιασμό ενεργητικής και παθητικής προστασίας του χώρου έναντι τρομοκρατικών επιθέσεων.	
2005	FEMA 452: Risk assessment a how to guide to mitigate potential terrorist attacks against buildings
Οδηγίες για την εκτίμηση της τρωτότητας έναντι τρομοκρατικών επιθέσεων.	
2006	FEMA 453: Safe rooms and shelters protecting people against terrorist attacks
Οδηγίες για τον σχεδιασμό καταφυγίων.	
2009	FEMA 455: Handbook for rapid visual screening of buildings to evaluate terrorist attacks
Οδηγίες για την ταξινόμηση των κτιρίων για το πόσο ευάλωτα είναι σε τρομοκρατική επίθεση.	
2008	FEMA 459: Incremental protection for existing commercial buildings from terrorist attack
Οδηγίες για τη μείωση της τρωτότητας έναντι τρομοκρατικών επιθέσεων. Ειδική περιγραφή για υπάρχοντα εμπορικά κτίρια.	

Fire and Blast Information Group

Technical note 1: Fire resistant design of offshore topside structures	
Technical note 3: Use of ultimate strength techniques for fire resistant design of offshore structures	
Technical note 4: Explosion resistant design of offshore structures	
Technical note 8: Protection of piping systems subject to fires and explosions	
Περιγραφή του σχεδιασμού έναντι έκρηξης θαλάσσιων εγκαταστάσεων.	
1994	Technical note 2: Explosion mitigation systems
Οδηγίες για τη μείωση της τρωτότητας έναντι εκρήξεων	
Technical note 5: Design guide for stainless steel blast walls	
Technical note 6: Design guide for steel at elevated temperatures and high strain rates	
Technical note 7: Simplified methods for analysis of response to dynamic loading	
Technical note 11: Fire loading and structural response	
Οδηγίες για τον υπολογισμό των φορτίων από τις εκρήξεις και της απόκρισης των κατασκευών. Στοιχεία δομικού χάλυβα και ειδικών δομικών στοιχείων για εκρήξεις.	
2006	Technical note 9: Human factors guide
Περιγραφή του ανθρώπινου παράγοντα στις εκρήξεις.	
2013	Technical note 12: Vapour cloud development in over-filling incidents
Στοιχεία εξέλιξης εκρήξεων νέφους αερίων. Ειδική περιγραφή υπερχειλίσις δεξαμενών.	

Interagency Security Committee

2010	The design-basis threat The risk management process for federal facilities
Οδηγίες για τη μείωση της τρωτότητας έναντι τρομοκρατικών επιθέσεων.	

National Fire Protection Association

2002	NFPA Guide for Venting of Deflagrations
Οδηγίες για εξαερισμό έναντι εκρήξεων κατάκαυσης.	

National Research Council

2003	Design criteria for new federal office buildings and major modernization projects
Γενική περιγραφή για τον υπολογισμό των φορτίων από τις εκρήξεις, του θρυμματισμού, την απόκριση των κατασκευών και των μεθόδων ανάλυσης.	

Process Industry Practices

PIP ARS08390 Blast resistant doors and frames	
PIP STC01018 Blast resistant building design criteria	
Οδηγίες σχεδιασμού για εκρήξεις.	

The Director-General of Labour

1992	CPR 16E TNO Green book method for the determination of possible damage to people and objects resulting from releases of hazardous materials
Περιγραφή εκρήξεων και συνεπειών τους σε κατασκευές και ανθρώπους.	

The Institute of Structural Engineers

1995	ISE The structural engineer's response to explosive damage
Γενικές οδηγίες για τις εκρήξεις.	

The Steel Construction Institute

1999	SCI Publication 244: Protection of Buildings against Explosions
Γενικές οδηγίες για τις εκρήξεις.	

United States of America Department of Defense

2009	DoD 6055.09-STD: DoD Ammunition and Explosives Safety Standards
Κανονισμός προστασίας εκρηκτικών υλών και πυρομαχικών.	
2002	UFC 3-340-01: Design and analysis of hardened structures to conventional weapons effects (πρώην Army TM 5-855-1/Air Force AFPAM 32-1147(I)/Navy NAVFAC P-1080/DSWA DAHSCWEMAN-97)
Οδηγίες για τον υπολογισμό των φορτίων από τις εκρήξεις, του θρυμματισμού, την απόκριση των κατασκευών, των μεθόδων ανάλυσης και σχεδιασμού.	
2008	UFC 3-340-02: Structures to resist the effects of accidental explosives (πρώην Army TM 5-1300/Navy NAVFAC P-397/Air Force AFR 88-22)
Οδηγίες για τον υπολογισμό των φορτίων από τις εκρήξεις, του θρυμματισμού, την απόκριση των κατασκευών και των μεθόδων ανάλυσης. Στοιχεία δομικού χάλυβα, οπλισμένου σκυροδέματος (κοινού, προκατασκευασμένου και προεντεταμένου), τοιχοποιίας (άοπλης και οπλισμένης), υαλοπινάκων και ειδικών δομικών στοιχείων για εκρήξεις.	
2013	UFC 4-010-01: DoD Minimum Antiterrorism Standards for Buildings
Οδηγίες και ελάχιστα κριτήρια για τη μείωση της τρωτότητας έναντι τρομοκρατικών επιθέσεων σε νέα κτίρια.	
2007	UFC 4-010-02: DoD Minimum Antiterrorism Standoff Distances for Buildings
Κριτήρια ελαχίστων αποστάσεων από στόχο.	
2005	UFC 4-020-02: Security Engineering: Concept Design (πρώην TM 5-853-2)
Οδηγίες για τη μείωση της τρωτότητας έναντι τρομοκρατικών επιθέσεων. Ειδική περιγραφή για αρχικό σχεδιασμό.	
2005	UFC 4-020-03: Security Engineering: Final Design (πρώην TM 5-853-3)
Οδηγίες για τη μείωση της τρωτότητας έναντι τρομοκρατικών επιθέσεων. Ειδική περιγραφή για οριστικό σχεδιασμό.	
2005	UFC 4-020-04: Security Engineering: Electronic Security Systems
Οδηγίες για τα ηλεκτρονικά συστήματα ασφάλειας.	

2005	UFC 4-022-01: Security Engineering: Entry Control Facilities / Access Control Points
Οδηγίες για τα συστήματα ασφάλειας των εισόδων.	
2013	UFC 4-023-03: Design of Buildings to Resist Progressive Collapse
Οδηγίες για τον υπολογισμό της απόκριση των κατασκευών και των μεθόδων ανάλυσης. Στοιχεία δομικού χάλυβα, οπλισμένου σκυροδέματος, τοιχοποιίας και ξύλου. Ειδική περιγραφή για σχεδιασμό προοδευτικής κατάρρευσης.	

United States Army Corps of Engineers

UCASE: The Component Explosive Damage Assessment Workbook (CEDAW) PDC TR-05-02: Component Damage Assessment Workbook Final Report PDC TR-08-06: User's Guide for Component Explosive Damage Assessment Workbook (CEDAW v2) PDC TR-08-07: Methodology Manual for Component Explosive Damage Assessment Workbook (CEDAW v2)	
Οδηγίες για τον υπολογισμό των φορτίων από τις εκρήξεις και την απόκριση των κατασκευών.	
2006	PDC TPP-06-01: Structural Design of Type V Construction For Antiterrorism Measures
Γενικά στοιχεία δομικού χάλυβα και ξύλου.	
PDC TR-05-01: SBEDS Methodology Report PDC TR-06-01: Methodology manual for the single-degree-of-freedom blast effects design spreadsheets PDC TR-08-03: Example Problems for SBEDS PDC TR-12-01: SBEDS_W Methodology Manual (Dist C) PDC TR-12-02: SBEDS_W Help PDC TR-12-03: SBEDS_W Example Problems (Dist C) PDC TR-12-07: SBEDS v5 Example Problems	
Οδηγίες για τον υπολογισμό των φορτίων από τις εκρήξεις και την απόκριση των κατασκευών. Στοιχεία δομικού χάλυβα, οπλισμένου σκυροδέματος, τοιχοποιίας και ξύλου. Ειδική περιγραφή για μονοβάθμιο ταλαντωτή και λογιστικό φύλλο SPEDS.	
2008	PDC TR-06-08: Anti-Terrorism Response Limits
Κατευθύνσεις για την απόκριση των κατασκευών. Ειδική περιγραφή των ορίων απόκρισης.	
PDC TR-08-01: Parameter Study for Single-Degree-of-Freedom Response of Structural Components to Blast Loads PDC TR-08-02: Comparison of Calculated Single-Degree-of-Freedom Response to Blast Test Data	
Οδηγίες για τον υπολογισμό της απόκριση των κατασκευών και των μεθόδων ανάλυσης. Ειδική περιγραφή για μονοβάθμιο ταλαντωτή	
2010	PDC TR-10-01: Conventional Construction Standoff Distances of the Low and Very Low Levels of Protection IAW UFC 4-010-01 PDC TR-15-01: Minimum Standoff Distances for Non-Load-Bearing Steel Stud In-Fill Walls
Κατευθύνσεις για τις αποστάσεις από στόχο.	
2012	PDC TR-10-02: Blast Resistant Design Methodology for Window Systems Designed Statically and Dynamically
Στοιχεία υαλοπινάκων και ειδικών δομικών στοιχείων για εκρήξεις.	

United States Department of Energy

1992	DOE/TIC 11268 A Manual for the Prediction of Blast and Fragment Loading on Structures
Οδηγίες για τον υπολογισμό των φορτίων από τις εκρήξεις, του θρυμματισμού, την απόκριση των κατασκευών και των μεθόδων ανάλυσης.	

United States Department of the Air Force

2006	AFH 10-2401: Vehicle Bomb Mitigation Guide
Οδηγίες για τον υπολογισμό των φορτίων από τις εκρήξεις και των σεναρίων έκρηξης. Ειδική περιγραφή για αυτοσχέδιους μηχανισμούς με χρήση οχήματος.	

United States General Services Administration

2003	GSA Standard Test Method for Glazing and Window Systems Subject to Dynamic Overpressure Loadings
Στοιχεία υαλοπινάκων.	
2013	GSA Alternate path analysis and design guidelines for progressive collapse resistance
Οδηγίες για την απόκριση των κατασκευών και των μεθόδων ανάλυσης.	

United States Department of State

1995	Structural Engineering Guidelines for New Embassy Office Buildings
Γενικά στοιχεία για εκρήξεις. Ειδική περιγραφή για πρεσβείες.	

7.2 Κατηγορίες προστασίας

Οι κανονισμοί καθορίζουν τις διάφορες κατηγορίες προστασίας.

Πίνακας 7-2. Κατηγορίες προστασίας σύμφωνα με τα UFC 3-340-02.

Protection Category 1	Protect personnel against the uncontrolled release of hazardous materials, including toxic chemicals, active radiological and/or biological materials; attenuate blast pressures and structural motion to a level consistent with personnel tolerances; and shield personnel from primary and secondary fragments and falling portions of the structure and/or equipment.
Protection Category 2	Protect equipment, supplies and stored explosives from fragment impact, blast pressures and structural response.
Protection Category 3	Prevent communication of detonation by fragments, high-blast pressures, and structural response.
Protection Category 4	Prevent mass detonation of explosives as a result of subsequent detonations produced by communication of detonation between two adjoining areas and/or structures. This category is similar to Category 3 except that a controlled communication of detonation is permitted between defined areas.

Πίνακας 7-3. Κατηγορίες προστασίας νέων και υφιστάμενων κτιρίων σύμφωνα με τα UFC 4-010-01.

Level of Protection	Potential Building Damage/Performance	Potential Door and Glazing Hazards	Potential Injury
Below Antiterrorism standards	Severe damage. Progressive collapse likely. Space in and around damaged area will be unusable.	Windows will fail catastrophically and result in lethal hazards (High hazard rating). Doors will be thrown into rooms. (Category V).	Majority of personnel in collapse region suffer fatalities. Potential fatalities in areas outside of collapsed area likely.
Very Low	Heavy damage - Onset of structural collapse, but progressive collapse is unlikely. Space in and around damaged area will be unusable.	Glazing will fracture, come out of the frame, and is likely to be propelled into the building, with potential to cause serious injuries (Low hazard rating). Doors will become dislodged from the structure but will not create a flying debris hazard (Category IV).	Majority of personnel in damaged area suffer serious injuries with a potential for fatalities. Personnel in areas outside damaged area will experience minor to moderate injuries.
Low	Moderate damage – Building damage will not be economically repairable. Progressive collapse will not occur. Space in and around damaged area will be unusable.	Glazing will fracture, potentially come out of the frame, but at reduced velocity, does not present a significant injury hazard. (Very low hazard rating). Doors will experience non-catastrophic failure, but will have permanent deformation and may be inoperable (Category III).	Majority of personnel in damaged area suffer minor to moderate injuries with the potential for a few serious injuries, but fatalities are unlikely. Personnel in areas outside damaged areas will potentially experience minor to moderate injuries.
Medium	Minor damage – Building damage will be economically repairable. Space in and around damaged area can be used and will be fully functional after cleanup and repairs.	Glazing will fracture, remain in the frame and results in a minimal hazard consisting of glass dust and slivers. (Minimal hazard and No Hazard ratings). Doors will be openable but will have permanent deformation. (Category II)	Personnel in damaged area potentially suffer minor to moderate injuries, but fatalities are unlikely. Personnel in areas outside damaged areas will potentially experience superficial injuries.
High	Minimal damage. No permanent deformations. The facility will be immediately operable.	Innermost surface of glazing will not break (No Break hazard rating). Doors will be substantially unchanged and fully operable (Category I).	Only superficial injuries are likely.

7.3 Συνδυασμοί φόρτισης

Η έκφραση ως είδος φόρτισης πρόκειται για τυχηματικό φορτίο με περιορισμένη πιθανότητα εμφάνισης. Έτσι ως τέτοιο πρέπει να θεωρείται και στους συνδυασμούς φόρτισης από τους οποίους προκύπτει τι συνδυασμούς συντελεστές θα έχει για παράδειγμα ο άνεμος ή το χιόνι.

Όσον αφορά στον Ευρωκώδικα, αυτός ορίζει τα τυχηματικά φορτία με τους εξής συντελεστές:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} \text{ "+" } P \text{ "+" } A_d \text{ "+" } \psi_{1,1} \text{ (ή } \psi_{2,1}) \cdot Q_{k,1} \text{ "+" } \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (7-1)$$

$G_{k,j}$: Χαρακτηριστική τιμή μονίμων δράσεων.

+: Επαλληλία δράσεων.

P: Χαρακτηριστική τιμή προέντασης.

A_d : Τιμή σχεδιασμού της τυχηματικής δράσης.

$Q_{k,1}$: Χαρακτηριστική τιμή επικρατέστερης μεταβλητής δράσης.

$Q_{k,i}$: Χαρακτηριστική τιμή των υπολοίπων μεταβλητών δράσεων που συνυπάρχουν.

$\psi_{1,1}$, $\psi_{2,1}$, $\psi_{2,i}$: Συντελεστές συνδυασμού των μεταβλητών δράσεων.

Πίνακας 7-4. Συντελεστές συνδυασμού σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα.

Προτεινόμενες τιμές:

	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Επιβαλλόμενα φορτία:			
Κατηγορία A: Κατοικίες, συνήθη κτίρια κατοικιών	0.7	0.5	0.3
Κατηγορία B: Χώροι γραφείων	0.7	0.5	0.3
Κατηγορία C: Χώροι συνάθροισης	0.7	0.7	0.6
Κατηγορία D: Χώροι καταστημάτων	0.7	0.7	0.6
Κατηγορία E: Χώροι αποθήκευσης	1.0	0.9	0.8
Κατηγορία F: Χώροι κυκλοφορίας οχημάτων Βάρος οχημάτων $\leq 30\text{kN}$	0.7	0.7	0.6
Κατηγορία G: Χώροι κυκλοφορίας οχημάτων $30\text{kN} <$ Βάρος οχημάτων $\leq 160\text{kN}$	0.7	0.5	0.3
Κατηγορία H: Στέγες	0	0	0
Φορτία χιονιού επάνω σε κτίρια:			
Φινλανδία, Ισλανδία, Νορβηγία, Σουηδία	0.7	0.5	0.2
Υπόλοιπα Κράτη Μέλη του CEN για τοποθεσίες που βρίσκονται σε υψόμετρο $H > 1000\text{m}$	0.7	0.5	0.2
Υπόλοιπα Κράτη Μέλη του CEN για τοποθεσίες που βρίσκονται σε υψόμετρο $H \leq 1000\text{m}$	0.5	0.2	0
Φορτία ανέμου	0.6	0.2	0
Θερμοκρασία (εκτός πυρκαϊάς) σε κτίρια	0.6	0.5	0

7.4 Όρια παραμορφώσεων

Τα όρια παραμορφώσεων έχουν προκύψει μέσα από πειραματικές διαδικασίες και σε επίπεδο σχεδιαστικό ορίζονται από τους εκάστοτε κανονισμούς. Εν προκειμένω, όρια παραμορφώσεων για εκρήξεις έχουν προκύψει κυρίως μέσα από τους εξής κανονισμούς και εγχειρίδια:

Πίνακας 7-5. Συντελεστές συνδυασμού σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα.

UFC 3-340-02: Structures to resist the effects of accidental explosives
ASCE SEI 59-11: Blast protection of buildings
PDC TR-06-08: Anti-Terrorism Response Limits
ASCE: Design of blast-resistant buildings in petrochemical facilities

Τα όρια παραμορφώσεων που δόθηκαν στα αντίστοιχα κεφάλαια του παρόντος κειμένου προκύπτουν μέσα από τον κανονισμό UFC 3-340-02.

7.5 Μεθοδολογίες σχεδιασμού

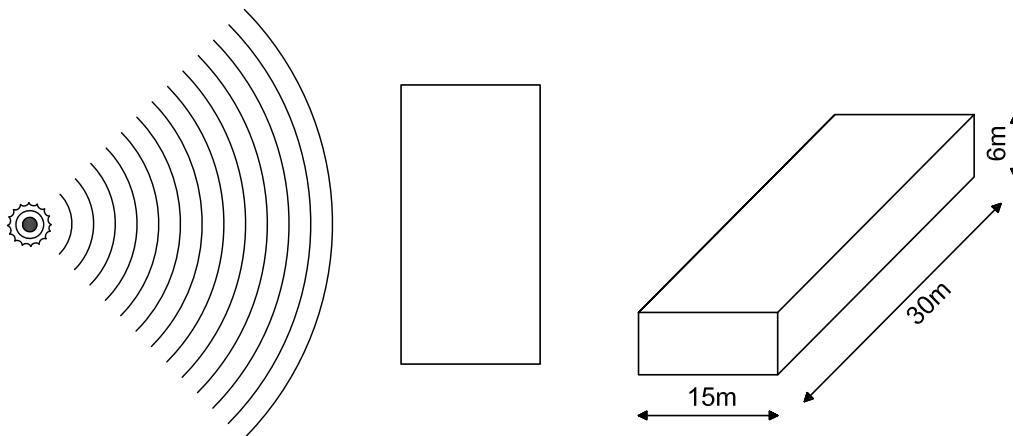
Κάθε κανονισμός ακολουθεί τις δικές του μεθοδολογίες σχεδιασμού κάθε δομικού στοιχείου. Έτσι, διαφοροποιούνται τα τυπολόγια και οι διαδικασίες, ωστόσο η συνολική φιλοσοφία ουσιαστικά παραμένει ίδια, όπως έχει οριστεί στο κεφάλαιο του σχεδιασμού.

8 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

8.1 Υπολογισμός φορτίων σε κτίριο

Δεδομένα:

- Ύψος: 6m.
- Πλάτος: 30m.
- Βάθος: 15m.
- Έκρηξη 5000kg TNT στα 60m.



Σχήμα 8-1. Απεικόνιση του κτιρίου του παραδείγματος σε κάτοψη και σε τρισδιάστατη όψη.

Επίλυση:

Από [Σχήμα 3-8] ημισφαιρίου προκύπτει:

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} = \frac{40}{3000^{1/3}} = 3.51$$

$$i_s = 1.438 \text{ Pa}\cdot\text{ms}$$

$$i_r = 3.20 \text{ MPa}\cdot\text{ms}$$

$$U_s=0.7\text{m/ms}$$

$$t_d=54.31\text{ms}$$

$$t_a=79.46\text{ms}$$

$$p_r=0.221\text{MPa}$$

$$p_{s0}=0.084\text{MPa}$$

$$L_w=15.35\text{m}$$

Από το διάγραμμα 2-3 των UFC 3-340-02 προκύπτει:

$$q_0=0.017\text{MPa}$$

Από [Σχήμα 3-14]:

$$C_r=400\text{m/s}$$

Επιπλέον:

$$t_c = \frac{4 \cdot S}{(1 + \frac{S}{G}) \cdot C_r} = \frac{4 \cdot 6}{(1 + \frac{6}{15}) \cdot 400} = 0.043\text{s} = 43\text{ms}$$

Θεωρείται:

$$C_D=1.00$$

Άρα:

$$p_{\text{stag}} = p_{s0} + C_D \cdot q_0 = 0.084 + 1.00 \cdot 0.017 = 0.101\text{MPa}$$

Επιπλέον για πλευρικά, άνω και πίσω από [Πίνακας 3-2] θεωρείται:

$$C_D = -0.4$$

Έστω πλευρικός τοίχος μήκους 1m.

Από τα διαγράμματα 2-196, 2-197, 2-198 των UFC 3-340-02 υπολογίζεται:

$$L_w/L = \frac{15.35}{15.00} = 15.35 \text{ πλευρικά} \quad \left| \quad \frac{15.35}{15.00} = 1.02 \text{ άνω} \quad \left| \quad L_w/L = \frac{15.35}{6.00} = 2.56 \text{ πίσω}$$

$$C_E = 0.90 \text{ πλευρικά} \quad | \quad C_E = 0.46 \text{ άνω} \quad | \quad C_E = 0.75 \text{ πίσω}$$

$$t_r = 0\text{ms} \text{ πλευρικά} \quad | \quad t_r = 15\text{ms} \text{ άνω} \quad | \quad t_r = 12\text{ms} \text{ πίσω}$$

$$t_d = 45\text{ms} \text{ πλευρικά} \quad | \quad t_d = 50\text{ms} \text{ άνω} \quad | \quad t_d = 46\text{ms} \text{ πίσω}$$

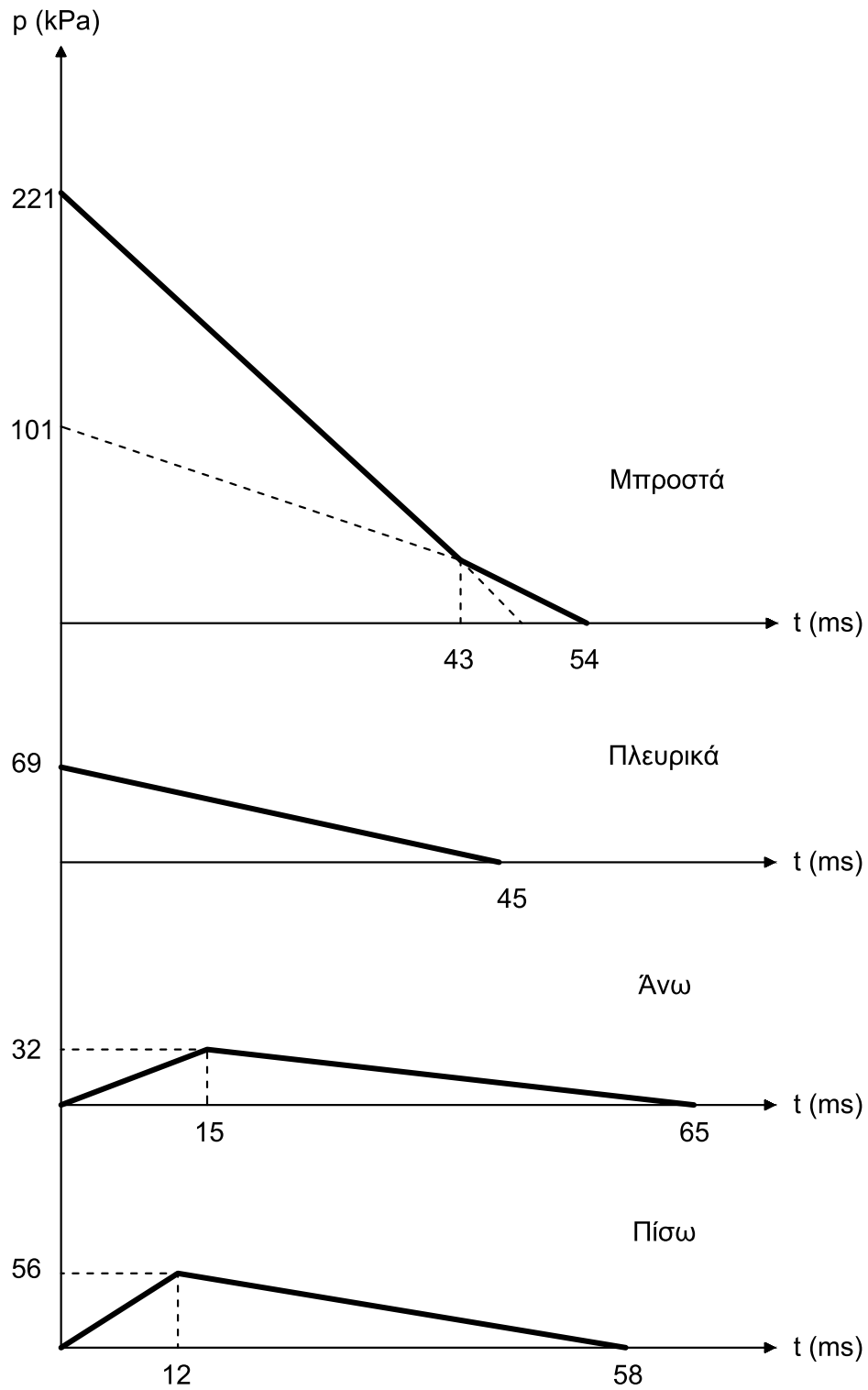
Οπότε:

$$p_a = C_E \cdot p_{s0} + C_D \cdot q_0 = 0.90 \cdot 84 - 0.4 \cdot 17 = 69\text{kPa} \text{ πλευρικά}$$

$$p_a = C_E \cdot p_{s0} + C_D \cdot q_0 = 0.46 \cdot 84 - 0.4 \cdot 17 = 32\text{kPa} \text{ άνω}$$

$$p_a = C_E \cdot p_{s0} + C_D \cdot q_0 = 0.75 \cdot 84 - 0.4 \cdot 17 = 56\text{kPa} \text{ πίσω}$$

Άρα:



Σχήμα 8-2. Αποτελέσματα φόρτισης μπροστά, άνω, πλευρικά και πίσω.

8.2 Σχεδιασμός χαλύβδινου μέλους

Δεδομένα:

- Αμφιέριστη δοκός με κατανεμημένη μάζα.
- Μήκος 5m.
- Πλάτος επιρροής 1.5m σε χαλυβδόφυλλο πάχους 3mm.
- Τάση διαρροής 355MPa.
- Τριγωνικό φορτίο ύψους 40kPa και διάρκειας 30ms.
- Κατηγορία προστασίας: 1.
- SIF=1.10 και DIF=1.20.

Επίλυση:

Απαιτούμενη αντίσταση:

$$R_m = 1.0 \cdot p_{\max} \cdot A = 1 \cdot 40 \cdot 5 \cdot 1.5 = 300.00 \text{ kN}$$

Από [Πίνακας 2-1]:

$$M_{Rd} = \frac{R_m \cdot L}{8} = \frac{300 \cdot 5}{8} = 187.50 \text{ kNm}$$

Αύξηση τάσης διαρροής:

$$f_{yd, \text{dyn}} = 1.10 \cdot 1.20 \cdot 355 = 468.50 \text{ MPa}$$

Άρα, απαιτείται διατομή με:

$$W_{ply} = \frac{M_{Rd}}{f_{yd, \text{dyn}}} = \frac{187.50 \cdot 10^6}{468.50} = 0.40 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

Οπότε, τοποθετείται διατομή HEB180 με τα εξής στοιχεία:

- $W_{ply} = 0.4814 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$
- $I_{yy} = 3831 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$
- $A = 6525 \text{ mm}^2$

Η ροπή αντοχής είναι:

$$M_{Rd} = W_{pl} \cdot f_{yd, \text{dyn}} = 0.4814 \cdot 10^6 \cdot 468.50 = 233.31 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 225.54 \text{ kNm}$$

Ελέγχεται η απόκριση της δοκού, από [Πίνακας 5-1]:

$$K_{LM} = \frac{0.78 + 0.66}{2} = 0.72$$

Η μάζα είναι:

$$M = (1.5 \cdot 0.003 + 0.006525) \cdot 7850 \cdot 5 = 432.73 \text{ kg}$$

Η ισοδύναμη δυσκαμψία είναι:

$$k_E = \frac{384 \cdot E \cdot I_{yy}}{5 \cdot L^3} = \frac{384 \cdot 210000 \cdot 3831 \cdot 10^4}{5 \cdot 5000^3} = 4942.91 \text{ kN/m}$$

Συνεπώς, η ιδιοπερίοδος είναι:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{K_{LM} \cdot M}{k_E}} = 2\pi \sqrt{\frac{0.72 \cdot 432.73}{4942.91 \cdot 10^3}} = 0.04988s = 49.88ms$$

Οπότε:

$$R_m = \frac{8 \cdot M_{Rd}}{L} = \frac{8 \cdot 225.54}{5} = 360.86kN \text{ ή } \frac{360.86}{5} = 72.17kN/m \text{ ανά μέτρο μήκους}$$

Επιπλέον, η δύναμη ανά μέτρο μήκους είναι:

$$P = 40 \cdot 1.5 = 60kN/m$$

Οπότε, για χρήση στο [Σχήμα 5-8] θα ληφθούν:

$$\frac{R_m}{P} = \frac{72.17}{60} = 1.20 \text{ και } t_d/T = 30.0/49.88 = 0.601$$

Εκ του [Σχήμα 5-8] προκύπτει:

$$\frac{X_m}{X_E} = 0.9 \leq 10, \text{ ικανοποιητικό}$$

Για τον έλεγχο των παραμορφώσεων:

$$X_m = \mu \cdot X_E = \mu \cdot \frac{R_m}{k_e} = 0.9 \cdot \frac{360.86}{4942.91} = 0.0657m = 65.7mm$$

Άρα:

$$\tan\theta = \frac{X_m}{L/2} = \frac{65.7}{5000/2} = 0.0263 \rightarrow \theta = 1.51^\circ \leq 2^\circ, \text{ ικανοποιητικό}$$

Επίσης, από το [Σχήμα 5-9] προκύπτει:

$$\frac{t_m}{t_d} = 0.80 < 3 \text{ δυναμική απόκριση, άρα είναι σωστή η μέθοδος σχεδιασμού}$$

Τέλος, πρέπει να γίνει έλεγχος τέμνουσας:

$$V_{Ed} = \frac{R_m}{2} = \frac{360.86}{2} = 180.3kN$$

Με:

$$A_v = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f = 6525 - 2 \cdot 180 \cdot 14 + (8.5 + 2 \cdot 15) \cdot 14 = 2024mm^2$$

Άρα:

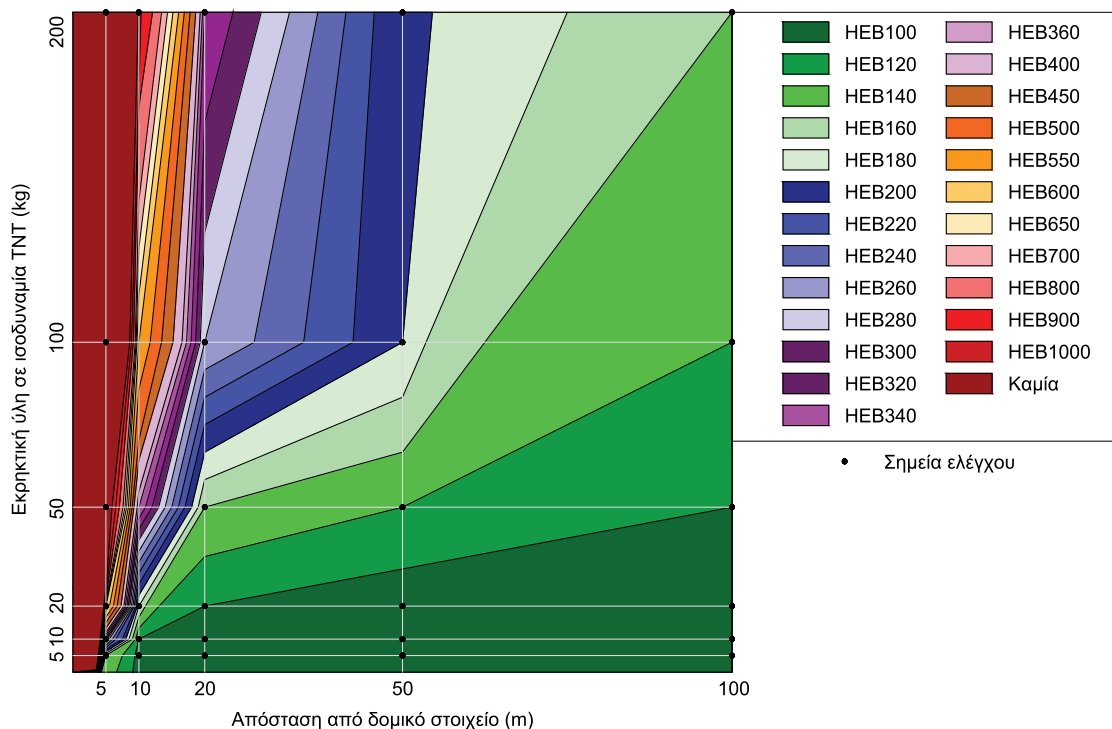
$$V_{Rd} = 0.55 \cdot f_{yd,dyn} \cdot A_v = 0.55 \cdot 468.50 \cdot 2024 = 521534N = 521.53kN, \text{ ικανοποιητικό}$$

Έπειτα πρέπει να εκτελούνται οι υπόλοιποι έλεγχοι που επιδιώκει να εκτελέσει ο σχεδιαστής (όπως ο έλεγχος λυγισμού). Σε περίπτωση που δεν επαρκεί η διατομή, τότε αυτή μεταβάλλεται με μέριμνα όμως ώστε να επανελεγχθούν τα ανωτέρα όρια και εάν είναι σωστή η μέθοδος σχεδιασμού.

Ακολούθως, θα εκτελεστεί παραμετρική ανάλυση για διαφορετικά σενάρια φόρτισης, έτσι ώστε να υπάρξει μια παραστατική εικόνα του τι μεγέθους διατομές απαιτούνται στην εκάστοτε περίπτωση. Τα

αποτελέσματα αφορούν τον έλεγχο κάμψης δίνοντας κατάλληλη μέριμνα για το είδος της απόκρισης που προκύπτει και ακολουθώντας διαφορετική μέθοδο διαστασιολόγησης κάθε φορά.

Έτσι για διάφορες αποστάσεις από το δομικό στοιχείο και για διαφορετικά επίπεδα εκρηκτικής ύλης προκύπτει η ανάλογη απαιτούμενη διατομή με όριο την παραμόρφωση των 2°.



Σχήμα 8-3. Παραμετρική ανάλυση απαιτούμενης αντοχής ανάλογα με το ύψος της εκρηκτικής ύλης και την απόσταση από το δομικό στοιχείο.

8.3 Σχεδιασμός τοίχου οπλισμένου σκυροδέματος

Δεδομένα:

- Πρόβολος με κατανεμημένη μάζα.
- Μήκος: 3m.
- Σκυρόδεμα κατηγορίας: C30/37.
- Κατηγορία προστασίας: 2.
- $DIF = 1.20$ για χάλυβα οπλισμού.
- Τριγωνικό φορτίο ύψους 8000kPa, διάρκειας 2.78ms και i_r 4.63MPa·ms.

Επίλυση:

Για κατηγορία προστασίας 2 θεωρείται τύπος διατομής II σύμφωνα με τα UFC 3-340-02:

$$M_{Rd} = \rho_l \cdot f_{yd,dyn} \cdot z^2$$

Αύξηση τάσης διαρροής:

$$f_{yd,dyn} = DIF \cdot f_{yd} = 1.20 \cdot 500 = 600 \text{ MPa}$$

Επιδιώκεται:

$\rho_l=0.5\%$ σε συμμετρικό οπλισμό

Από [Πίνακας 5-1]:

$$R_M = \frac{2 \cdot M_{Rd}}{L} = \frac{2 \cdot \rho_l \cdot f_{yd,dyn} \cdot z^2}{L} = \frac{2 \cdot 0.005 \cdot 600 \cdot z^2 \cdot 1000}{3000} = 2 \cdot z^2 \text{ N}$$

Για κατηγορία προστασίας 2:

$$X_m = L \cdot \tan 4^\circ = 3 \cdot \tan 4^\circ = 210 \text{ mm}$$

Επιπλέον από [Σχήμα 6-3]:

$$E_c = 33 \text{ GPa}$$

$$E_s = 200 \text{ GPa}$$

$$\alpha_e = E_s / E_c = 200 / 33 = 6.06$$

$$F = 0.023$$

Απλοποιητικά:

$$I = 0.023 \cdot b \cdot z^3$$

Άρα, από [Πίνακας 5-1]:

$$k_E = \frac{8 \cdot E \cdot I}{L^3} = \frac{8 \cdot 33000 \cdot 0.023 \cdot 1000 \cdot z^3}{3000^3} = 2.249 \cdot 10^{-4} \cdot z^3 \text{ N/mm}$$

Συνεπώς:

$$X_E = \frac{R_m}{k_E} = \frac{2 \cdot z^2}{2.249 \cdot 10^{-4} \cdot z^3} = \frac{8892}{z} \text{ mm}$$

Από τον [Πίνακας 5-1] προκύπτει:

$$K_{LM} = 0.66$$

Η μάζα υπολογίζεται ως:

$$M = 2500 \cdot z \cdot L = 2500 \cdot z \cdot 3000 \cdot 1000 \cdot 10^{-9} = 7.50 \cdot z \text{ kg}$$

Επίλυση της βασικής εξίσωσης ώθησης:

$$\begin{aligned} \frac{i^2 \cdot A^2}{2 \cdot K_{LM} \cdot M} &= \frac{R_M \cdot X_E}{2} + R_M \cdot (X_M - X_E) \rightarrow \\ \frac{(4.63 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (3000 \cdot 1000)^2 \cdot 1000}{2 \cdot 0.66 \cdot 7.50 \cdot z} &= 2 \cdot z^2 \cdot \left(210 - \frac{8892}{2z}\right) \rightarrow \\ \frac{19.49 \cdot 10^9}{z} &= -8892 \cdot z + 420 \cdot z^2 \rightarrow z = 367 \text{ mm} \end{aligned}$$

Για την τοποθέτηση διαμήκους οπλισμού $\Phi 20$ και εγκάρσιου οπλισμού $\Phi 10$ με 40mm επικάλυψη, απαιτείται διατομή:

$$h = 40 + 5 + 10 + 367 + 10 + 5 + 40 = 477 \approx 500 \text{ mm με } z = 390 \text{ mm}$$

Άρα:

$$R_M = 2 \cdot z^2 = 2 \cdot 390^2 = 304200 \text{ N} = 304.20 \text{ kN}$$

$$\text{ή } \frac{304.20}{3} = 101.40 \text{ kN/m ανά μέτρο μήκους}$$

$$M = 7.50 \cdot z = 7.50 \cdot 390 = 2925 \text{ kg}$$

$$k_E = 2.249 \cdot 10^{-4} \cdot z^3 = 2.249 \cdot 10^{-4} \cdot 290^3 = 5485.09 \text{ N/mm}$$

Συνεπώς, η ιδιοπερίοδος είναι:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{K_{LM} \cdot M}{k_E}} = 2\pi \sqrt{\frac{0.66 \cdot 2925}{5485.09 \cdot 10^3}} = 0.1179 \text{ s} = 117.9 \text{ ms}$$

Οπότε, για χρήση στο [Σχήμα 5-9] θα ληφθούν:

$$\frac{R_m}{\rho_r} = \frac{101.40}{8000} = 0.0127 \text{ και } \frac{t_d}{T} = \frac{2.78}{117.9} = 0.0236$$

Από το [Σχήμα 5-9] προκύπτει:

$$\frac{t_m}{t_d} \geq 5 \geq 3 \text{ ωστική απόκριση, άρα είναι σωστή η μέθοδος σχεδιασμού}$$

Αλλιώς:

$$t_m \approx \frac{i}{R_m} = \frac{4630}{101.40 \cdot 1000} = 45.7 \text{ ms} \rightarrow \frac{t_m}{t_d} = \frac{45.7}{2.78} = 16.43 \geq 3 \text{ ωστική απόκριση}$$

Θα τοποθετηθούν λοιπόν:

$$A_s = 0.005 \cdot z \cdot b = 0.005 \cdot 390 \cdot 1000 = 1950 \text{ mm}^2 \rightarrow \Phi 20/150$$

Έπειτα πρέπει να εκτελούνται οι υπόλοιποι έλεγχοι που επιδιώκει να εκτελέσει ο σχεδιαστής (όπως ο έλεγχος διάτμησης και οι αντίστοιχοι συνδετήρες). Σε περίπτωση που δεν επαρκεί η διατομή, τότε αυτή μεταβάλλεται με μέριμνα όμως ώστε να επανελεγχθούν τα ανωτέρα όρια και εάν είναι σωστή η μέθοδος σχεδιασμού.

8.4 Σχεδιασμός σύμμικτου panel

Δεδομένα:

- Πρόβολος με κατανεμημένη μάζα.
- Έκρηξη 100kg TNT σε απόσταση 6m.
- Μήκος: 3m.
- Σκυρόδεμα κατηγορίας: C30/37.
- Είδος χάλυβα: S355.
- Κατηγορία προστασίας: 2.
- SIF = 1.15 και DIF = 1.20 για δομικό χάλυβα.
- Τριγωνικό φορτίο ύψους 8000kPa, διάρκειας 2.78ms και i_r 4.63MPa-ms.

Επίλυση:

Λαμβάνονται:

- Συμμετρικά κοινό πάχος χαλύβδινης πλάκας: 8mm.
- Εσωτερικός πυρήνας πάχους: 184mm.
- Συνολικό πάχος: 200mm.
- Ήλοι σύνδεσης διαμέτρου 20mm και σε κανάβο 200mmΧ200mm.

Αύξηση τάσης διαρροής:

$$f_{yd,dyn} = SIF \cdot DIF \cdot f_{yd} = 1.15 \cdot 1.20 \cdot 355 = 490 \text{MPa}$$

Για κατηγορία προστασίας 2 θα ληφθεί Τύπος II με συμμετοχή μόνο της χαλύβδινης διατομής, άρα:

$$M_{Rd} = t \cdot f_{yd,dyn} \cdot (h_c + t) = 8 \cdot 490 \cdot (184 + 8) \cdot 1000 = 752640 \text{Nmm/m} = 752.64 \text{kNm/m}$$

Από [Πίνακας 5-1]:

$$R_M = \frac{2 \cdot M_{Rd}}{L} = \frac{2 \cdot 752.64}{3} = 501.76 \text{kN/m}$$

Για κατηγορία προστασίας 2:

$$X_m = L \cdot \tan 5^\circ = 3 \cdot \tan 5^\circ = 262 \text{mm}$$

Τα μέτρα ελαστικότητας είναι:

$$E_c = 33 \text{GPa}$$

$$E_s = 210 \text{GPa}$$

$$\alpha_e = E_s / E_c = 210 / 33 = 6.36$$

Γίνεται υπολογισμός του βάθους του ουδέτερου άξονα:

$$B = a_e \cdot t_c + a_e \cdot t_t - t_t = 6.36 \cdot 8 + 6.36 \cdot 8 - 8 = 93.76 \text{mm}$$

$$C = -D \cdot a_e \cdot t_t + \frac{t_t^2 \cdot a_e}{2} - \frac{t_c^2 \cdot a_e}{2} + \frac{t_c^2}{2} = -200 \cdot 6.36 \cdot 8 + \frac{8^2 \cdot 6.36}{2} - \frac{8^2 \cdot 6.36}{2} + \frac{8^2}{2} = -10144 \text{mm}^2$$

$$x = -B + \sqrt{B^2 - 2 \cdot C} = -93.76 + \sqrt{93.76^2 - 2 \cdot (-10144)} = 76.77 \text{mm}$$

Γίνεται υπολογισμός της ροπής αδράνειας:

$$I_b = b \cdot t_c \cdot \left(x - \frac{t_c}{2}\right)^2 + \frac{b}{a_e} \cdot \frac{(x - t_c)^3}{3} + b \cdot t_t \cdot \left(D - x - \frac{t_t}{2}\right)^2 =$$

$$= 8 \cdot \left(76.77 - \frac{8}{2}\right)^2 + \frac{1}{6.36} \cdot \frac{(76.77 - 8)^3}{3} + 8 \cdot \left(200 - 76.77 - \frac{8}{2}\right)^2 = 173136000 \text{mm}^4/\text{m}$$

Ενεργή δυσστησία:

$$G' = 4.53 \cdot 10^5 \cdot \left(\frac{t_t + t_c}{s_x^{0.7} \cdot s_y}\right) - 310 = 4.53 \cdot 10^5 \cdot \left(\frac{8 + 8}{200^{0.7} \cdot 200}\right) - 310 = 578.11 \text{N/mm}^2$$

Βέλος προβόλου λόγω κάμψης:

$$\delta_b = \frac{w \cdot L^4}{8 \cdot E \cdot I_b} = \frac{3000^4}{8 \cdot 210000 \cdot 173136000 \cdot 1000} = 0.278 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

Βέλος προβόλου λόγω διάτμησης:

$$\delta_s = \frac{w \cdot L^2}{2 \cdot b \cdot h_c \cdot G'} = \frac{3000^2}{2 \cdot 184 \cdot 578.11 \cdot 10^6} = 0.042 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

Οπότε ο διορθωτικός συντελεστής είναι:

$$c = \frac{\delta_b}{\delta_b + \delta_s} = \frac{0.278 \cdot 10^{-3}}{0.278 \cdot 10^{-3} + 0.042 \cdot 10^{-3}} = 0.869$$

Άρα, η ενεργός ροπή αδράνειας λόγω ολίσθησης στις διεπιφάνεια σκυροδέματος-χάλυβα είναι:

$$I_{\text{eff}} = c \cdot I_b = 0.869 \cdot 173136000 = 150455184 \text{ mm}^4/\text{m}$$

Άρα, από [Πίνακας 5-1]:

$$k_E = \frac{8 \cdot E \cdot I_{\text{eff}}}{L^3} = \frac{8 \cdot 210000 \cdot 150455184}{3000^3} = 9361.66 \text{ N/mm}$$

Συνεπώς:

$$X_E = \frac{R_m}{k_E} = \frac{501.76 \cdot 1000}{9361.66} = 53.60 \text{ mm}$$

Από τον [Πίνακας 5-1] προκύπτει:

$$K_{LM} = 0.66$$

Η μάζα υπολογίζεται ως:

$$M = (0.016 \cdot 7850 + 0.184 \cdot 2500) \cdot 3.0 = 1756.80 \text{ kg}$$

Επίλυση της βασικής εξίσωσης ώθησης:

$$\frac{i^2 \cdot A^2}{2 \cdot K_{LM} \cdot M} = \frac{R_m \cdot X_E}{2} + R_m \cdot (X_m - X_E) \rightarrow$$

$$\frac{(4.63 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (3000 \cdot 1000)^2 \cdot 1000}{2 \cdot 0.66 \cdot 1756.80} = 501.76 \cdot 1000 \cdot \left(X_m - \frac{53.60}{2} \right) \rightarrow$$

$$\rightarrow X_m = 193 \text{ mm}$$

Άρα:

$$t_m \approx \frac{i}{R_m} = \frac{4630}{\frac{501.76}{3} \cdot 1000} = 27.7 \text{ ms} \rightarrow \frac{t_m}{t_d} = \frac{27.7}{2.78} = 9.96 \geq 3 \text{ ωστική απόκριση}$$

Έπειτα πρέπει να εκτελούνται οι υπόλοιποι έλεγχοι που επιδιώκει να εκτελέσει ο σχεδιαστής (όπως ο έλεγχος των ήλων σύνδεσης). Σε περίπτωση που δεν επαρκεί η διατομή, τότε αυτή μεταβάλλεται με μέριμνα όμως ώστε να επανελεγχθούν τα ανωτέρα όρια και εάν είναι σωστή η μέθοδος σχεδιασμού.

9 ΛΑΜΙΝΑΤΕΔ ΥΑΛΟΠΙΝΑΚΑΣ

Δεδομένα:

- Υαλοπίνακας διαστάσεων: 2.0m x 5.1m.
- Γυαλί σε δύο φύλλα με αέριο Argon ενδιάμεσα πάχους 20mm. Το κάθε φύλλο έχει δύο στρώσεις πλωτό γυαλί (8mm έκαστη) και PVB πάχους 1.52mm ενδιάμεσα.

Επίλυση:

Από [Πίνακας 2-1]:

$$f_{gk,dyn} = 80 \text{MPa για πλωτό γυαλί}$$

Τα στοιχεία του ενεργού πάχους και της κατανομής του φορτίου θα ληφθούν από τον EN16612:

Το PVB είναι οικογένειας 3 και άρα έχει:

$$\omega = 0.7$$

Υπολογισμός του ενεργού πάχους:

$$h_{ef,w} = \sqrt[3]{\sum_k h_k^3 + 12 \cdot \omega \cdot \left(\sum_l h_k \cdot h_{m,k}^2 \right)} = \sqrt[3]{8^3 + 8^3 + 12 \cdot 0.7 \cdot (8 \cdot 4.76^2 + 8 \cdot 4.76^2)} = 15.97 \text{mm}$$

Υπολογισμός της κατανομής του φορτίου:

$$\lambda = 2/5.1 = 0.39$$

$k_5 = 0.585$ από το Table B.3 του EN16612

$$a^* = 28.9 \cdot \left(\frac{s \cdot h_1^3 \cdot h_2^3}{(h_1^3 + h_2^3) \cdot k_5} \right)^{0.25} = 28.9 \cdot \left(\frac{20 \cdot 16^3 \cdot 16^3}{(16^3 + 16^3) \cdot 0.585} \right)^{0.25} = 836 \text{mm}$$

$$\varphi = \frac{1}{1 + (a/a^*)^4} = \frac{1}{1 + (2000/836)^4} = 0.03$$

$$\delta_1 + \varphi \cdot \delta_2 = 0.5 + 0.03 \cdot 0.05 = 0.515$$

Όσον αφορά στην πριν τη ρηγμάτωση περιοχή:

$$E=70\text{GPa}$$

$$\nu=0.22$$

$$D = \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} = \frac{70000000 \cdot 0.01597^3}{12 \cdot (1 - 0.22^2)} = 24.94 \text{ kNm}$$

Ως μεταβλητή ορίζεται η αδιάστατη φόρτιση L_{ND} και με τους κάτωθι τύπους υπολογίζεται η συνάρτηση αντίστασης:

$$S_{ND} \text{ από [Σχήμα 6-9] για } a/b=0.39$$

$$X \text{ από [Σχήμα 6-10] για } a/b=0.39$$

$$a=2000\text{mm}$$

$$t=15.97\text{mm}$$

$$\sigma = \frac{S_{ND} \cdot D}{a^2 \cdot t}$$

$$r = \frac{L_{ND} \cdot D \cdot t}{a^4}$$

Πίνακας 9-1. Απόκριση υαλοπίνακα πριν τη ρηγμάτωσή του.

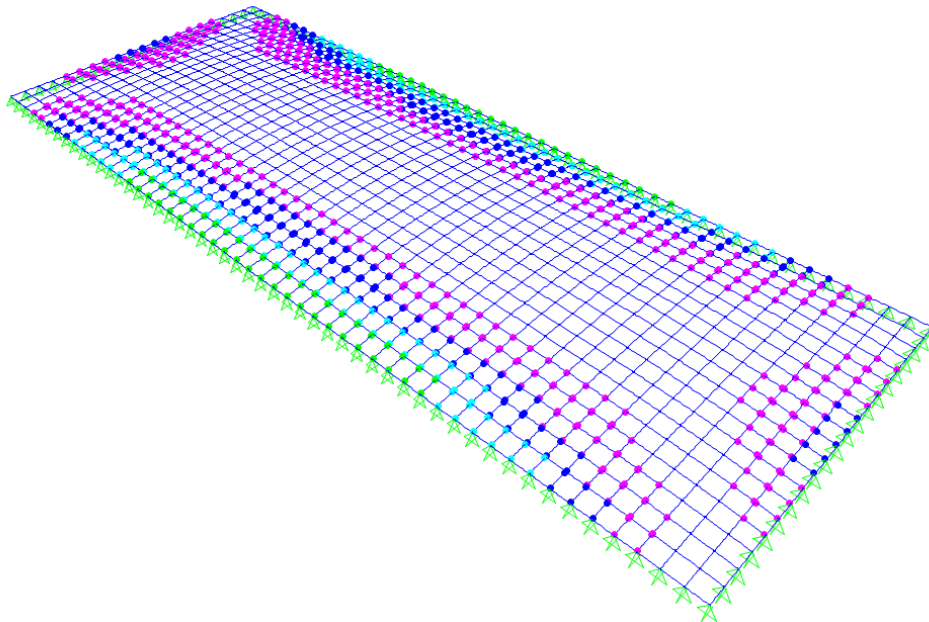
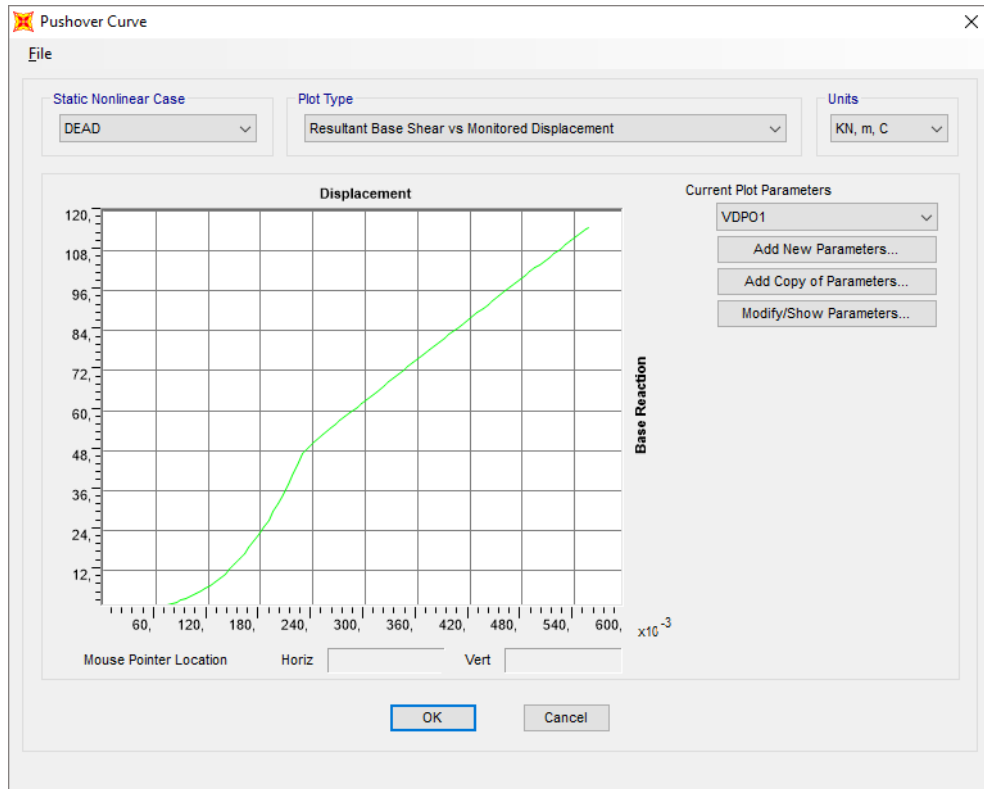
L_{ND}	S_{ND}	X (mm)	σ (MPa)	r (kPa)
10	10	1.60	3.9	0.25
30	20	4.79	7.8	0.75
70	30	9.58	11.7	1.75
120	60	12.77	23.4	3.00
180	80	17.56	31.2	4.50
300	100	31.93	39.1	7.50
400	140	47.90	54.7	10.0
600	205	55.88	80.0	15.0

Όσον αφορά στη μετά τη ρηγμάτωση περιοχή ελήφθησαν τα εξής στοιχεία για το PVB:

Πίνακας 9-2. Στοιχεία του PVB.

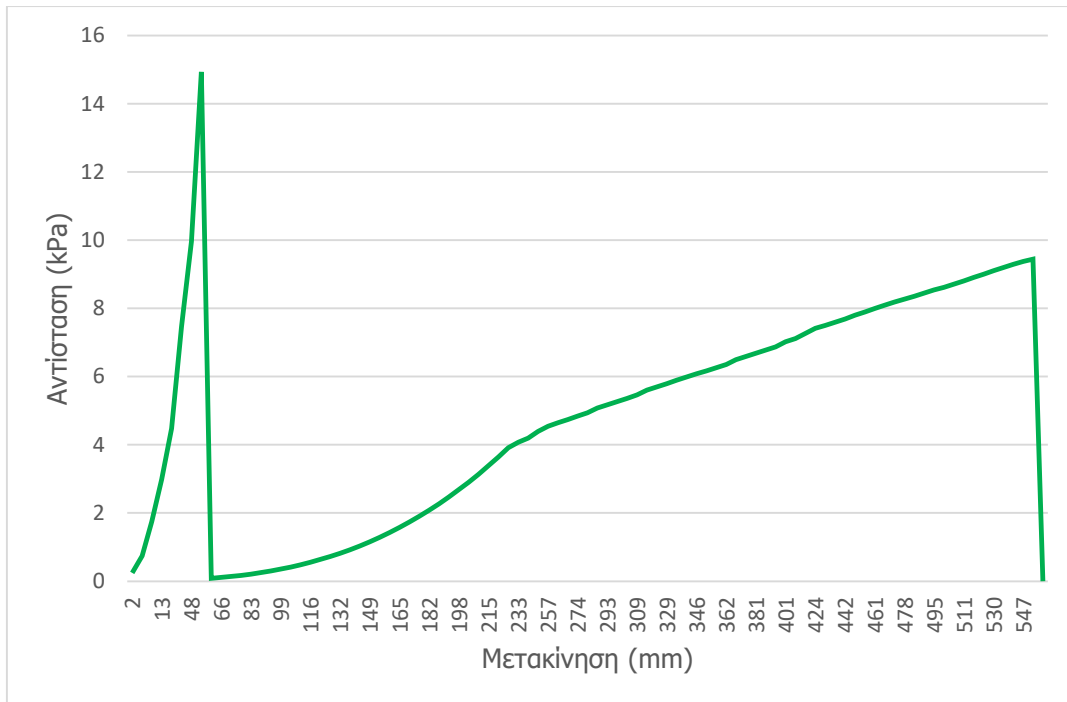
Θραύση	27.8% του ανοίγματος = $2000 \cdot 0.278 = 556\text{mm}$
Πάχος	1.52mm
Μέτρο ελαστικότητας	214.2MPa
Τάση διαρροής	7900kPa
Μέτρο κράτυνσης	8.31MPa

Έτσι, θα γίνει μη γραμμική γεωμετρική και υλικού ανάλυση μεμβράνης μέχρι το σημείο των 556mm, ώστε να εξαχθεί η συνάρτηση αντίστασης για την περιοχή μετά τη ρηγμάτωση. Αυτή είναι:



Σχήμα 9-1. Απόκριση υαλοπίνακα μετά τη ρηγμάτωσή του στο λογισμικό SAP2000.

Ακολουθεί συνδυασμός αυτών των δύο συναρτήσεων σε μία συνολική:



Σχήμα 9-2. Καμπύλη αντίστασης υαλοπίνακα.

Από [73] προσεγγίζεται η απόκριση του υαλοπίνακα προσεγγιστικά ως:

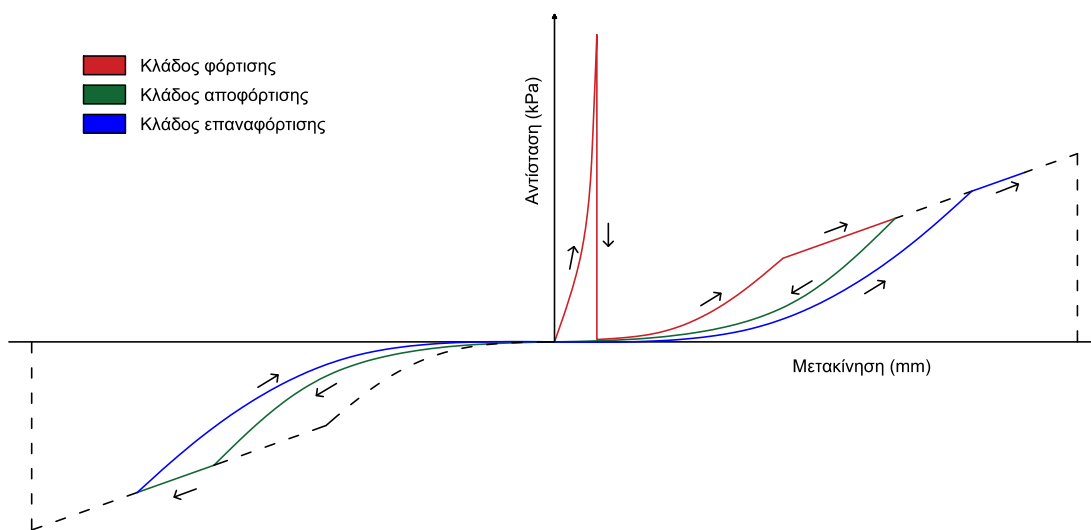
$$K_{LM}=0.65$$

Η μάζα είναι:

$$M=0.016 \cdot 2580 \cdot 2.00 \cdot 5.10 + 0.00152 \cdot 1050 \cdot 2.00 \cdot 5.10 = 437.33 \text{ kg}$$

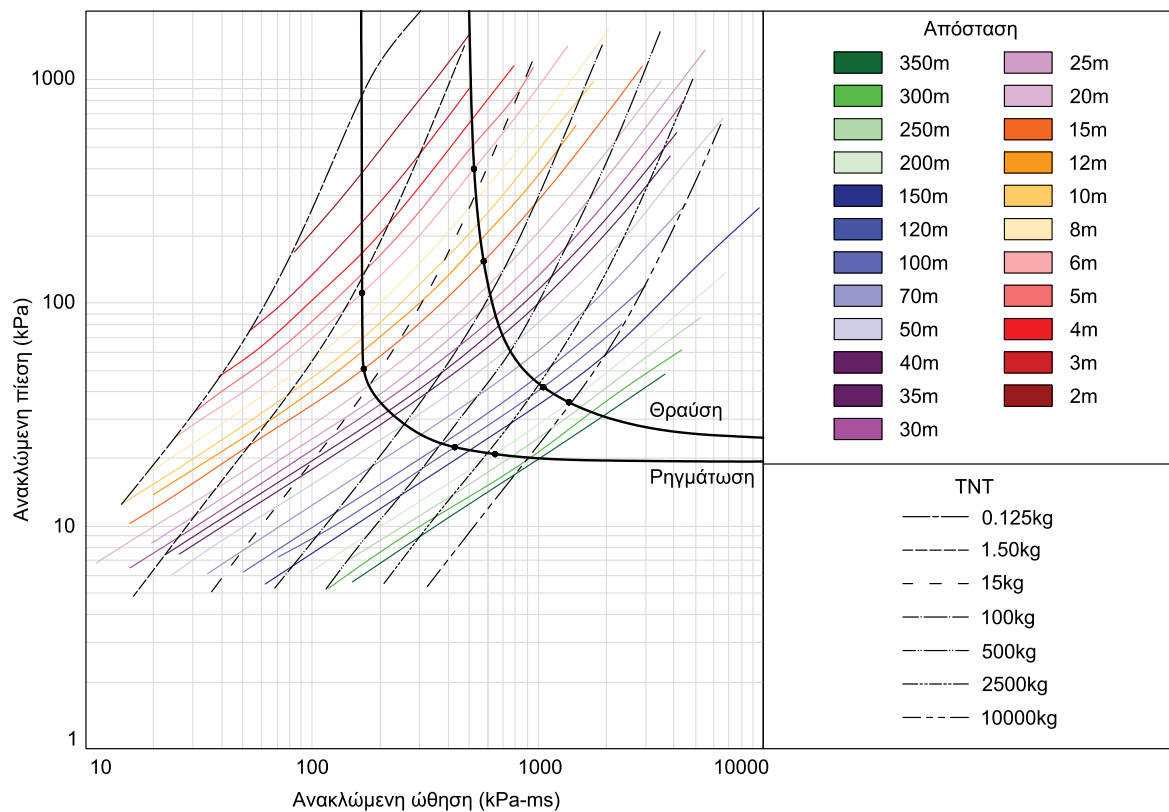
Λαμβάνεται μόνο αεροελαστική απόσβεση λόγω της ατμόσφαιρας ίση με:

$$418.1 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2) \cdot 2\text{m} \cdot 5.1\text{m} = 4264 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}$$



Σχήμα 9-3. Κλάδοι φόρτισης – αποφόρτισης laminated υαλοπίνακα.

Εξάγεται το διάγραμμα πίεσης - ώθησης μέσα από την επίλυση ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή στο οποίο παρουσιάζονται οι καμπύλες θραύσης και ρηγμάτωσης του υαλοπίνακα για διάφορες πιέσεις και ωθήσεις που αντίστοιχα προκύπτουν ανάλογα με την εκάστοτε έκρηξη. Στην ουσία εκτελείται για κάθε χαρακτηριστική έκρηξη χρονική ανάλυση με την παρουσιαζόμενη καμπύλη αντίστασης λαμβάνοντας υπόψιν τους σωστούς κλάδους φόρτισης – αποφόρτισης. Αυτές είναι χρονικές αναλύσεις στις οποίες επιστρατεύεται η μέθοδος Newmark γραμμικής επιτάχυνσης σε σύμπραξη με την τροποποιημένη μέθοδο Newton-Raphson λαμβάνοντας υπόψιν τη μη γραμμική συμπεριφορά.

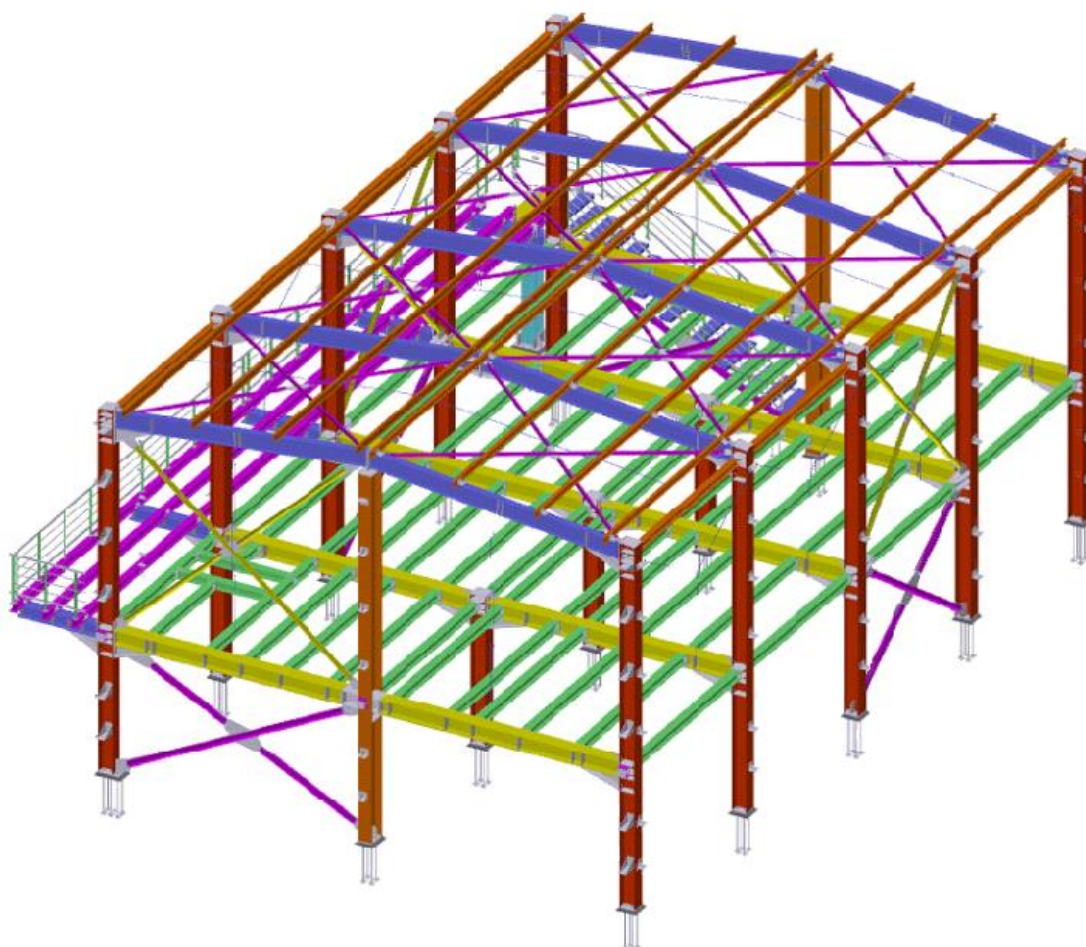


Σχήμα 9-4. Διάγραμμα πίεσης – ώθησης του υαλοπίνακα με τις αντίστοιχες καμπύλες θραύσης και ρηγμάτωσης.

Έπειτα πρέπει να εκτελούνται οι υπόλοιποι έλεγχοι που επιδιώκει να εκτελέσει ο σχεδιαστής (όπως ο έλεγχος του πλαισίου του υαλοπίνακα).

10 ΤΥΠΙΚΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟ ΚΤΙΡΙΟ ΣΤΑΘΜΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Θα εκτελεστεί πλήρης έλεγχος σε έκρηξη του φορέα τυπικού μεταλλικού κτιρίου σταθμού παραγωγής ενέργειας ο οποίος έχει ήδη σχεδιαστεί για συμβατικά φορτία.



Σχήμα 10-1. Τρισδιάστατη όψη του φορέα.

10.1 Γενικά στοιχεία

Υλικά

Δομικός χάλυβας:	S275JR 210GPa SIF 1.10 DIF 1.29
Χάλυβας επικάλυψης και πλαγιοκάλυψης:	S350GD 210GPa SIF 1.21 DIF 1.10
Ποιότητα αγκυρίων και κοχλιών:	8.8
Σκυρόδεμα:	C30/37
Χάλυβας οπλισμού:	S400
Επικάλυψη:	Θεμελίωση: 50mm Δοκοί, υποστυλώματα, τοιχώματα: 30mm Πλάκες: 20mm

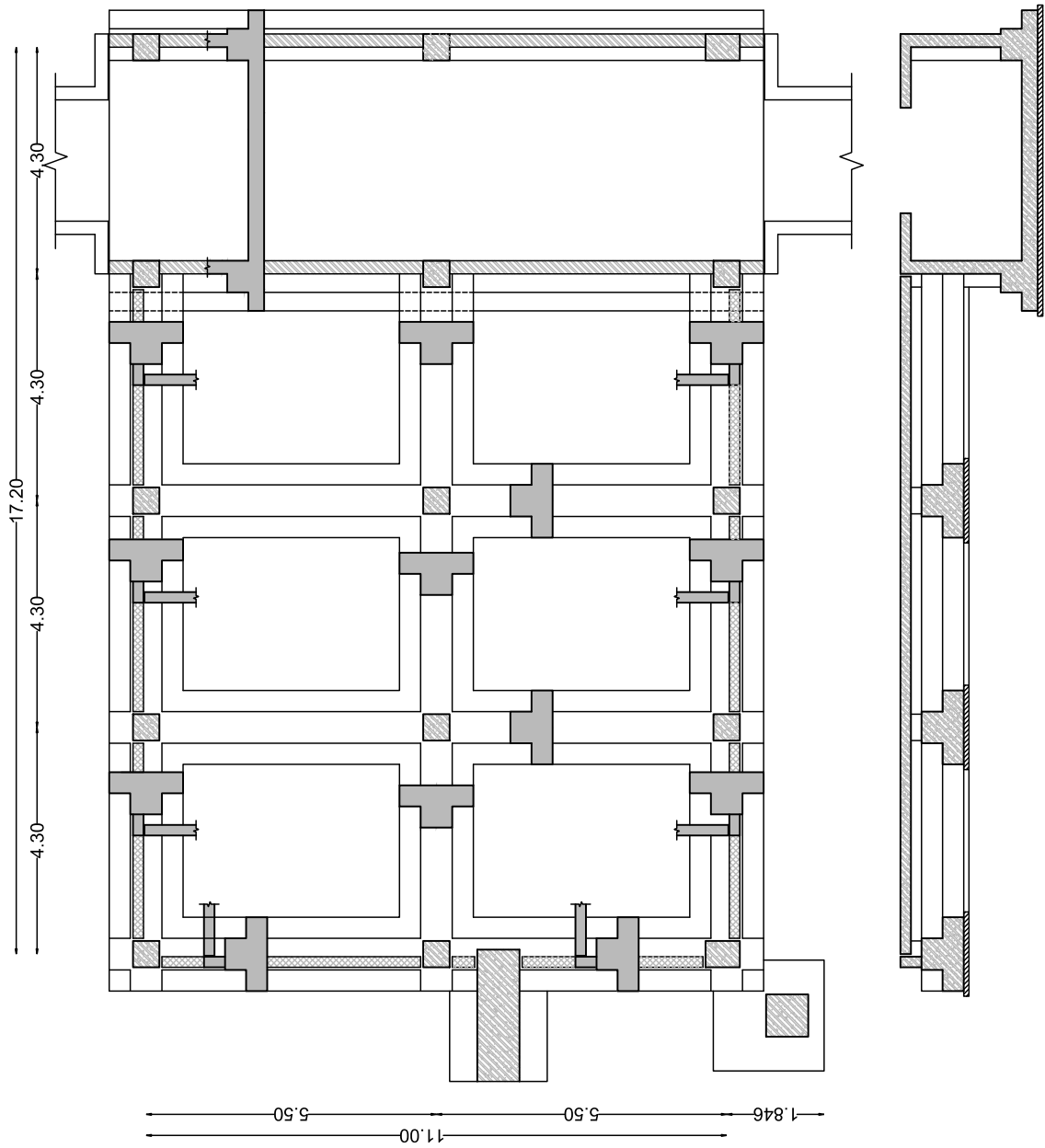
Έδαφος

Ειδικό βάρος γαιών:	18kN/m ³
Επιτρεπόμενη τάση:	250kPa
Σταθερά ελατηρίου εδάφους:	7700kN/m ³

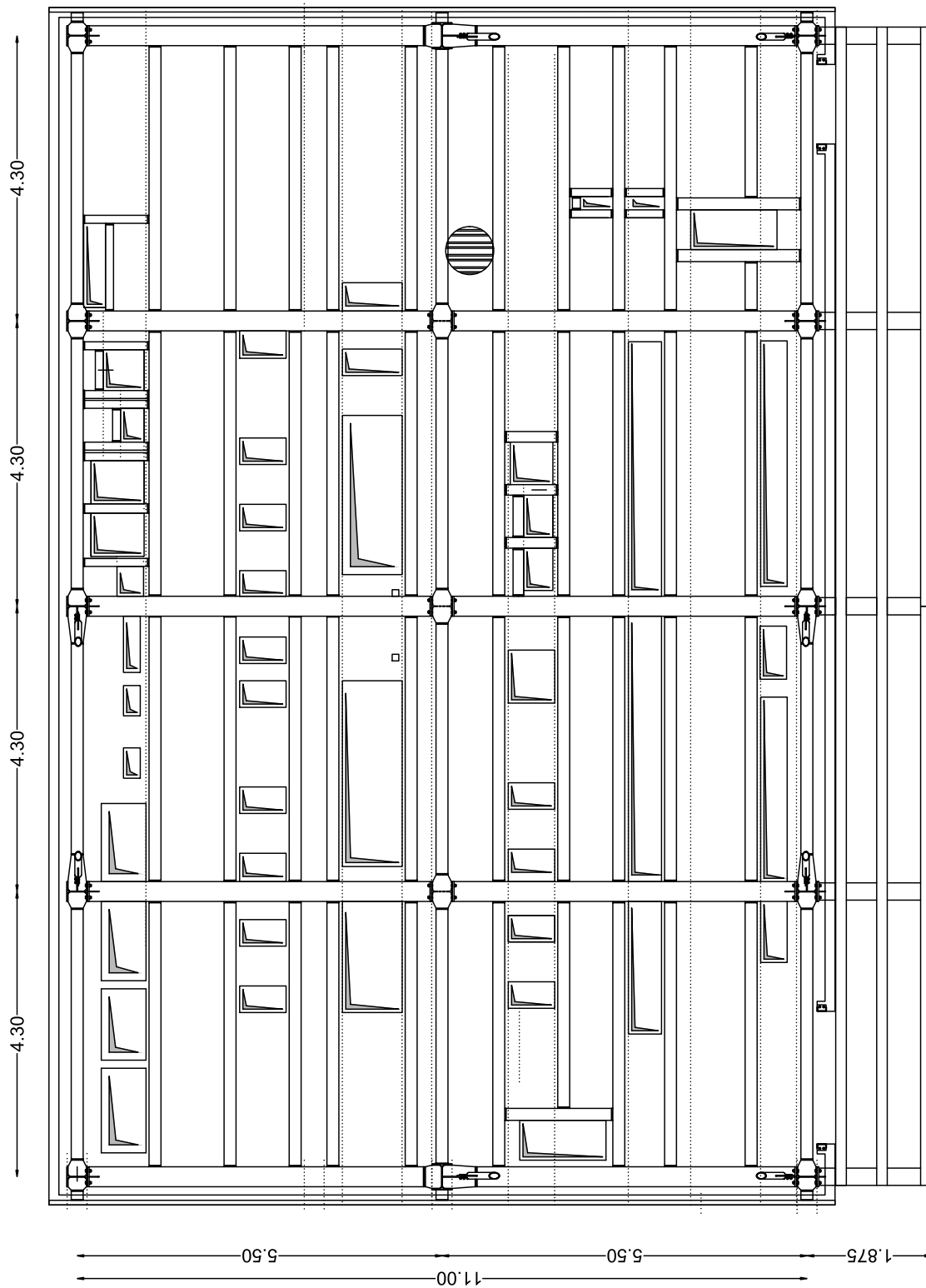
Η κατασκευή έχει διαστάσεις 17.95mX11.75m και εκτείνεται σε κάτοψη 210.00m² και σε συνολικό ύψος 8.30m. Η σκάλα αποτελεί ανεξάρτητο φορέα διαχωρισμένο από τον κυρίως φορέα και ως τέτοιος δεν θα αναλυθεί στα φορτία έκρηξης.

Οι διατομές είναι:

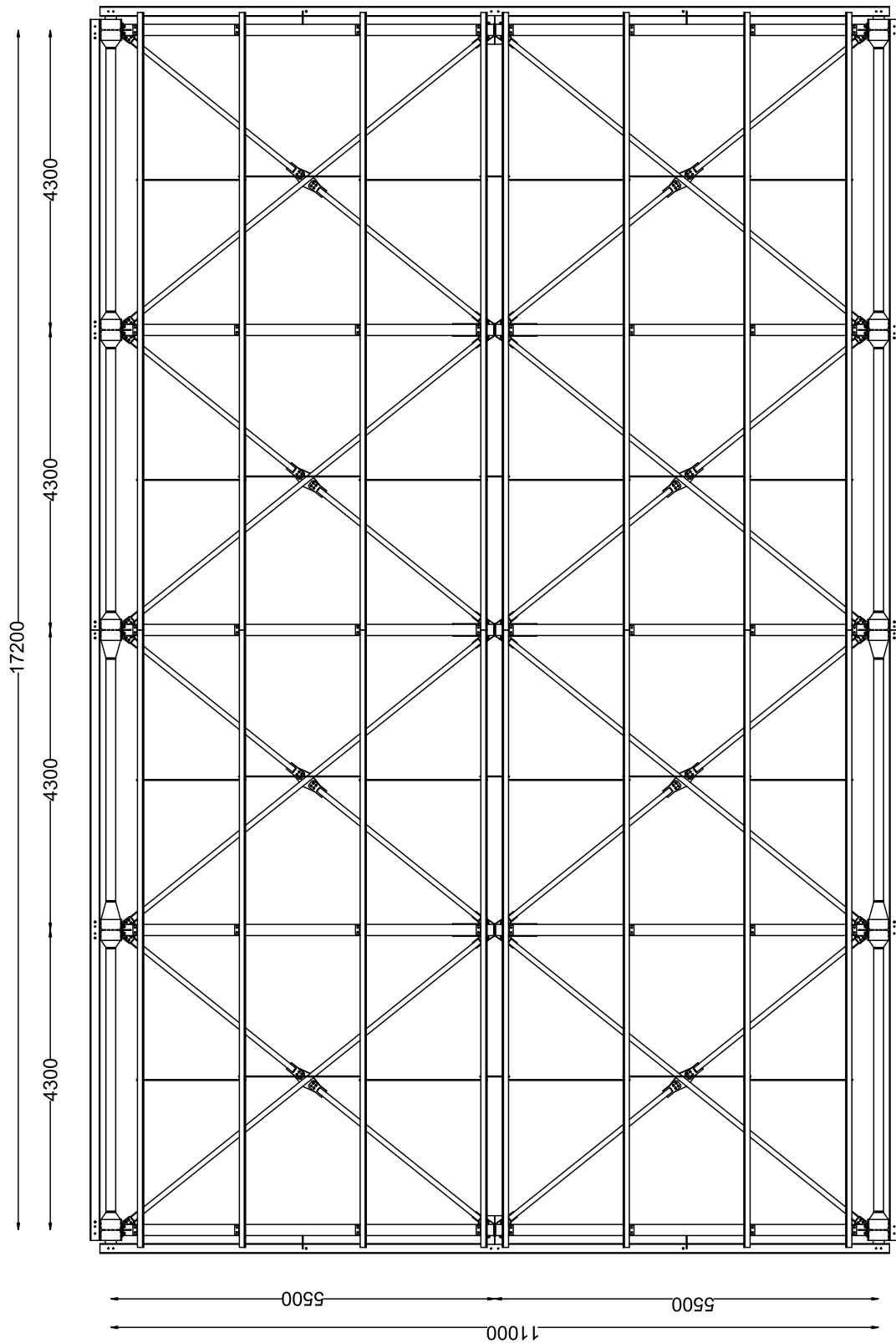
Υποστυλώματα:	HEA320 HEA400
Κατακόρυφοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας:	CHS139.7X6.3 CHS101.6X6.3
Οριζόντιοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας:	CHS76.1X5.0
Δοκοί πλαισίου:	IPE330 HEA320
Κεφαλοδοκοί:	HEA140
Τεγίδες:	IPE140
Μηκίδες:	UPN140
Δοκοί πλάκας:	HEA160 HEA180 HEA260



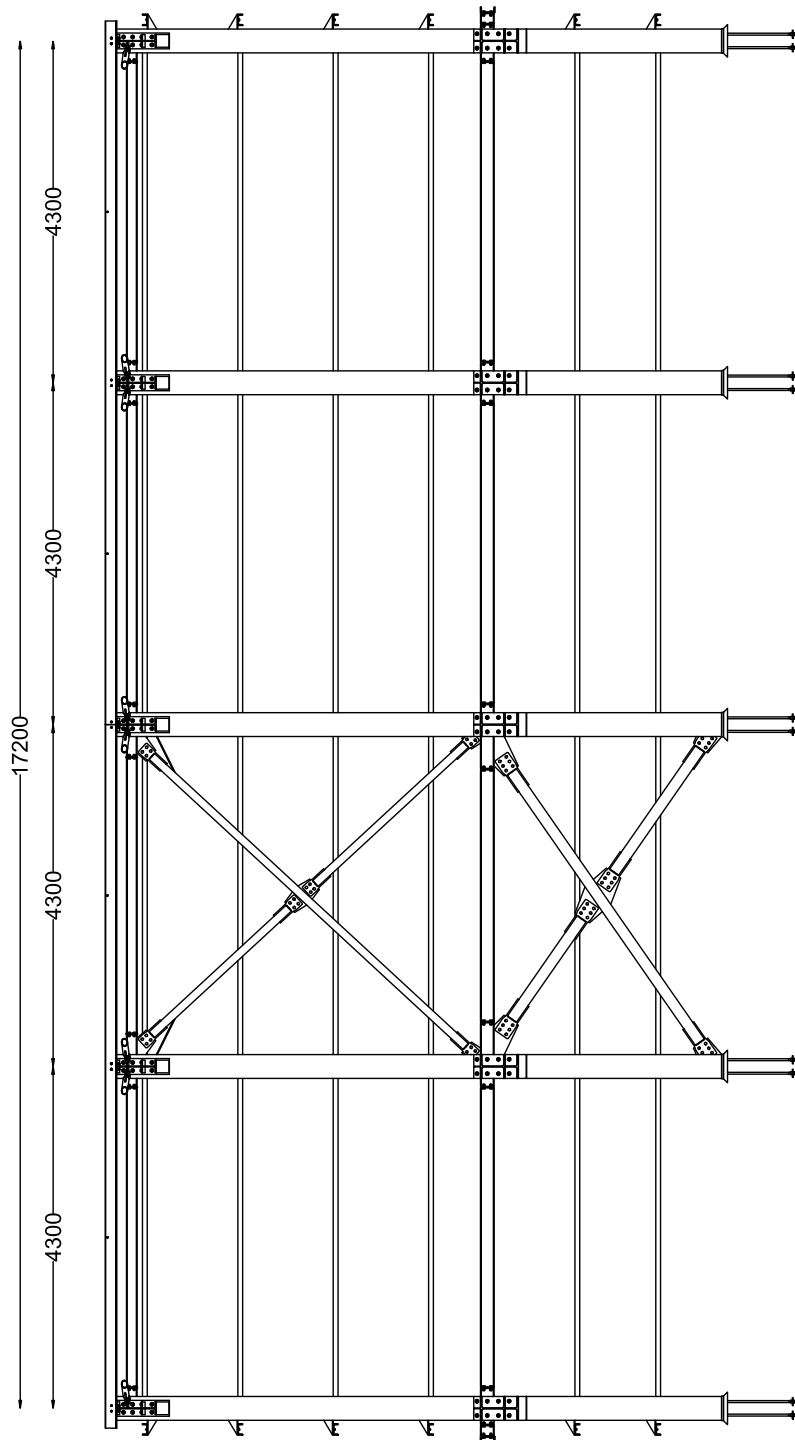
Σχήμα 10-2. Θεμελίωση του φορέα.



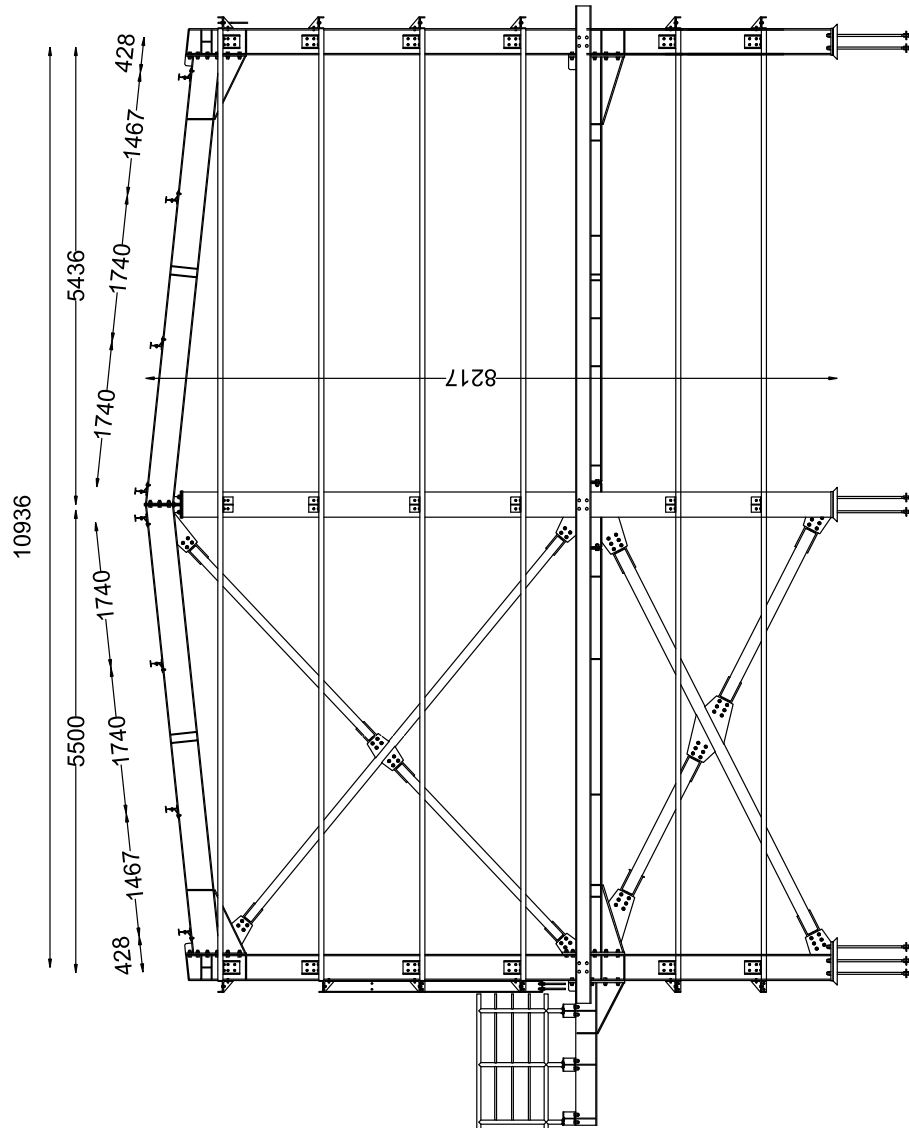
Σχήμα 10-3. Κάτοψη οροφής ισογείου του φορέα.



Σχήμα 10-4. Κάτοψη οροφής ορόφου του φορέα.



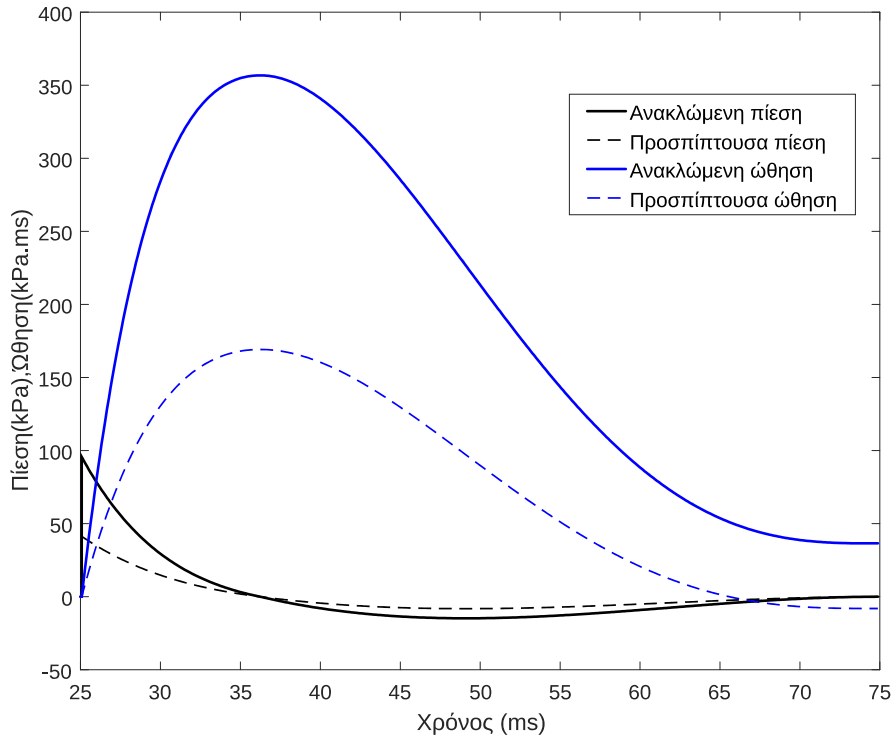
Σχήμα 10-5. Όψη της διαμήκου πλευράς του φορέα.



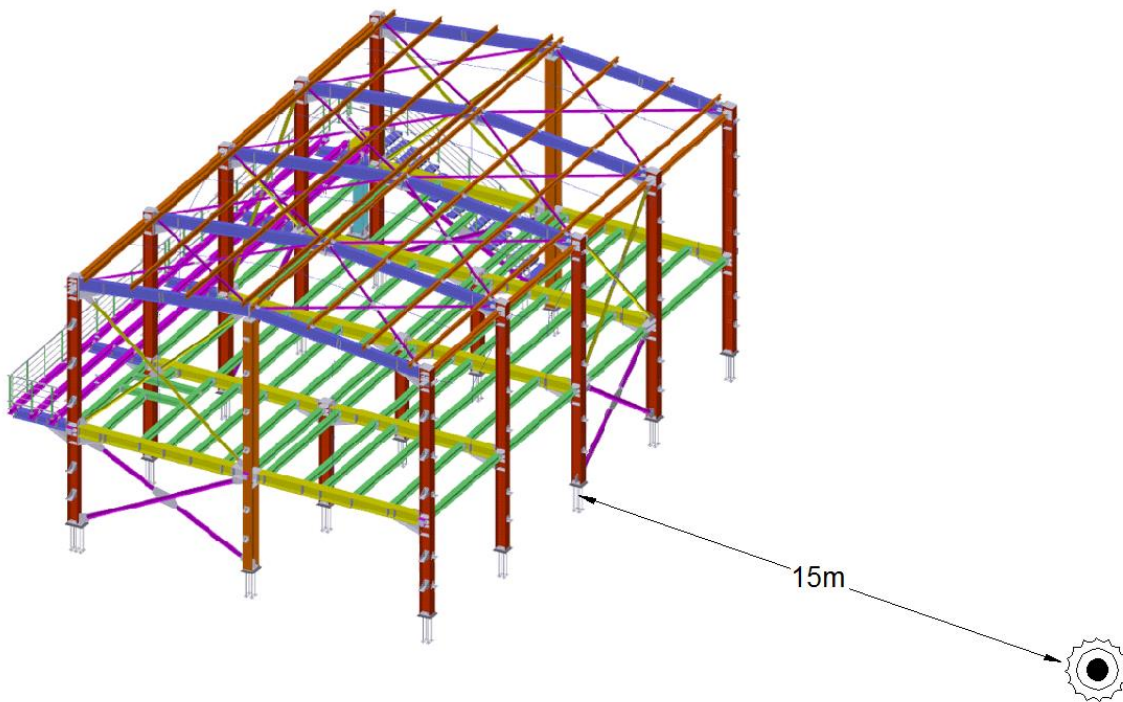
Σχήμα 10-6. Όψη της εγκάρσιας πλευράς του φορέα.

10.2 Φορτίο έκρηξης

Το φορτίο θα υπολογιστεί ως 25kg στα 15m το οποίο είναι ένα κλασσικό φορτίο για έλεγχο μιας τυπικής κατασκευής, όπως είναι η προκειμένη, σε έκρηξη. Το σημείο της έκρηξης εκλέγεται περί το μέσο της διαμήκους έννοιας του κτιρίου όπως φαίνεται στην αντίστοιχη εικόνα.



Σχήμα 10-7. Χαρακτηριστικά έκρηξης 25kg στα 15m μέσω του λογισμικού BlastM.



Σχήμα 10-8. Έκρηξη σε σχέση με κτίριο.

Τα αποτελέσματα είναι τα εξής για $L=15\text{m}$ (μπροστά):

Μέγιστη προσπίπτουσα υπερπίεση:	41.30kPa
Μέγιστη ανακλώμενη υπερπίεση:	95.69kPa
Χρόνος άφιξης εκρηκτικού κύματος:	25.07ms
Διάρκεια θετικής φάσης:	11.18ms
Διάρκεια θετικής φάσης γραμμικοποιημένα:	8.19ms
Προσπίπτουσα ώθηση:	169.22kPa-ms
Ανακλώμενη ώθηση:	356.80kPa-ms
Μήκος εκρηκτικού κύματος:	4.50m
Ταχύτητα εκρηκτικού κύματος:	0.4m/ms

Τα αποτελέσματα είναι τα εξής για $L=17.30\text{m}$ (πλευρικά):

Μέγιστη προσπίπτουσα υπερπίεση:	32.48kPa
Μέγιστη ανακλώμενη υπερπίεση:	73.13kPa
Χρόνος άφιξης εκρηκτικού κύματος:	31.03ms
Διάρκεια θετικής φάσης:	11.78ms
Διάρκεια θετικής φάσης γραμμικοποιημένα:	9.16ms
Προσπίπτουσα ώθηση:	148.82kPa-ms
Ανακλώμενη ώθηση:	305.19kPa-ms
Μήκος εκρηκτικού κύματος:	4.59m
Ταχύτητα εκρηκτικού κύματος:	0.39m/ms

Τα αποτελέσματα είναι τα εξής για $L=16.90\text{m}$ (άνω):

Μέγιστη προσπίπτουσα υπερπίεση:	33.76kPa
Μέγιστη ανακλώμενη υπερπίεση:	76.32kPa
Χρόνος άφιξης εκρηκτικού κύματος:	29.98ms
Διάρκεια θετικής φάσης:	11.68ms
Διάρκεια θετικής φάσης γραμμικοποιημένα:	9.00ms
Προσπίπτουσα ώθηση:	152.03kPa-ms
Ανακλώμενη ώθηση:	313.03kPa-ms
Μήκος εκρηκτικού κύματος:	4.55m
Ταχύτητα εκρηκτικού κύματος:	0.39m/ms

Από το διάγραμμα 2.3 των UFC 3-340-02 προκύπτει:

$$q_o = 6 \text{ kPa}$$

Από [Σχήμα 3-14]:

$$C_r = 370 \text{ m/s}$$

Επιπλέον:

$$t_c = \frac{4 \cdot S}{(1 + \frac{S}{G}) \cdot C_r} = \frac{4 \cdot 8.4}{(1 + \frac{8.4}{11.7}) \cdot 370} = 0.053 \text{ s} = 53 \text{ ms}$$

Θεωρείται:

$$C_D = 1.00$$

Άρα:

$$p_{\text{stag}} = p_{s_o} + C_D \cdot q_o = 41.30 + 1.00 \cdot 6 = 47.30 \text{ kPa}$$

Επιπλέον για πλευρικά, άνω και πίσω από [Πίνακας 3-2] θεωρείται:

$$C_D = -0.4$$

Από τα διαγράμματα 2-196, 2-197, 2-198 των UFC 3-340-02 υπολογίζεται:

$$L_w/L = \frac{4.59}{11.60} = 0.39 \text{ πλευρικά} \quad \left| \quad \frac{4.55}{11.70} = 0.39 \text{ άνω} \quad \left| \quad L_w/L = \frac{4.55}{7.70} = 0.58 \text{ πίσω}$$

$$C_E = 0.24 \text{ πλευρικά} \quad | \quad C_E = 0.24 \text{ άνω} \quad | \quad C_E = 0.32 \text{ πίσω}$$

$$t_r = 7 \text{ ms} \text{ πλευρικά} \quad | \quad t_r = 7 \text{ ms} \text{ άνω} \quad | \quad t_r = 8 \text{ ms} \text{ πίσω}$$

$$t_d = 35 \text{ ms} \text{ πλευρικά} \quad | \quad t_d = 35 \text{ ms} \text{ άνω} \quad | \quad t_d = 26 \text{ ms} \text{ πίσω}$$

Οπότε:

$$p_a = C_E \cdot p_{s_o} + C_D \cdot q_o = 0.24 \cdot 32.48 - 0.4 \cdot 6 = 6 \text{ kPa} \text{ πλευρικά}$$

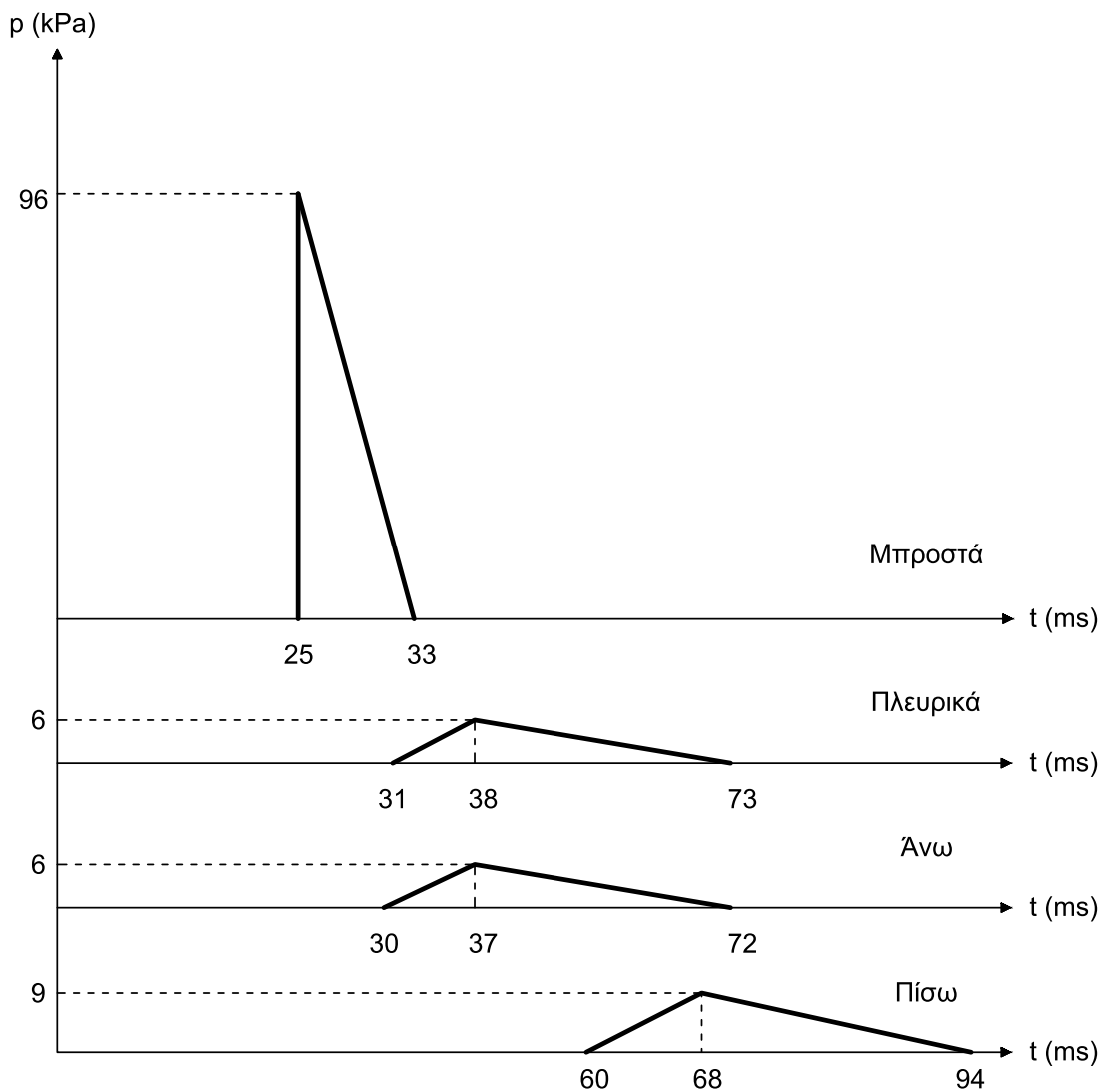
$$p_a = C_E \cdot p_{s_o} + C_D \cdot q_o = 0.24 \cdot 33.76 - 0.4 \cdot 6 = 6 \text{ kPa} \text{ άνω}$$

$$p_a = C_E \cdot p_{s_o} + C_D \cdot q_o = 0.32 \cdot 33.76 - 0.4 \cdot 6 = 9 \text{ kPa} \text{ πίσω}$$

Σημείο άφιξης για πίσω:

$$t_a = 29.98 + 11.70 / 0.39 = 60 \text{ ms}$$

Άρα:



Σχήμα 10-9. Αποτελέσματα φόρτισης μπροστά, άνω, πλευρικά και πίσω.

10.3 Όρια παραμορφώσεων

Επιδιώκεται ο σχεδιασμός σε συγκεκριμένο επίπεδο επιτελεστικότητας, είτε Medium level of protection όπου για κύρια στοιχεία λαμβάνεται επίπεδο B1 Superficial damage και για δευτερεύοντα στοιχεία επίπεδο B2 Moderate damage, είτε Low level of protection όπου για κύρια στοιχεία λαμβάνεται επίπεδο B2 Moderate damage και για δευτερεύοντα στοιχεία επίπεδο B3 Heavy damage σύμφωνα με το PDC-TR 06-08:

Πίνακας 10-1. Όρια παραμορφώσεων σύμφωνα με το PDC-TR 06-08.

Είδος στοιχείου	Ειδικότερα στοιχεία	Είδος επικρατούσας παραμόρφωσης	Μέγιστη παραμόρφωση για Medium level	Μέγιστη παραμόρφωση για Low level
Δοκοί, τεγίδες	-	θ	3°	12°
		μ	3	10
Μηκίδες	Με δράση καλωδίου	θ	4°	12°
Πλαίσια, σύνδεσμοι δυσκαμψίας	-	θ	-	3°
		μ	1	3
Μεταλλικά φύλλα ψυχρής έλασης, πετάσματα	Με δράση μεμβράνης	θ	3°	6°
		μ	3	6

10.4 Ανάλυση με χρήση της μεθόδου SDOF

10.4.1 Επικάλυψη

Υλικό

Ποιότητα:	S350GD
DIF:	1.10
SIF:	1.21
Αντοχή διαρροής f_y :	350MPa
Δυναμική αντοχή διαρροής $f_{y,dyn}$:	$1.10 \cdot 1.21 \cdot 350 = 465.85 \text{MPa}$
Μέτρο ελαστικότητας:	210GPa

Επιτρεπόμενες παραμορφώσεις

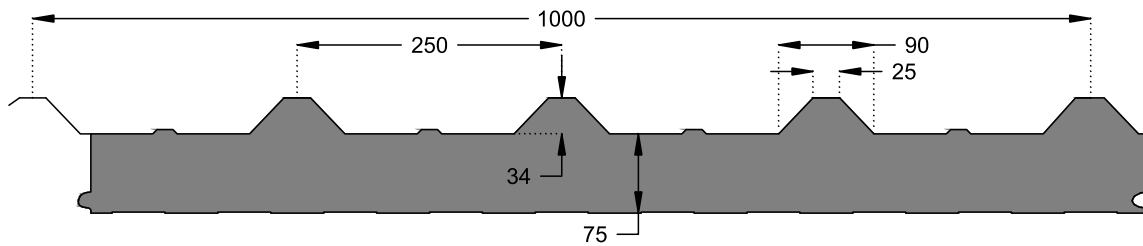
Medium level of protection:	$\theta = 3^\circ, \mu = 3$
Low level of protection:	$\theta = 6^\circ, \mu = 6$

Γεωμετρία

Μέγιστο μήκος:	1.74m
Πλάτος επιρροής:	1.00m

Διατομή

Πάχος χάλυβα t:	0.5mm εσωτερικά 0.5mm εξωτερικά
Ροπή αδράνειας I_{yy} :	121.52cm ⁴
Ροπή αντίστασης W_y :	14.04cm ³
Βάρος:	0.1228kN/m ²



Σχήμα 10-10. Πέτασμα χάλυβα – πολυουρεθάνης πάχους 75mm.

Αντοχή

Υπολογίζεται η πλαστική ροπή αντοχής με συντελεστή 0.90 και η αντοχή σε τέμνουσα σύμφωνα με όσα ορίζουν τα UFC 3-340-02.

Πλαστική ροπή αντοχής M_{pl} :	$0.90 \cdot W_y \cdot f_y = 0.90 \cdot 14.04 \cdot 10^{-6} \cdot 465.85 \cdot 10^3 = 5.89 \text{ kNm}$
β :	0.0062
h :	47.03mm
h/t :	$47.03/0.5 = 94 < 150$ αποφυγή καμπτικού λυγισμού
f_{dv} για τέμνουσα:	$1.07 \cdot 10^3 \cdot 68.94/10^3 / (h/t) =$ $1.07 \cdot 10^3 \cdot 68.94/10^3 / 94 = 78.42 \text{ MPa}$
f_{dv} για ταυτόχρονη τέμνουσα και κάμψη:	77.21MPa
Αντοχή τέμνουσας V_R σε απλή στήριξη:	$N \cdot h \cdot t \cdot f_{dv} = 8 \cdot 47.03 \cdot 0.5 \cdot 78.42/10^3 = 14.75 \text{ kN}$
Αντοχή τέμνουσας V_R σε στήριξη συνέχειας:	$N \cdot h \cdot t \cdot f_{dv} = 8 \cdot 47.03 \cdot 0.5 \cdot 77.21/10^3 = 14.52 \text{ kN}$

Φορτίο

Ίδιο βάρος W :	0.1228kN/m ²
Έκρηξη:	6.00kN/m ²
	Άνοδος για 7ms και κάθοδος για 35ms

Συνάρτηση αντίστασης, μάζα και απόσβεση

Η στήριξη των πετασμάτων επικάλυψης είναι αρθρωτή στα άκρα τους και συνεχής στις ενδιάμεσες στήριξεις. Έτσι, υπολογίζεται η συνάρτηση αντίστασης θεωρώντας ως στήριξη άρθρωση – πάκτωση επειδή είναι δυσμενέστερη της αμφίπακτης λειτουργίας. Η στήριξη άρθρωση – πάκτωσης εμφανίζεται σε ακραίο φάντωμα, δηλαδή ανάμεσα στην ακραία σύνδεση άρθρωσης και στη πρώτη εμφανιζόμενη στήριξη συνέχειας που χρησιμοποιείται ως πάκτωση. Οι υπολογισμοί γίνονται σύμφωνα με όσα ορίζουν τα UFC 3-340-02 για διατομές ψυχρής έλασης.

R_m από [Πίνακας 5-1]:	$\frac{4 \cdot (M_{ps} + 2 \cdot M_{pm})}{L} = \frac{4 \cdot (5.89 + 2 \cdot 5.89)}{1.74} = 40.60 \text{ kN}$
Παραμόρφωση διαρροής χ_E :	$\frac{(\beta \cdot R_m \cdot L^3)}{E \cdot I_{yy}} = \frac{(0.0062 \cdot 40.60 \cdot 1.74^3)}{210 \cdot 10^6 \cdot 121.52 \cdot 10^{-8}} = 5.2 \text{ mm}$
Ισοδύναμη δυσκαμψία K_E :	$\frac{R_m}{\chi_E} = \frac{40.60}{0.0052} = 7813.18 \text{ kN/m}$

Μάζα M: $W \cdot A = 0.1228 \cdot 1 \cdot 1.74 = 21.37 \text{kg}$

K_{LM} : 0.74

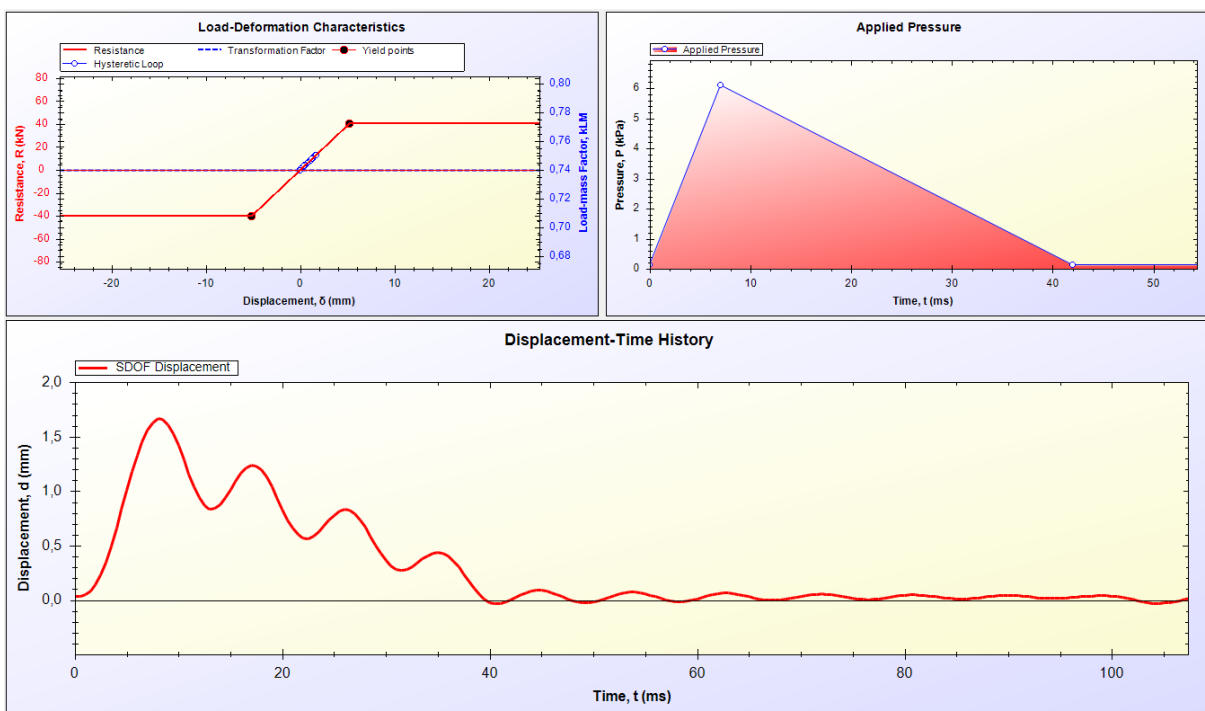
Ιδιοπερίοδος T: $2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{K_{LM} \cdot M}{K_E}} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{0.74 \cdot 21.37}{7813.18 \cdot 10^3}} \cdot 10^3 = 8.94 \text{ms}$

Συντελεστής απόσβεσης ζ: 3%

Απόσβεση C: $2 \cdot \zeta \cdot M \cdot \omega = 2 \cdot 0.03 \cdot 21.37 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{8.94 \cdot 10^{-3}} = 901.20 \text{Ns/m}$

Αρχική παραμόρφωση: $\frac{W}{K_E} = \frac{0.1228 \cdot 1 \cdot 1.74}{7813.18} \cdot 10^3 = 0.03 \text{mm}$

Αποτελέσματα επίλυσης



Σχήμα 10-11. Αποτελέσματα απόκρισης μονοβάθμιου ταλαντωτή επικάλυψης στο λογισμικό RCblast.

Απόκριση

Μέγιστη μετακίνηση γ_m : 1.67mm

θ : $\arctan\left(\frac{2 \cdot \gamma_m}{0.5 \cdot L}\right) = \frac{2 \cdot 1.67 \cdot 10^{-3}}{0.5 \cdot 1.74} = 0.22^\circ < 3^\circ$

μ : $\frac{\gamma_m}{X_E} = \frac{1.67}{5.20} = 0.32 < 3$

Αντιδράσεις στήριξης

Οι αντιδράσεις στήριξης μεταβάλλονται χρονικά και προκύπτουν μέσα από τον [Πίνακας 5-1]:

Χρόνος (ms)	0	8	13	17	22	26	32	35	40
Αντίδραση στήριξης άρθρωσης (kN)	0.00	4.59	2.58	3.39	1.77	2.30	0.89	1.20	0.08
Αντίδραση στήριξης πάκτωσης (kN)	0.00	7.54	4.45	5.54	3.07	3.78	1.57	1.97	0.13

Οι αντιδράσεις είναι χαμηλότερου μεγέθους από την αντοχή σε τέμνουσα.

10.4.2 Πλαγιοκάλυψη

Υλικό

Ποιότητα:	S350GD
DIF:	1.10
SIF:	1.21
Αντοχή διαρροής f_y :	350MPa
Δυναμική αντοχή διαρροής $f_{y,dyn}$:	$1.10 \cdot 1.21 \cdot 350 = 465.85\text{MPa}$
Μέτρο ελαστικότητας:	210GPa

Επιτρεπόμενες παραμορφώσεις

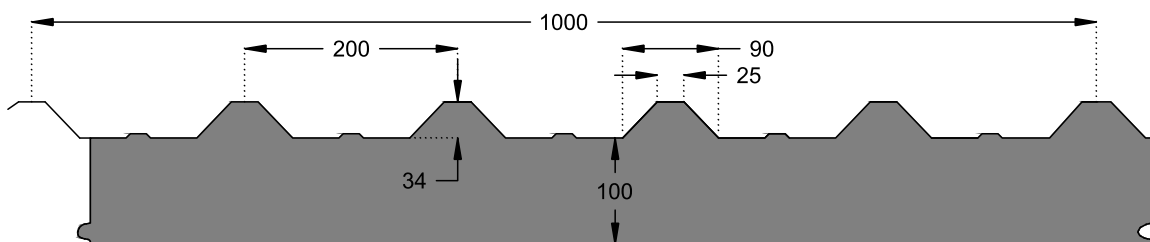
Medium level of protection:	$\theta = 3^\circ, \mu = 3$
Low level of protection:	$\theta = 6^\circ, \mu = 6$

Γεωμετρία

Μέγιστο μήκος:	1.20m
Πλάτος επιρροής:	1.00m

Διατομή

Πάχος χάλυβα t :	0.5mm εσωτερικά 1.0mm εξωτερικά
Ροπή αδράνειας I_{yy} :	256.29cm^4
Ροπή αντίστασης W_y :	27.25cm^3
Βάρος:	0.1519kN/m^2



Σχήμα 10-12. Πέτασμα χάλυβα – πολυουρεθάνης πάχους 100mm.

Αντοχή

Υπολογίζεται η πλαστική ροπή αντοχής με συντελεστή 0.90 και η αντοχή σε τέμνουσα σύμφωνα με όσα ορίζουν τα UFC 3-340-02.

Πλαστική ροπή αντοχής M_{pl} :	$0.90 \cdot W_y \cdot f_y = 0.90 \cdot 27.25 \cdot 10^{-6} \cdot 465.85 \cdot 10^3 = 11.42 \text{ kNm}$
β :	0.0062
h:	47.03mm
h/t:	$47.03/1.0 = 47 < 150$ αποφυγή καμπτικού λυγισμού
f_{dv} για τέμνουσα:	$1.54 \cdot 10^3 \cdot 68.94/10^3 / (h/t) =$ $1.54 \cdot 10^3 \cdot 68.94/10^3 / 47 = 225.74 \text{ MPa}$
f_{dv} για ταυτόχρονη τέμνουσα και κάμψη:	109.13MPa
Αντοχή τέμνουσας V_R σε απλή στήριξη:	$N \cdot h \cdot t \cdot f_{dv} = 12 \cdot 47.03 \cdot 1.0 \cdot 225.74/10^3 = 127.40 \text{ kN}$
Αντοχή τέμνουσας V_R σε στήριξη συνέχειας:	$N \cdot h \cdot t \cdot f_{dv} = 12 \cdot 47.03 \cdot 1.0 \cdot 109.13/10^3 = 61.59 \text{ kN}$

Φορτίο

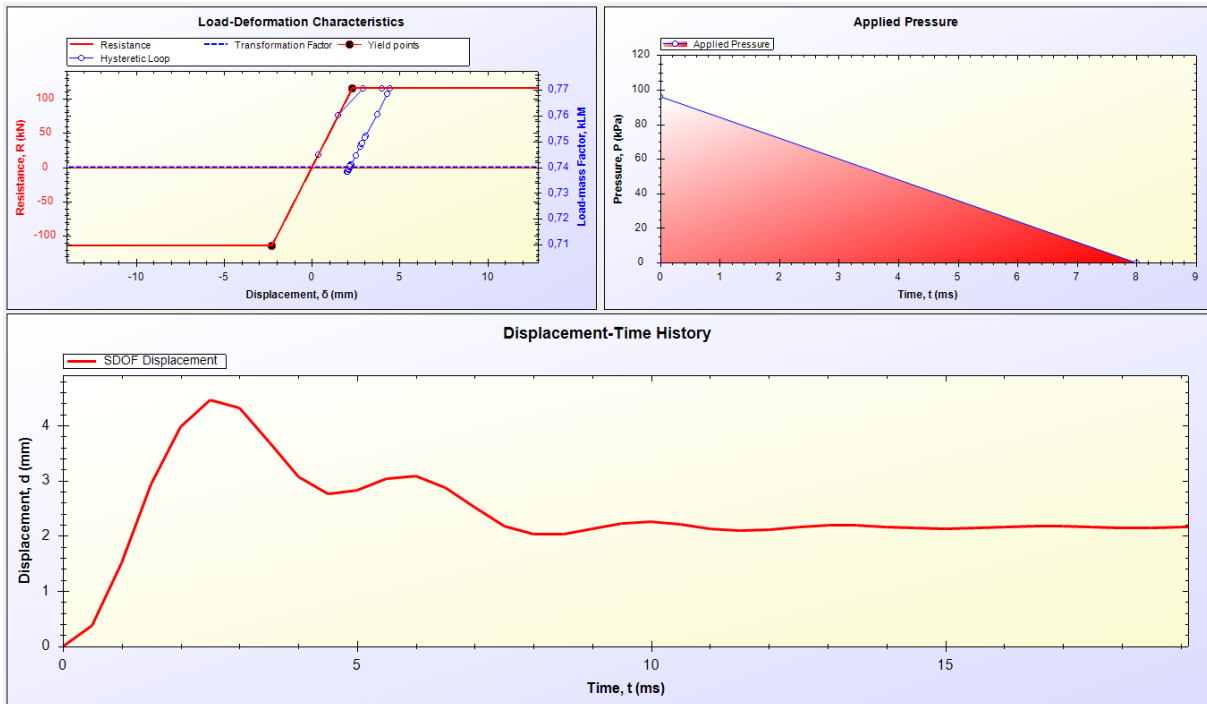
Ίδιο βάρος W:	0.1519kN/m ²
Έκρηξη:	96.00kN/m ²
	Τριγωνικό φορτίο για 8ms

Συνάρτηση αντίστασης, μάζα και απόσβεση

Η στήριξη των πετασμάτων πλαγιοκάλυψης είναι αρθρωτή στα άκρα τους και συνεχής στις ενδιάμεσες στηρίξεις. Έτσι, υπολογίζεται η συνάρτηση αντίστασης θεωρώντας ως στήριξη άρθρωση – πάκτωση επειδή είναι δυσμενέστερη της αμφίπακτης λειτουργίας. Η στήριξη άρθρωσης – πάκτωσης εμφανίζεται σε ακραίο φάτνωμα, δηλαδή ανάμεσα στην ακραία σύνδεση άρθρωσης και στη πρώτη εμφανιζόμενη στήριξη συνέχειας που χρησιμοποιείται ως πάκτωση. Οι υπολογισμοί γίνονται σύμφωνα με όσα ορίζουν τα UFC 3-340-02 για διατομές ψυχρής έλασης.

R_m από [Πίνακας 5-1]:	$\frac{4 \cdot (M_{ps} + 2 \cdot M_{pm})}{L} = \frac{4 \cdot (11.42 + 2 \cdot 11.42)}{1.20} = 114.24 \text{ kN}$
Παραμόρφωση διαρροής X_E :	$\frac{(\beta \cdot R_m \cdot L^3)}{E \cdot I_{yy}} = \frac{(0.0062 \cdot 114.24 \cdot 1.20^3)}{210 \cdot 10^6 \cdot 256.29 \cdot 10^{-8}} = 2.3 \text{ mm}$
Ισοδύναμη δυσκαμψία K_E :	$\frac{R_m}{X_E} = \frac{114.24}{0.0023} = 50236.94 \text{ kN/m}$
Μάζα M:	$W \cdot A = 0.1519 \cdot 1 \cdot 1.20 = 18.23 \text{ kg}$
K_{LM} :	0.74
Ίδιοπερίοδος T:	$2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{K_{LM} \cdot M}{K_E}} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{0.74 \cdot 18.23}{50236.94 \cdot 10^3}} \cdot 10^3 = 3.26 \text{ ms}$
Συντελεστής απόσβεσης ζ :	3%
Απόσβεση C:	$2 \cdot \zeta \cdot M \cdot \omega = 2 \cdot 0.03 \cdot 18.23 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3.26 \cdot 10^{-3}} = 2110.65 \text{ Ns/m}$
Αρχική παραμόρφωση:	0mm

Αποτελέσματα επίλυσης



Σχήμα 10-13. Αποτελέσματα απόκρισης μονοβάθμιου ταλαντωτή πλαγιοκάλυψης στο λογισμικό RCBlasT.

Απόκριση

Μέγιστη μετακίνηση y_m :

4.46mm

θ :

$$\arctan\left(\frac{y_m}{0.5 \cdot L}\right) = \frac{4.46 \cdot 10^{-3}}{0.5 \cdot 1.20} = 0.43^\circ < 3^\circ$$

μ :

$$\frac{y_m}{X_E} = \frac{4.46}{2.30} = 1.96 < 3$$

Αντιδράσεις στήριξης

Οι αντιδράσεις στήριξης μεταβάλλονται χρονικά και προκύπτουν μέσα από τον [Πίνακας 5-1]:

Χρόνος (ms)	0	8	13	17	22	26
Αντίδραση στήριξης άρθρωσης (kN)	0.00	42.91	14.73	16.80	-1.98	0.00
Αντίδραση στήριξης πάκτωσης (kN)	0.00	61.19	19.52	24.22	-3.03	0.00

Οι αντιδράσεις είναι χαμηλότερου μεγέθους από την αντοχή σε τέμνουσα.

10.4.3 Τεγίδες

Υλικό

Ποιότητα:	S275
DIF:	1.29
SIF:	1.10
Αντοχή διαρροής f_y :	275MPa
Δυναμική αντοχή διαρροής $f_{y,dyn}$:	$1.29 \cdot 1.10 \cdot 275 = 390.23\text{MPa}$
Μέτρο ελαστικότητας:	210GPa

Επιτρεπόμενες παραμορφώσεις

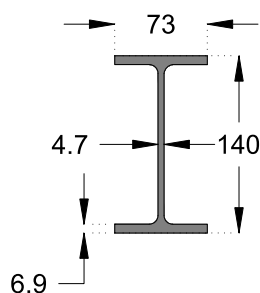
Medium level of protection:	$\theta = 3^\circ, \mu = 3$
Low level of protection:	$\theta = 12^\circ, \mu = 10$

Γεωμετρία

Μέγιστο μήκος:	4.30m
Πλάτος επιρροής:	1.74m

Διατομή

Κατηγορία:	IPE140
Ροπή αδράνειας I_{yy} :	541.20cm^4
Ροπή αντίστασης W_{ply} :	88.34cm^3
Εμβαδόν A:	16.43cm^2
Επιφάνεια διάτμησης A_v :	7.64cm^2
Βάρος:	0.129kN/m
Ύψος h:	140mm
Πλάτος b:	73mm
Πάχος κορμού t_w :	4.7mm
Πάχος πέλματος t_f :	6.9mm
Ακτίνα r:	7mm



Σχήμα 10-14. Διατομή IPE140.

Αντοχή

Υπολογίζεται η πλαστική ροπή αντοχής με συντελεστή 1.00 και η αντοχή σε τέμνουσα με συντελεστή 0.55 σύμφωνα με όσα ορίζουν τα UFC 3-340-02.

Πλαστική ροπή αντοχής M_{pl} :	$1.00 \cdot W_{ply} \cdot f_{y,dyn} = 1.00 \cdot 88.34 \cdot 10^{-6} \cdot 390.23 \cdot 10^3 = 34.47 \text{ kNm}$
Αντοχή σε τέμνουσα V_{pl} :	$0.55 \cdot A_v \cdot f_{y,dyn} = 0.55 \cdot 7.64 \cdot 10^{-4} \cdot 390.23 \cdot 10^3 = 164.11 \text{ kN}$
Κατηγορία διατομής:	1

Φορτίο

Ίδιο βάρος W :	0.129 kN/m (IPE140)
	0.1228 kN/m ² (Επικάλυψη)
	0.129/1.74 + 0.1228 = 0.1965 kN/m ² (Συνολικό βάρος)
Φόρτιση:	Δυναμικές αντιδράσεις επικάλυψης + Ίδιο βάρος

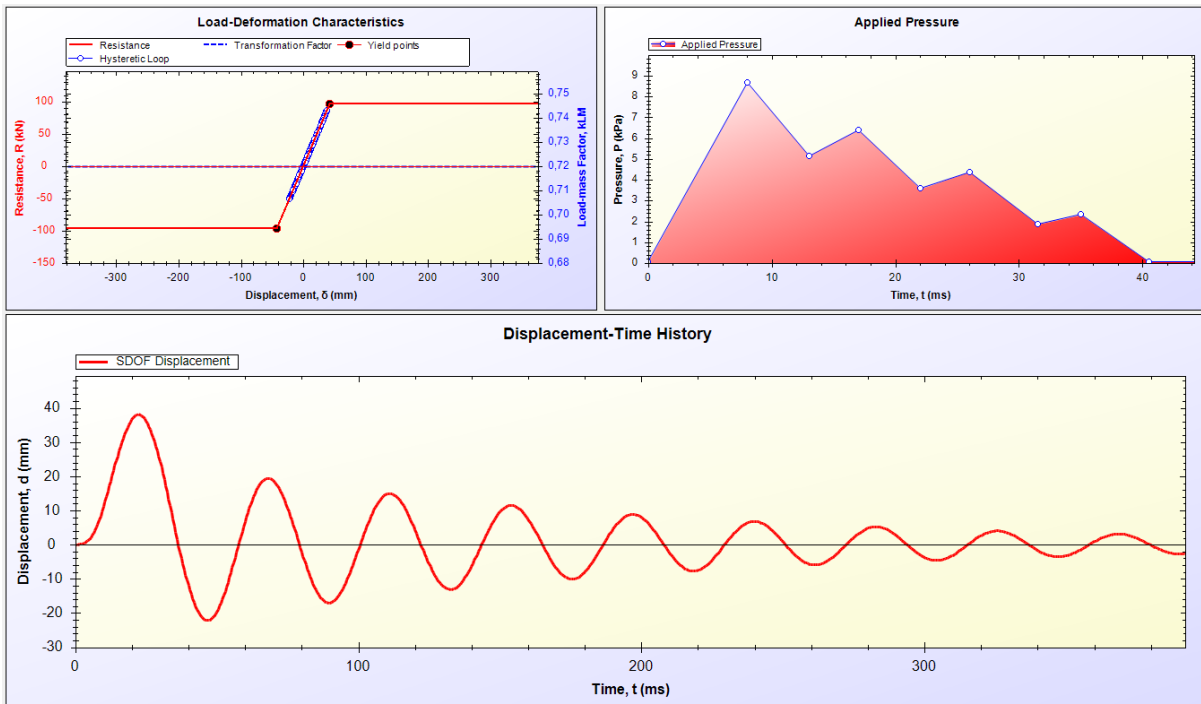
Συνάρτηση αντίστασης, μάζα και απόσβεση

Η στήριξη των τεγίδων είναι αρθρωτή στα άκρα τους και συνεχής στις ενδιάμεσες στηρίξεις. Έτσι, υπολογίζεται η συνάρτηση αντίστασης θεωρώντας ως στήριξη άρθρωση – πάκτωση επειδή είναι δυσμενέστερη της αμφίπακτης λειτουργίας. Η στήριξη άρθρωσης – πάκτωσης εμφανίζεται σε ακραίο φάτνωμα, δηλαδή ανάμεσα στην ακραία σύνδεση άρθρωσης και στη πρώτη εμφανιζόμενη στήριξη συνέχειας που χρησιμοποιείται ως πάκτωση. Επιπλέον, οι τεγίδες θεωρούνται εξασφαλισμένες έναντι στρεπτοκαμπτικού λυγισμού λόγω των πετασμάτων της επικάλυψης που συνδέονται στο θλιβόμενο πέλμα.

R_m από [Πίνακας 5-1]:	$\frac{4 \cdot (M_{ps} + 2 \cdot M_{pm})}{L} = \frac{4 \cdot (34.47 + 2 \cdot 34.47)}{4.30} = 96.20 \text{ kN}$
Ισοδύναμη δυσκαμψία K_E από [Πίνακας 5-1]:	$\frac{160 \cdot E \cdot I_{yy}}{L^3} = \frac{160 \cdot 210 \cdot 10^6 \cdot 541.20 \cdot 10^{-8}}{4.30^3} = 2287.13 \text{ kN/m}$
Παραμόρφωση διαρροής χ_E :	$\frac{R_m}{K_E} = \frac{96.20}{2287.13} \cdot 10^3 = 42.06 \text{ mm}$
Μάζα M :	$W \cdot A = 0.1965 \cdot 100 \cdot 1.75 \cdot 4.30 = 147.88 \text{ kg}$
K_{LM} από [Πίνακας 5-1]:	$\frac{0.78 + 0.78}{2} + 0.66 = 0.72$
Ιδιοπερίοδος T :	$2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{K_{LM} \cdot M}{K_E}} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{0.72 \cdot 147.88}{2287.13 \cdot 10^3}} \cdot 10^3 = 42.87 \text{ ms}$
Συντελεστής απόσβεσης ζ :	3%
Απόσβεση C :	$2 \cdot \zeta \cdot M \cdot \omega = 2 \cdot 0.03 \cdot 147.88 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{42.87 \cdot 10^{-3}} = 1300.41 \text{ Ns/m}$
Αρχική παραμόρφωση:	$\frac{W}{K_E} = \frac{0.1965 \cdot 1.74 \cdot 4.30}{2287.13} \cdot 10^3 = 0.65 \text{ mm}$

Αποτελέσματα επίλυσης

Φόρτιση (Αντίδραση = (Αντίδραση πάκτωσης επικάλυψης)X(2 Εκατέρωθεν)/1.74m))



Σχήμα 10-15. Αποτελέσματα απόκρισης μονοβάθμιου ταλαντωτή τεγίδας στο λογισμικό RCblast.

Απόκριση

Μέγιστη μετακίνηση y_m :

38.07mm

θ :

$$\arctan\left(\frac{2 \cdot y_m}{0.5 \cdot L}\right) = \frac{2 \cdot 38.07 \cdot 10^{-3}}{0.5 \cdot 4.30} = 2.03^\circ < 3^\circ$$

μ :

$$\frac{y_m}{X_E} = \frac{38.07}{42.06} = 0.91 < 3$$

Αντιδράσεις στήριξης

Οι αντιδράσεις στήριξης μεταβάλλονται χρονικά και προκύπτουν μέσα από τον [Πίνακας 5-1] κατά τη δεύτερη φόρτιση:

Χρόνος (ms)	0	23	46	68	89	111	133	154	175	197	219	240
Αντίδραση στήριξης άρθρωσης (kN)	0.34	29.67	-15.17	13.60	-11.71	10.54	-9.06	8.10	-6.88	6.44	-5.12	0.34
Αντίδραση στήριξης πάκτωσης (kN)	0.57	47.46	-22.38	20.28	-17.25	15.74	-13.33	12.12	-10.10	9.66	-7.48	0.57

Οι αντιδράσεις είναι χαμηλότερου μεγέθους από την αντοχή σε τέμνουσα η οποία είναι 164.11kN και ορθώς δεν έγινε απομείωση της πλαστικής ροπής αντοχής λόγω τέμνουσας, αφού $V_{Ed}/V_{pl} < 0.5$.

10.4.4 Μηκίδες

Υλικό

Ποιότητα:	S275
DIF:	1.29
SIF:	1.10
Αντοχή διαρροής f_y :	275MPa
Δυναμική αντοχή διαρροής $f_{y,dyn}$:	$1.29 \cdot 1.10 \cdot 275 = 390.23 \text{MPa}$
Μέτρο ελαστικότητας:	210GPa

Επιτρεπόμενες παραμορφώσεις

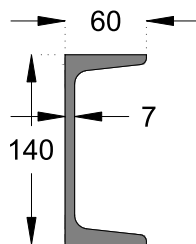
Medium level of protection:	$\theta = 4^\circ$
Low level of protection:	$\theta = 12^\circ$

Γεωμετρία

Μέγιστο μήκος:	4.30m
Πλάτος επιρροής:	1.20m

Διατομή

Κατηγορία:	UPN140
Ροπή αδράνειας I_{yy} :	605.00cm^4
Ροπή αντίστασης W_{ply} :	103.00cm^3
Εμβαδόν A:	20.40cm^2
Επιφάνεια διάτμησης A_v :	10.10cm^2
Βάρος:	0.16kN/m
Ύψος h:	140mm
Πλάτος b:	60mm
Πάχος κορμού t_w :	7mm
Πάχος πέλματος t_f :	10mm
Ακτίνα r:	10mm



Σχήμα 10-16. Διατομή UPN140.

Αντοχή

Υπολογίζεται η πλαστική ροπή αντοχής με συντελεστή 1.00 και η αντοχή σε τέμνουσα με συντελεστή 0.55 σύμφωνα με όσα ορίζουν τα UFC 3-340-02.

Πλαστική ροπή αντοχής M_{pl} :	$1.00 \cdot W_{ply} \cdot f_{y,dyn} = 1.00 \cdot 103.00 \cdot 10^{-6} \cdot 390.23 \cdot 10^3 = 40.19 \text{ kNm}$
Αντοχή σε τέμνουσα V_{pl} :	$0.55 \cdot A_V \cdot f_{y,dyn} = 0.55 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10^{-4} \cdot 390.23 \cdot 10^3 = 216.77 \text{ kN}$
Κατηγορία διατομής:	1

Φορτίο

Ίδιο βάρος W :	0.16 kN/m (UPN140)
	0.1519 kN/m ² (Πλαγιοκάλυψη)
	$0.16/1.20 + 0.1519 = 0.2852 \text{ kN/m}^2$ (Συνολικό βάρος)
Φόρτιση:	Δυναμικές αντιδράσεις πλαγιοκάλυψης

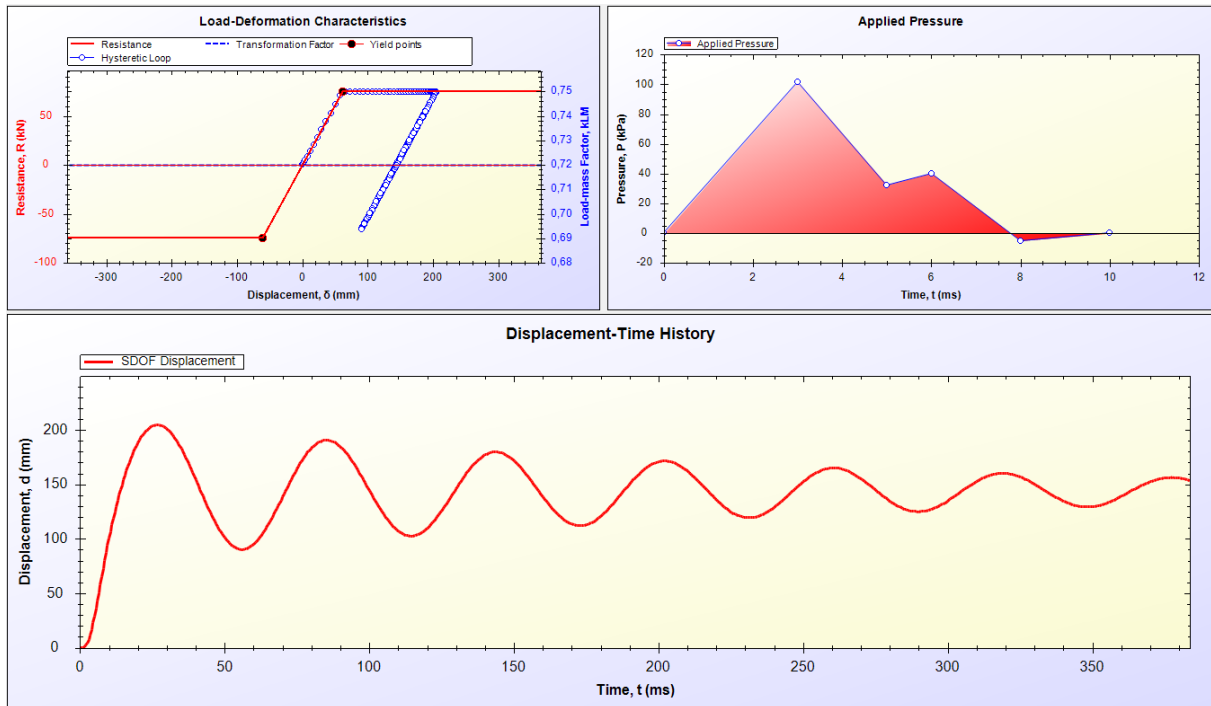
Συνάρτηση αντίστασης, μάζα και απόσβεση

Η στήριξη των μηκίδων είναι αρθρωτή στα άκρα τους. Έτσι, υπολογίζεται η συνάρτηση αντίστασης θεωρώντας ως στήριξη άρθρωση – άρθρωση. Επιπλέον, οι μηκίδες θεωρούνται εξασφαλισμένες έναντι στρεπτοκαμπτικού λυγισμού λόγω των πετασμάτων της πλαγιοκάλυψης που συνδέονται στο θλιβόμενο πέλμα.

R_m από [Πίνακας 5-1]:	$\frac{8 \cdot M_{pl}}{L} = \frac{4 \cdot 40.19}{4.30} = 74.78 \text{ kN}$
Ισοδύναμη δυσκαμψία K_E από [Πίνακας 5-1]:	$\frac{384 \cdot E \cdot I_{yy}}{5 \cdot L^3} = \frac{384 \cdot 210 \cdot 10^6 \cdot 605.00 \cdot 10^{-8}}{5 \cdot 4.30^3} = 1227.24 \text{ kN/m}$
Παραμόρφωση διαρροής X_E :	$\frac{R_m}{K_E} = \frac{74.78}{1227.24} \cdot 10^3 = 60.93 \text{ mm}$
Μάζα M :	$W \cdot A = 0.2852 \cdot 100 \cdot 1.20 \cdot 4.30 = 147.18 \text{ kg}$
K_{LM} από [Πίνακας 5-1]:	$\frac{0.78 + 0.66}{2} = 0.72$
Ιδιοπερίοδος T :	$2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{K_{LM} \cdot M}{K_E}} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{0.72 \cdot 147.18}{1227.24 \cdot 10^3}} \cdot 10^3 = 58.39 \text{ ms}$
Συντελεστής απόσβεσης ζ :	3%
Απόσβεση C :	$2 \cdot \zeta \cdot M \cdot \omega = 2 \cdot 0.03 \cdot 147.18 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{58.39 \cdot 10^{-3}} = 950.33 \text{ Ns/m}$
Αρχική παραμόρφωση:	0mm

Αποτελέσματα επίλυσης

Φόρτιση (Αντίδραση = (Αντίδραση πάκτωσης πλαγιοκάλυψης)Χ(2 Εκατέρωθεν)/1.20m))



Σχήμα 10-17. Αποτελέσματα απόκρισης μονοβάθμιου ταλαντωτή μηκίδας στο λογισμικό RCblast.

Απόκριση

Μέγιστη μετακίνηση y_m : 204.65mm

$$\theta: \arctan\left(\frac{y_m}{0.5 \cdot L}\right) = \frac{204.65 \cdot 10^{-3}}{0.5 \cdot 4.30} = 5.44^\circ < 12^\circ$$

Αντιδράσεις στήριξης

Οι αντιδράσεις στήριξης μεταβάλλονται χρονικά και προκύπτουν μέσα από τον [Πίνακας 5-1] κατά τη δεύτερη φόρτιση:

Χρόνος (ms)	0	27	56	84	115	145	173	203	233	262	290	320	348	378	400
Αντίδραση στήριξης άρθρωσης (kN)	0.00	28.42	-24.70	21.66	-19.00	16.72	-14.82	13.30	-11.40	10.26	-8.74	6.08	-6.46	5.70	0.00

Οι αντιδράσεις είναι χαμηλότερου μεγέθους από την αντοχή σε τέμνουσα.

10.4.5 Υποσύλωμα πλαισίου

Υλικό

Ποιότητα:	S275
DIF:	1.29
SIF:	1.10
Αντοχή διαρροής f_y :	275MPa
Δυναμική αντοχή διαρροής $f_{y,dyn}$:	$1.29 \cdot 1.10 \cdot 275 = 390.23\text{MPa}$
Μέτρο ελαστικότητας:	210GPa

Επιτρεπόμενες παραμορφώσεις

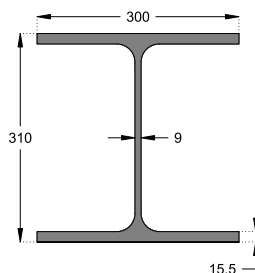
Medium level of protection:	$\mu=1$
Low level of protection:	$\theta=3^\circ \mid \mu=3$

Γεωμετρία

Μήκος άνω:	4.06m
Μήκος κάτω:	3.30m
Πλάτος επιρροής:	4.30m

Διατομή

Κατηγορία:	HEA320
Ροπή αδράνειας I_{yy} :	22930.00cm ⁴
Ροπή αντίστασης W_{ply} :	1628.00cm ³
Εμβαδόν A:	124.40cm ²
Επιφάνεια διάτμησης A_v :	41.17cm ²
Βάρος:	0.976kN/m
Ύψος h:	310mm
Πλάτος b:	300mm
Πάχος κορμού t_w :	9mm
Πάχος πέλματος t_f :	15.5mm
Ακτίνα r:	27mm



Σχήμα 10-18. Διατομή HEA320.

Αντοχή

Υπολογίζεται η πλαστική ροπή αντοχής με συντελεστή 1.00 και η αντοχή σε τέμνουσα με συντελεστή 0.55 σύμφωνα με όσα ορίζουν τα UFC 3-340-02.

Πλαστική ροπή αντοχής M_{pl} :	$1.00 \cdot W_{ply} \cdot f_{y,dyn} = 1.00 \cdot 1628.00 \cdot 10^{-6} \cdot 390.23 \cdot 10^3 = 635.29 \text{ kNm}$
	Η απομείωση λόγω αξονικού φορτίου αμελείται λόγω του κανόνα $N_{Ed} \leq 0.25 \cdot N_{pl,Rd}$
Αντοχή σε τέμνουσα V_{pl} :	$0.55 \cdot A_v \cdot f_{y,dyn} = 0.55 \cdot 41.17 \cdot 10^{-4} \cdot 390.23 \cdot 10^3 = 883.50 \text{ kN}$
Κατηγορία διατομής:	1

Φορτίο

Ίδιο βάρος W :	0.976 kN/m (HEA320)
	0.1519 kN/m ² (Πλαγιοκάλυψη)
	0.16 kN/m (Μηκίδα)
	$(0.976 \cdot 4.06 + 0.1519 \cdot 4.06 \cdot 4.30 + 0.16 \cdot 4.30 \cdot 3) / (4.06 \cdot 4.30) =$
	0.497 kN/m ² (Συνολικό βάρος)
Φόρτιση:	Δυναμικές αντιδράσεις μηκίδων

Συνάρτηση αντίστασης, μάζα και απόσβεση

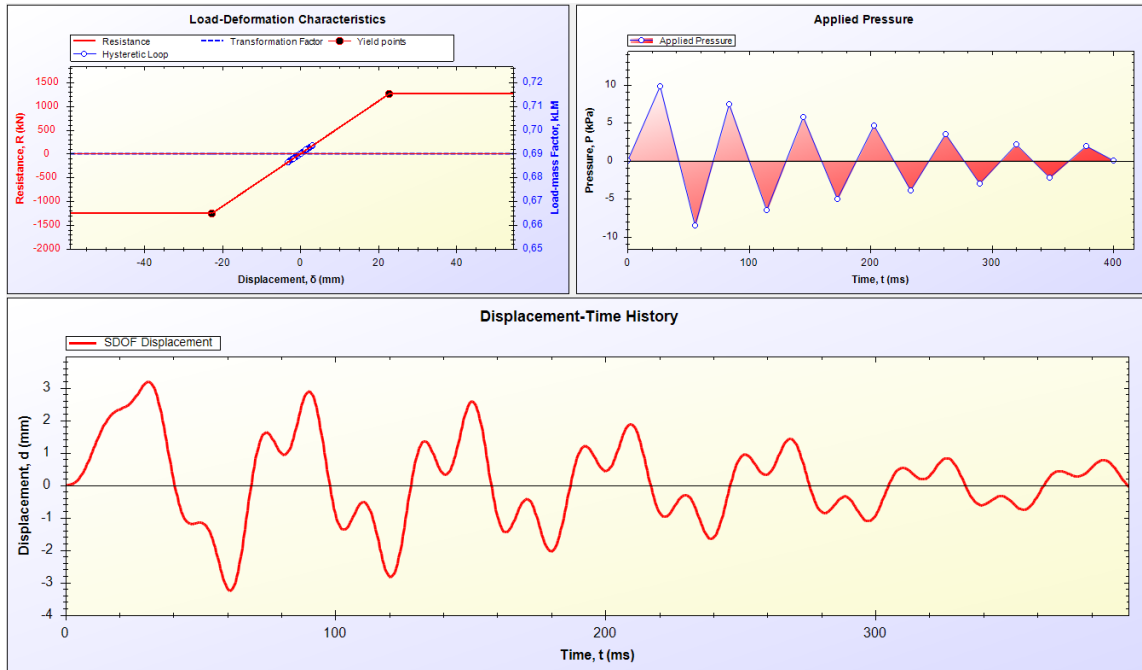
Η στήριξη των υποστυλωμάτων θεωρείται αμφιαρθρωτή αφού η δοκός λόγω του μεγάλου μήκους της δεν έχει αρκετή δυσκαμψία ώστε να θεωρηθεί πάκτωση και αφού η έδραση του υποστυλώματος είναι αρθρωτή. Δεν γίνεται ανάλυση του πλαισίου ως Multi degree of freedom (MDOF) ανάλυση αφού τέτοια ανάλυση και, μάλιστα, μεγαλύτερης ακρίβειας γίνεται σε επόμενη παράγραφο. Έτσι, υπολογίζεται η συνάρτηση αντίστασης θεωρώντας ως στήριξη άρθρωση – άρθρωση. Επιπλέον, οι αντιδράσεις στήριξης των μηκίδων θεωρείται ότι ισοκατανέμονται και ότι, άρα, υπάρχει ομοιόμορφο φορτίο.

R_m από [Πίνακας 5-1]:	$\frac{8 \cdot M_{pm}}{L} = \frac{8 \cdot 635.29}{4.06} = 1251.80 \text{ kN}$
Ισοδύναμη δυσκαμψία K_E από [Πίνακας 5-1]:	$\frac{384 \cdot E \cdot I_{yy}}{5 \cdot L^3} = \frac{384 \cdot 210 \cdot 10^6 \cdot 22930.00 \cdot 10^{-8}}{5 \cdot 4.06^3} = 55259.44 \text{ kN/m}$
Παραμόρφωση διαρροής χ_E :	$\frac{R_m}{K_E} = \frac{1251.80}{55259.44} \cdot 10^3 = 22.65 \text{ mm}$
Μάζα M :	$W \cdot A = 0.497 \cdot 100 \cdot 4.06 \cdot 4.30 = 876.84 \text{ kg}$
K_{LM} από [Πίνακας 5-1]:	$\frac{0.78 + 0.66}{2} + 0.66 = 0.69$
Ίδιοπερίοδος T :	$2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{K_{LM} \cdot M}{K_E}} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{0.69 \cdot 876.84}{55259.44 \cdot 10^3}} \cdot 10^3 = 20.68 \text{ ms}$
Συντελεστής απόσβεσης ζ :	3%
Απόσβεση C :	$2 \cdot \zeta \cdot M \cdot \omega = 2 \cdot 0.03 \cdot 876.84 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{20.68 \cdot 10^{-3}} = 15817.96 \text{ Ns/m}$

Αρχική παραμόρφωση: 0mm

Αποτελέσματα επίλυσης

Φόρτιση (Αντίδραση = (Αντίδραση άρθρωσης μηκίδας)Χ(2 Εκατέρωθεν)Χ(3 Μηκίδες)/(4.06mΧ4.30m)), θεωρείται ως ομοιόμορφο φορτίο



Σχήμα 10-19. Αποτελέσματα απόκρισης μονοβάθμιου ταλαντωτή στύλου στο λογισμικό RCblast.

Απόκριση

Μέγιστη μετακίνηση y_m : 3.18mm

θ :
$$\arctan\left(\frac{2 \cdot y_m}{0.5 \cdot L}\right) = \frac{2 \cdot 3.18 \cdot 10^{-3}}{0.5 \cdot 4.06} = 0.18^\circ$$

μ :
$$\frac{y_m}{X_E} = \frac{3.18}{22.65} = 0.14 < 1$$

Οι αντιδράσεις στήριξης (μέγιστη 112.66kN στον στύλο κάτω) είναι χαμηλότερου μεγέθους από την αντοχή σε τέμνουσα η οποία είναι 883.50kN και ορθώς δεν έγινε απομείωση της πλαστικής ροπής αντοχής λόγω τέμνουσας, αφού $V_{Ed}/V_{pl} < 0.5$.

10.4.6 Δοκός πλαισίου

Υλικό

Ποιότητα:	S275
DIF:	1.29
SIF:	1.10
Αντοχή διαρροής f_y :	275MPa
Δυναμική αντοχή διαρροής $f_{y,dyn}$:	$1.29 \cdot 1.10 \cdot 275 = 390.23\text{MPa}$
Μέτρο ελαστικότητας:	210GPa

Επιτρεπόμενες παραμορφώσεις

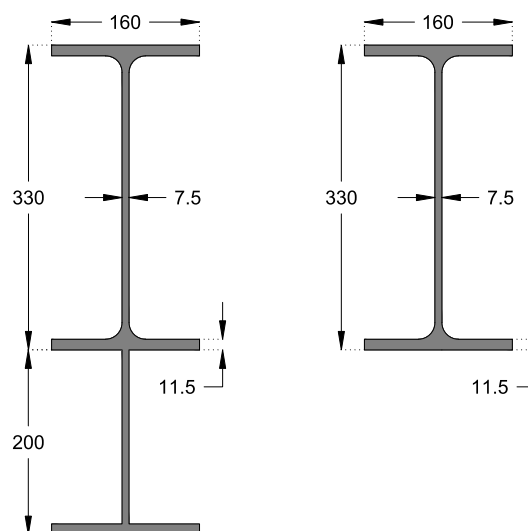
Medium level of protection:	$\mu=1$
Low level of protection:	$\theta=3^\circ \mid \mu=3$

Γεωμετρία

Μήκος:	8.00m (αφαιρώντας τα haunches)
Πλάτος επιρροής:	4.30m

Διατομή

Κατηγορία:	IPE330
Ροπή αδράνειας I_{yy} :	33440.00cm ⁴ (με ενίσχυση) 11770.00cm ⁴ (χωρίς ενίσχυση)
Ροπή αντίστασης W_{ply} :	628.40cm ³ (χωρίς ενίσχυση)
Εμβαδόν A:	53.81cm ²
Επιφάνεια διάτμησης A_v :	25.67cm ²
Βάρος:	0.725kN/m



Σχήμα 10-20. Διατομή IPE330 με ενίσχυση.

Αντοχή

Υπολογίζεται η πλαστική ροπή αντοχής με συντελεστή 1.00 και η αντοχή σε τέμνουσα με συντελεστή 0.55 σύμφωνα με όσα ορίζουν τα UFC 3-340-02.

$$\text{Πλαστική ροπή αντοχής } M_{pl}: \quad 1.00 \cdot W_{ply} \cdot f_{y,dyn} = 1.00 \cdot 628.40 \cdot 10^{-6} \cdot 390.23 \cdot 10^3 = 245.22 \text{ kNm}$$

$$\text{Αντοχή σε τέμνουσα } V_{pl}: \quad 0.55 \cdot A_V \cdot f_{y,dyn} = 0.55 \cdot 25.67 \cdot 10^{-4} \cdot 390.23 \cdot 10^3 = 551.15 \text{ kN}$$

$$\text{Κατηγορία διατομής:} \quad 1 \text{ (σε κάμψη)}$$

Φορτίο

$$\begin{aligned} \text{Ίδιο βάρος } W: & \quad 0.725 \text{ kN/m (Δοκός)} \\ & \quad 0.1228 \text{ kN/m}^2 \text{ (Επικάλυψη)} \\ & \quad 0.129 \text{ kN/m (Τεγίδα)} \\ & \quad 0.087 \text{ kN/m (Χιαστί)} \\ & \quad (0.725 \cdot 11.00 + 0.1228 \cdot 5.50 \cdot 4.30 \cdot 2 + 0.129 \cdot 4.30 \cdot 8 + 0.087 \cdot 4 \cdot 7) / \\ & \quad / (8 \cdot 4.30) = 0.54 \text{ kN/m}^2 \text{ (Συνολικό βάρος)} \end{aligned}$$

$$\text{Φόρτιση:} \quad \text{Δυναμικές αντιδράσεις τεγίδων} + \text{Ίδιο βάρος}$$

Συνάρτηση αντίστασης, μάζα και απόσβεση

Η στήριξη των δοκών θεωρείται πάκτωση στα άκρα τους δεδομένου ότι ανήκουν σε πλαίσιο. Δεν γίνεται ανάλυση του πλαισίου ως Multi degree of freedom (MDOF) ανάλυση αφού τέτοια ανάλυση και, μάλιστα, μεγαλύτερης ακρίβειας γίνεται σε επόμενη παράγραφο. Έτσι, υπολογίζεται η συνάρτηση αντίστασης θεωρώντας ως στήριξη πάκτωση – πάκτωση. Οι ενισχύσεις δεν βρίσκονται σε όλο το μήκος των δοκών αλλά στη σύνδεση με τα υποστυλώματα καθώς και στον κορφιά. Θεωρείται ότι οι πλαστικές αρθρώσεις θα συμβούν σε σημείο χωρίς ενίσχυση ενώ η δυσκαμψία θα υπολογιστεί για τη διατομή χωρίς ενισχύσεις. Επιπλέον, θεωρείται ότι λόγω των πολλών σημειακών φορτίων από τις τεγίδες ότι υπάρχει ομοιόμορφο φορτίο.

$$R_m \text{ από [Πίνακας 5-1]:} \quad \frac{8 \cdot (M_{ps} + M_{pm})}{L} = \frac{8 \cdot (245.22 + 245.22)}{8.00} = 490.43 \text{ kN}$$

$$\text{Ισοδύναμη δυσκαμψία } K_E \text{ από [Πίνακας 5-1]:} \quad \frac{307 \cdot E \cdot I_{yy}}{L^3} = \frac{307 \cdot 210 \cdot 10^6 \cdot 11770.00 \cdot 10^{-8}}{8.00^3} = 14820.54 \text{ kN/m}$$

$$\text{Παραμόρφωση διαρροής } \chi_E: \quad \frac{R_m}{K_E} = \frac{490.43}{14820.54} \cdot 10^3 = 62.56 \text{ mm}$$

$$\text{Μάζα } M: \quad W \cdot A = 0.54 \cdot 100 \cdot 8.00 \cdot 4.30 = 1848.20 \text{ kg}$$

$$K_{LM} \text{ από [Πίνακας 5-1]:} \quad \frac{\frac{0.77 + 0.78}{2} + 0.66}{2} = 0.72$$

$$\text{Ίδιοπερίοδος } T: \quad 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{K_{LM} \cdot M}{K_E}} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{0.72 \cdot 1848.20}{14820.54 \cdot 10^3}} \cdot 10^3 = 59.43 \text{ ms}$$

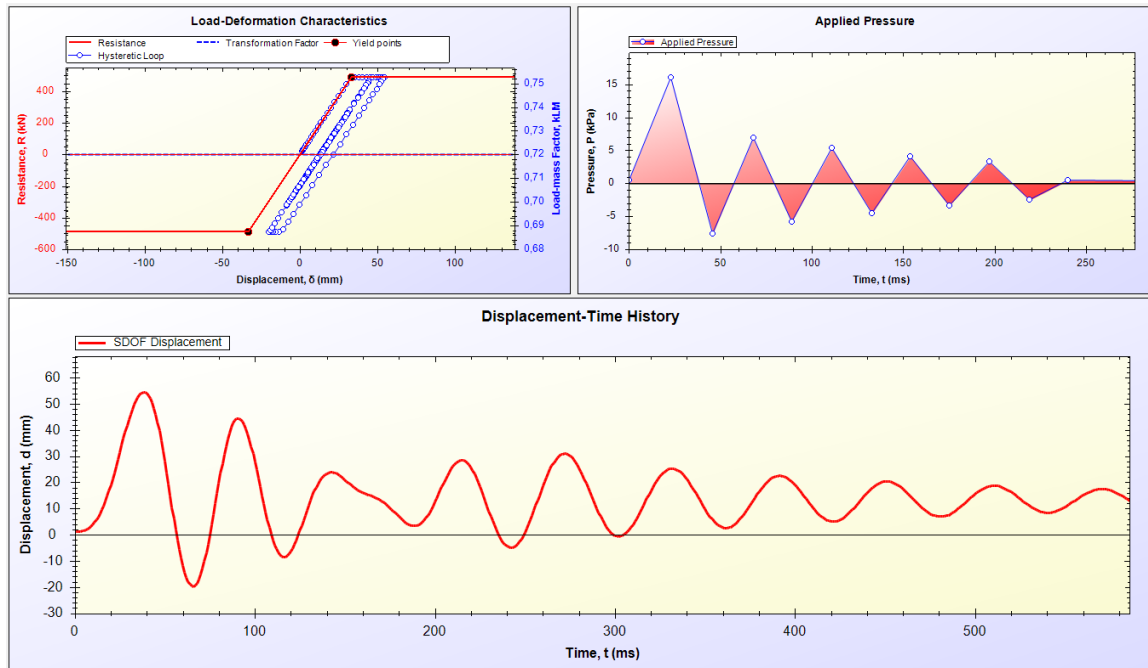
$$\text{Συντελεστής απόσβεσης } \zeta: \quad 3\%$$

$$\text{Απόσβεση } C: \quad 2 \cdot \zeta \cdot M \cdot \omega = 2 \cdot 0.03 \cdot 1848.20 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{59.43 \cdot 10^{-3}} = 11723.23 \text{ Ns/m}$$

Αρχική παραμόρφωση:
$$\frac{W}{K_E} = \frac{0.54 \cdot 8.00 \cdot 4.30}{14820.54} \cdot 10^3 = 1.25 \text{ mm}$$

Αποτελέσματα επίλυσης

Φόρτιση (Ανω - Αντίδραση = (Αντίδραση πάκτωσης τεγίδας)Χ(2 Εκατέρωθεν)Χ(8 Τεγίδες)/(8.00mΧ4.30m))



Σχήμα 10-21. Αποτελέσματα απόκρισης μονοβάθμιας ταλαντωτή δοκού πλαισίου στο λογισμικό RCBlast.

Απόκριση

Μέγιστη μετακίνηση y_m : 54.42mm

θ :
$$\arctan\left(\frac{y_m}{0.5 \cdot L}\right) = \frac{54.42 \cdot 10^{-3}}{0.5 \cdot 8.00} = 0.78^\circ$$

μ :
$$\frac{y_m}{X_E} = \frac{54.42}{33.09} = 1.64 < 3$$

Οι αντιδράσεις στήριξης (μέγιστη 248.12kN) είναι χαμηλότερου μεγέθους από την αντοχή σε τέμνουσα η οποία είναι 551.15kN και ορθώς δεν έγινε απομείωση της πλαστικής ροπής αντοχής λόγω τέμνουσας, αφού $V_{Ed}/V_{pl} < 0.5$.

10.4.7 Χιαστί οριζόντιος σύνδεσμος

Υλικό

Ποιότητα: S275

DIF: 1.29

SIF: 1.10

Αντοχή διαρροής f_y : 275MPa

Δυναμική αντοχή διαρροής $f_{y,dyn}$: $1.29 \cdot 1.10 \cdot 275 = 390.23 \text{ MPa}$

Μέτρο ελαστικότητας: 210GPa

Επιτρεπόμενες παραμορφώσεις

Medium level of protection: $\mu=1$

Low level of protection: $\mu=3$

Γεωμετρία

Μέγιστο μήκος: 7.00m

Διατομή

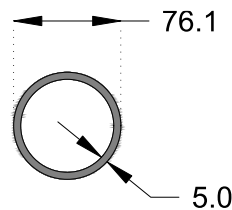
Κατηγορία: CHS76.1X5

Εμβαδόν A: 11.17cm²

Βάρος: 0.087kN/m

Εξωτερική διάμετρος: 76.1mm

Πάχος t: 5.0mm



Σχήμα 10-22. Διατομή CHS76.1X5.

Αντοχή

Πλαστική αξονική αντοχής N_{pl} : $A \cdot f_{y,dyn} = 11.17 \cdot 10^{-4} \cdot 390.23 \cdot 10^3 = 435.88 \text{ kNm}$

Κατηγορία διατομής: 1

Φορτίο

Ίδιο βάρος W: 0.087kN/m (CHS76.1X5)
 0.1228kN/m² (Επικάλυψη)
 0.129kN/m (Τεγίδες)
 $0.1228 \cdot 4.3 \cdot 5.5 \cdot 2 + 4 \cdot 4.3 \cdot 2 \cdot 0.129 + 4 \cdot 7 \cdot 0.087 = 12.68 \text{ kN}$
 (Συνολικό βάρος)

Έκρηξη: Δυναμικές αντιδράσεις μηκίδων (ανάγονται στη μισή επιφάνεια του στύλου άνω και θεωρούνται ότι παραλαμβάνονται από το ένα σκέλος του χιαστί συνδέσμου αφού το άλλο κινδυνεύει σε λυγισμό)

Συνάρτηση αντίστασης, μάζα και απόσβεση

Η στήριξη των οριζόντιων χιαστί συνδέσμων είναι αρθρωτή στα άκρα τους. Η μάζα που ενεργοποιείται θεωρείται ότι είναι για 4.3m/2 εκατέρωθεν του πλαισίου καθώς και η μισή μάζα που είχε προηγουμένως

υπολογιστεί στον στύλο άνω. Η αντίσταση και η στιβαρότητα ορίζονται μέσα από τη γωνία που σχηματίζει ο χιαστί σύνδεσμος.

R_m :

$$N_{pl} \cdot \cos\theta = 435.88 \cdot \cos 38^\circ = 343.48 \text{ kN}$$

Ισοδύναμη δυσκαμψία K_E :

$$\frac{E \cdot A}{L} \cdot (\cos\theta)^2 = \frac{210 \cdot 10^6 \cdot 11.17 \cdot 10^{-4}}{7} \cdot (\cos 38^\circ)^2 = 20808.40 \text{ kN/m}$$

Παραμόρφωση διαρροής χ_E :

$$\frac{R_m}{K_E} = \frac{343.48}{20808.40} \cdot 10^3 = 16.51 \text{ mm}$$

Μάζα M :

$$(12.68 \cdot 100 + 876.84/2) = 1702.13 \text{ kg}$$

K_{LM} από UFC 3-340-02:

1

Ιδιοπερίοδος T :

$$2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{K_{LM} \cdot M}{K_E}} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{1.00 \cdot 1702.13}{20808.40 \cdot 10^3}} \cdot 10^3 = 56.83 \text{ ms}$$

Συντελεστής απόσβεσης ζ :

3%

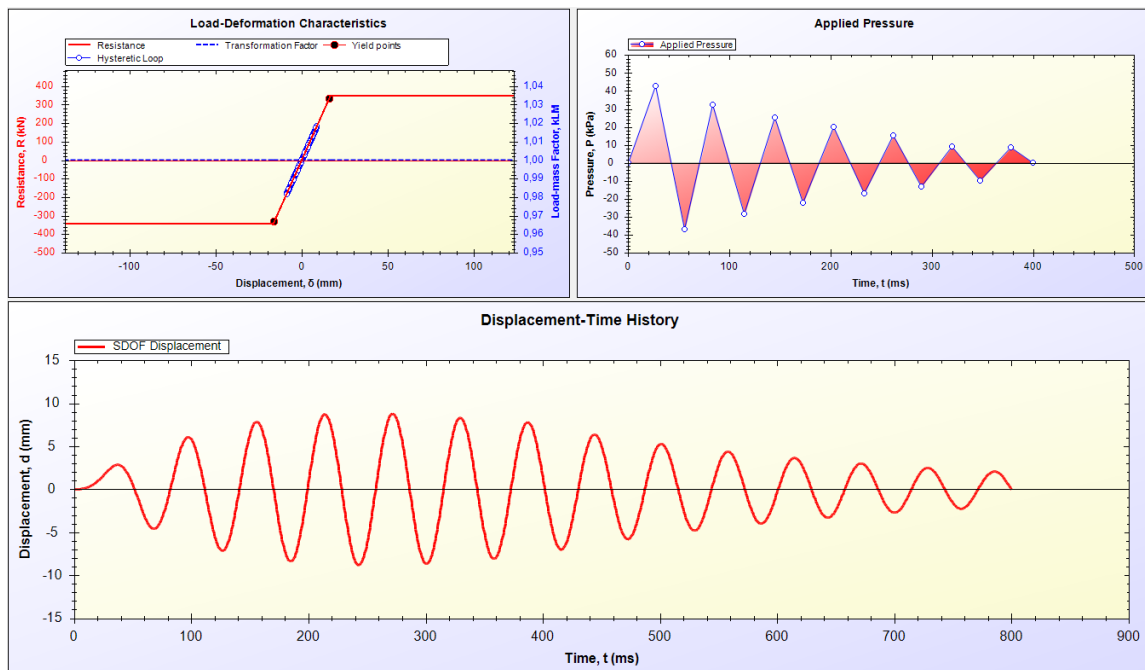
Απόσβεση C :

$$2 \cdot \zeta \cdot M \cdot \omega = 2 \cdot 0.03 \cdot 1702.13 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{56.83 \cdot 10^{-3}} = 11291.88 \text{ Ns/m}$$

Αρχική παραμόρφωση:

0mm

Αποτελέσματα επίλυσης



Σχήμα 10-23. Αποτελέσματα απόκρισης μονοβάθμιου ταλαντωτή οριζώντιου συνδέσμου στο λογισμικό RCBlasT.

Απόκριση

Μέγιστη μετακίνηση γ_m :

8.79mm

μ :

$$\frac{\gamma_m}{\chi_E} = \frac{8.79}{16.51} = 0.53 < 1$$

10.4.8 Χιαστί κατακόρυφος σύνδεσμος

Υλικό

Ποιότητα:	S275
DIF:	1.29
SIF:	1.10
Αντοχή διαρροής f_y :	275MPa
Δυναμική αντοχή διαρροής $f_{y,dyn}$:	$1.29 \cdot 1.10 \cdot 275 = 390.23\text{MPa}$
Μέτρο ελαστικότητας:	210GPa

Επιτρεπόμενες παραμορφώσεις

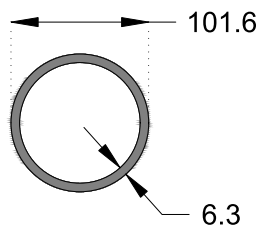
Medium level of protection:	$\mu=1$
Low level of protection:	$\mu=3$

Γεωμετρία

Μέγιστο μήκος:	7.40m
----------------	-------

Διατομή

Κατηγορία:	CHS101.6X6.3
Εμβαδόν A:	18.86cm^2
Βάρος:	0.087kN/m
Εξωτερική διάμετρος:	101mm
Πάχος t:	6.3mm



Σχήμα 10-24. Διατομή CHS101.6X6.3.

Αντοχή

Πλαστική αξονική αντοχής N_{pl} :	$A \cdot f_{y,dyn} = 18.86 \cdot 10^{-4} \cdot 390.23 \cdot 10^3 = 735.96\text{kNm}$
Κατηγορία διατομής:	1

Φορτίο

Ίδιο βάρος W:	0.087kN/m (CHS76.1X5)
	0.1228kN/m^2 (Επικάλυψη)
	0.129kN/m (Τεγίδες)

$$0.1228 \cdot 2 \cdot 5.5 \cdot 17.2 + 4 \cdot 17.2 \cdot 2 \cdot 0.129 + 4 \cdot 7 \cdot 4 \cdot 0.087 = 50.73 \text{ kN}$$

(Συνολικό βάρος)

Έκρηξη:

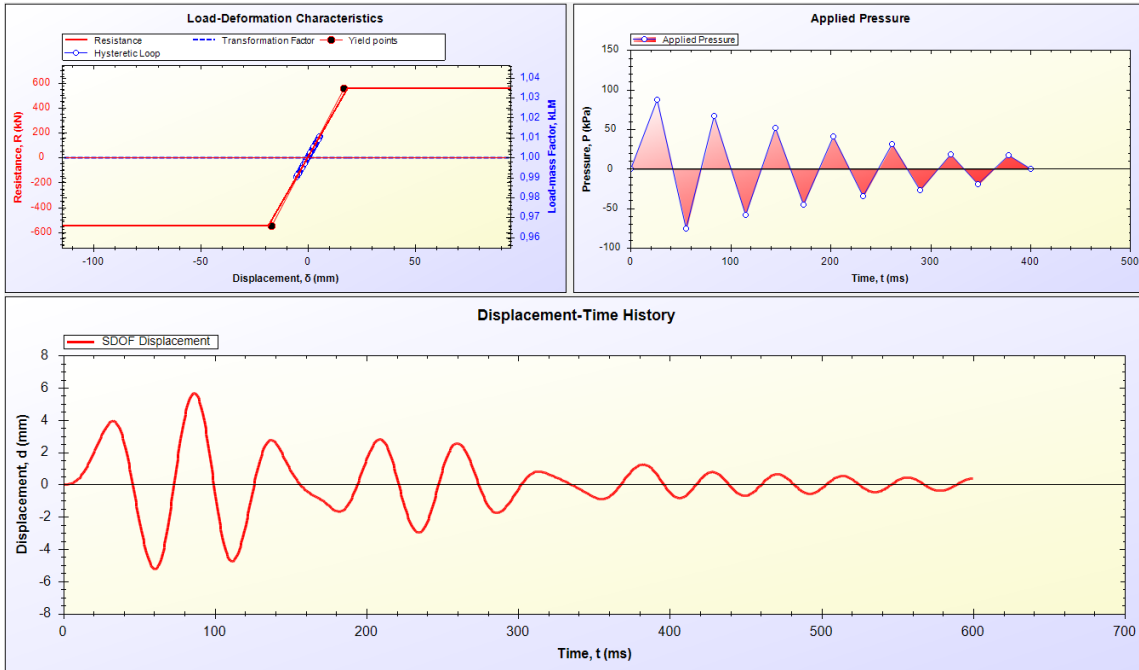
Δυναμικές αντιδράσεις μηκίδων (ανάγονται στη μισή επιφάνεια του στύλου άνω και θεωρούνται ότι παραλαμβάνονται από το ένα σκέλος του χιαστί συνδέσμου αφού το άλλο κινδυνεύει σε λυγισμό)

Συνάρτηση αντίστασης, μάζα και απόσβεση

Η στήριξη των κατακόρυφων χιαστί συνδέσμων είναι αρθρωτή στα άκρα τους. Η μάζα που ενεργοποιείται θεωρείται ότι είναι αυτή της οροφής εκατέρωθεν του πλαισίου καθώς και η μισή μάζα που είχε προηγουμένως υπολογιστεί στον στύλο άνω αλλά σε όλη την πλευρά. Η μάζα αυτή στη συνέχεια ανάγεται ανάλογα με τη στιβαρότητα που συγκεντρώνουν τα πλαίσια και οι χιαστί σύνδεσμοι. Θεωρείται για τον υπολογισμό της στιβαρότητας ότι στο ύψος της σύμμικτης πλάκας υπάρχουν πακτώσεις και ότι οι στύλοι είναι αμφίπακτοι. Η αντίσταση και η στιβαρότητα ορίζονται μέσα από τη γωνία που σχηματίζει ο χιαστί σύνδεσμος.

R_m :	$N_{pl} \cdot \cos\theta = 735.96 \cdot \cos 42^\circ = 550.27 \text{ kN}$
Ισοδύναμη δυσκαμψία K_E :	$\frac{E \cdot A}{L} \cdot (\cos\theta)^2 = \frac{210 \cdot 10^6 \cdot 18.86 \cdot 10^{-4}}{7.4} \cdot (\cos 42^\circ)^2 = 29920.12 \text{ kN/m}$
Δυσκαμψία πλαισίου:	$\frac{2 \cdot 12 \cdot E \cdot I}{L^3} = \frac{2 \cdot 12 \cdot 210 \cdot 10^6 \cdot 22930 \cdot 10^{-8}}{4.06^3} = 17268.57 \text{ kN/m}$
Κατανομή στους συνδέσμους:	$\frac{29920.12 \cdot 2}{29920.12 \cdot 4 + 17268.57 \cdot 5} = 0.41$
Παραμόρφωση διαρροής χ_E :	$\frac{R_m}{K_E} = \frac{550.27}{29920.12} \cdot 10^3 = 18.39 \text{ mm}$
Μάζα M :	$(50.73 \cdot 100 + 876.84 / 2 \cdot 4) / 2 \cdot 0.41 = 1393.53 \text{ kg}$
K_{LM} από UFC 3-340-02:	1
Ιδιοπερίοδος T :	$2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{K_{LM} \cdot M}{K_E}} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{1.00 \cdot 1393.53}{29920.12 \cdot 10^3}} \cdot 10^3 = 42.88 \text{ ms}$
Συντελεστής απόσβεσης ζ :	3%
Απόσβεση C :	$2 \cdot \zeta \cdot M \cdot \omega = 2 \cdot 0.03 \cdot 1393.53 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{42.88 \cdot 10^{-3}} = 12251.57 \text{ Ns/m}$
Αρχική παραμόρφωση:	0mm

Αποτελέσματα επίλυσης



Σχήμα 10-25. Αποτελέσματα απόκρισης μονοβάθμιου ταλαντωτή κατακόρυφου συνδέσμου στο λογισμικό RCBlasT.

Απόκριση

Μέγιστη μετακίνηση y_m : 5.65mm
 μ : $\frac{y_m}{X_E} = \frac{5.65}{18.39} = 0.31 < 1$

Λοιποί έλεγχοι

Έλεγχος υποστυλώματος χιαστί συνδέσμου σε καμπτικό λυγισμό:

Διατομή: HEA320
 Δύναμη λόγω έκρηξης: $R_m \cdot \tan\theta = 169.7 \text{ kN} \cdot \tan 42^\circ = 152.80 \text{ kN}$
 Δύναμη λόγω βάρους: $0.497 \cdot 4.30 \cdot 4.03 / 2 = 4.34 \text{ kN}$
 Μήκος λυγισμού L_{cr} : 4.06m
 Ακτίνα αδρανείας i_z : 0.0749m
 Λυγηρότητα λ : $\frac{L_{cr}}{i_z} = \frac{4.06}{0.0749} = 54.21$
 Χαρακτηριστική λυγηρότητα λ_1 : $\pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{210000}{275}} = 86.81$
 Ανηγμένη λυγηρότητα $\bar{\lambda}$: $\frac{\lambda}{\lambda_1} = \frac{54.21}{86.81} = 0.62$
 Κατηγορία διατομής: Κατηγορία 1
 Καμπύλη λυγισμού: c

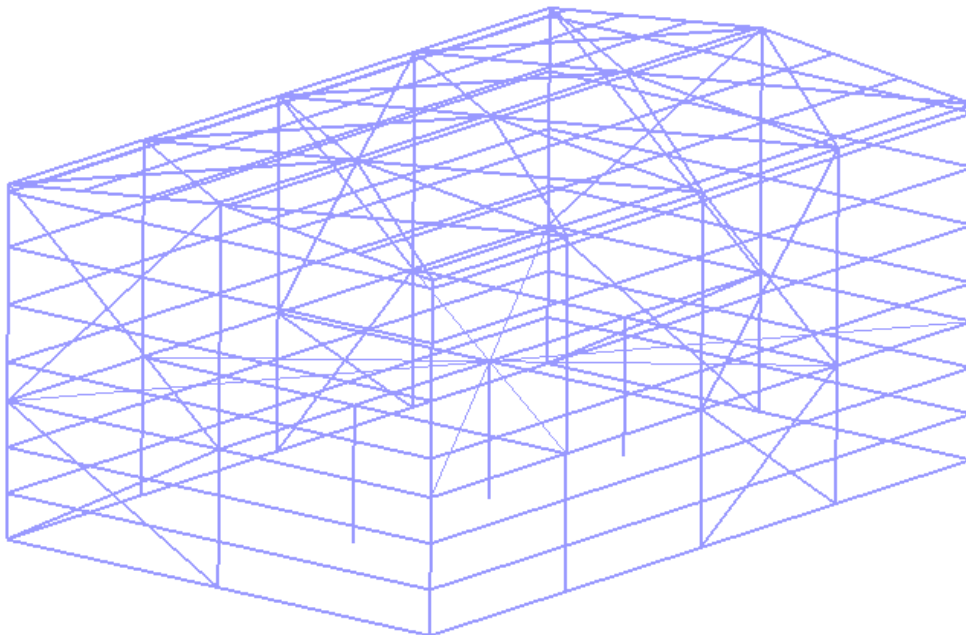
Συντελεστής ατελειών α :	0.49
Φ :	$0.5 \cdot (1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2) = 0.5 \cdot (1 + 0.49 \cdot (0.62 - 0.2) + 0$
Μειωτικός συντελεστής χ :	$\frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0.795 + \sqrt{0.795^2 - 0.62^2}} = 0.774$
Αντοχή σε λυγισμό $N_{b,Rd}$:	$\frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0.774 \cdot 0.01244 \cdot 275000}{1.00} = 2647.85 \text{ kN} >$ $> (152.80 + 4.34) = 157.14 \text{ kN}$

10.5 Ανάλυση με τη χρήση υπολογιστικού μοντέλου

10.5.1 Περιγραφή μοντέλου

Το προσομοίωμα μορφώθηκε στο λογισμικό Adina. Ο εξώστης στην πίσω πλευρά δεν λήφθηκε στατικά υπόψιν παρά μόνο ως μόνιμο φορτίο, αφού βρίσκεται στην πίσω πλευρά (και άρα δέχεται χαμηλό φορτίο από την έκρηξη) και αφού στατικά αποτελεί πρόβολο. Τα στοιχεία ελήφθησαν ως γραμμικά beam elements ενώ από την πλάκα ορόφου και τα συνακόλουθα μηχανήματα μεταφέρθηκαν οι μάζες τους. Παράλληλα, θεωρήθηκε constraint για να προσομοιωθεί η διαφραγματική λειτουργία της πλάκας. Τα haunches προσομοιώθηκαν με διατομές τύπου general για να μεταφερθεί η σωστή δυσκαμψία τους.

Γενικά, εκτελέστηκαν δύο αναλύσεις, με γραμμικότητα ή μη γεωμετρίας. Η μη γραμμικότητα υλικού θεωρήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις. Το βασικότερο είναι ότι οι αναλύσεις αυτές ήταν όλες αναλύσεις με χρονοϊστορία φόρτισης ή, πιο σωστά, χρονικές αναλύσεις. Επειδή, ακριβώς, οι αναλύσεις ήταν χρονικές, η απόσβεση θεωρήθηκε ως τύπου Rayleigh damping η οποία υπολογίστηκε με τις δύο ακραίες ιδιοσυχνότητες του φορέα που συγκέντρωναν τα μεγαλύτερα ποσοστά ενεργοποίησης μάζας.



Σχήμα 10-26. Τρισδιάστατη άποψη του μοντέλου.

Όσον αφορά στις μονάδες μέτρησης αυτές ήταν mm, kg, ms, kN. Υπενθυμιστικά:

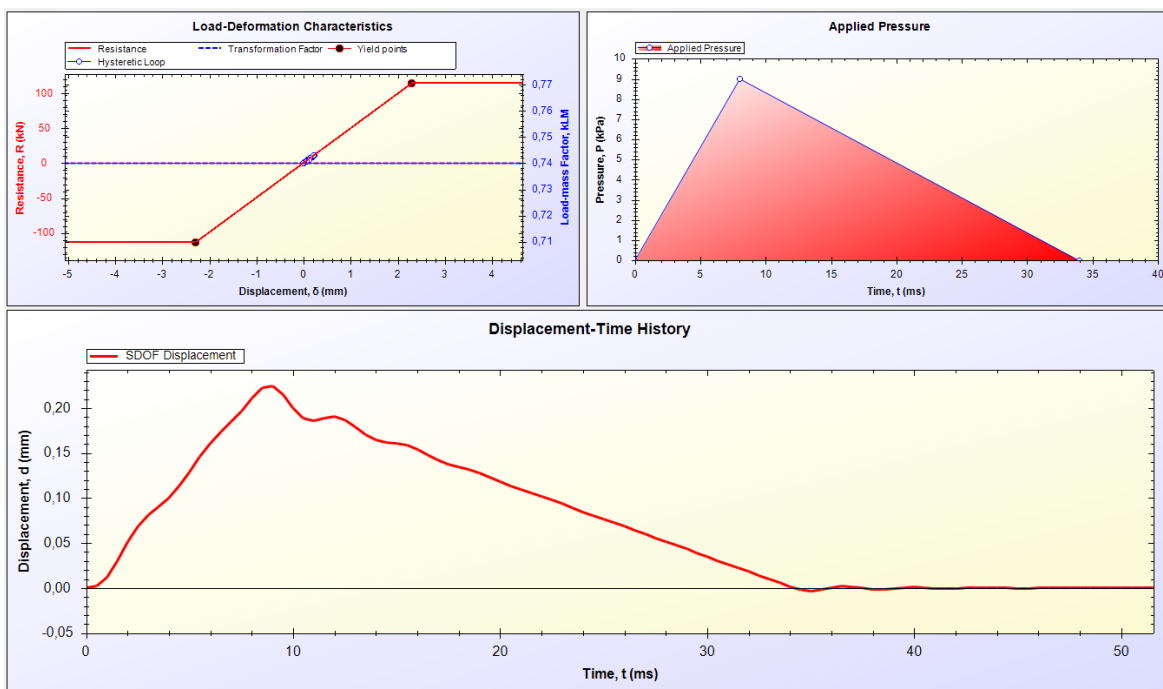
$$1N=1kg \cdot 1m/s^2 \rightarrow 10^{-3}kN=1kg \cdot 1000mm/(10^6ms^2) \rightarrow$$

$$\rightarrow 1kN=1kg \cdot 1mm/ms^2$$

10.5.2 Υπολογισμός φορτίων

Για τον υπολογισμό των φορτίων της έκρηξης στο τρισδιάστατο μοντέλο ενσωματώνονται οι αντιδράσεις στήριξης των πανέλων της επικάλυψης και της πλαγιοκάλυψης, αφού καθίσταται δυσχερής και αναξιόπιστη η ενσωμάτωση των πανέλων εντός του προσομιώματος.

Έτσι, αφού έχουν ήδη υπολογιστεί οι αντιδράσεις στήριξης των πανέλων της μπροστινής πλαγιοκάλυψης και της επικάλυψης, παραμένει η εκκρεμότητα των πανέλων στο πλάι και πίσω. Για αυτά τα πανέλα εκτελείται μη γραμμική χρονική ανάλυση και προκύπτουν οι επιζητούμενες αντιδράσεις στήριξης υπό τη μορφή άρθρωσης και πάκτωσης. Τα χαρακτηριστικά των πανέλων είναι ίδια με αυτά της μπροστινής πλευράς με μόνη διαφορά την αλλαγή του φορτίου.

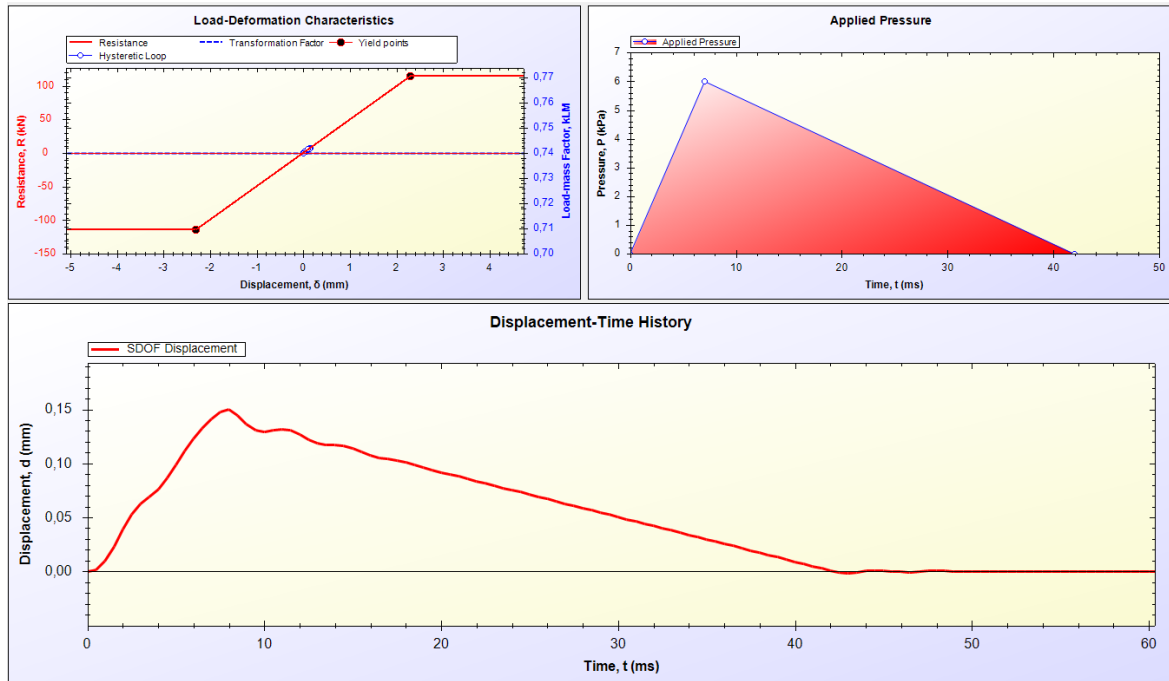


Σχήμα 10-27. Αποτελέσματα απόκρισης μονοβάθμιου ταλαντωτή πλαγιοκάλυψης πίσω στο λογισμικό RCBlas.

Συνολικά, λοιπόν, οι τεγίδες και οι μηκίδες στο μοντέλο φορτίζονται με τις εξής φορτίσεις:

Επικάλυψη

Χρόνος (ms)	0	8	13	17	22	26	32	35	40
Αντίδραση στήριξης άρθρωσης (kN)	0.00	4.59	2.58	3.39	1.77	2.30	0.89	1.20	0.08
Αντίδραση στήριξης πάκτωσης (kN)	0.00	7.54	4.45	5.54	3.07	3.78	1.57	1.97	0.13



Σχήμα 10-28. Αποτελέσματα απόκρισης μονοβάθμιου ταλαντωτή πλαγιοκάλυψης στο πλάι στο λογισμικό RCBlast.

Πλαγιοκάλυψη μπροστά

Χρόνος (ms)	0	8	13	17	22	26
Αντίδραση στήριξης άρθρωσης (kN)	0.00	42.91	14.73	16.80	-1.98	0.00
Αντίδραση στήριξης πάκτωσης (kN)	0.00	61.19	19.52	24.22	-3.03	0.00

Πλαγιοκάλυψη πλάι

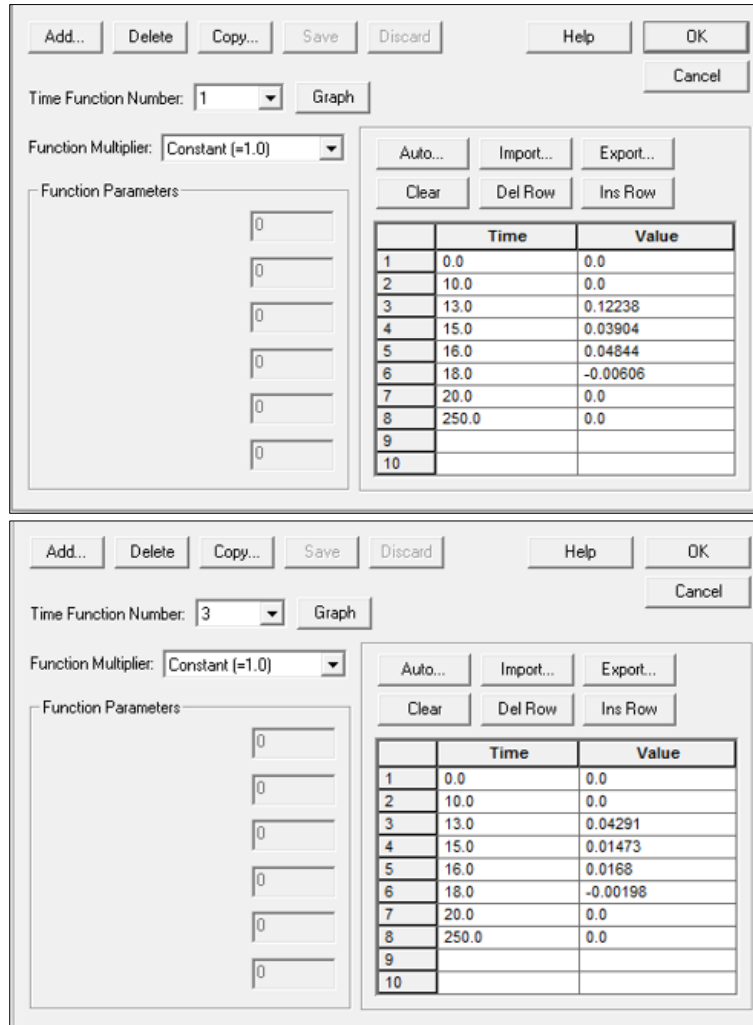
Χρόνος (ms)	0	8	10	15	22	30	42
Αντίδραση στήριξης άρθρωσης (kN)	0.00	2.73	2.38	2.34	1.53	0.87	0.00
Αντίδραση στήριξης πάκτωσης (kN)	0.00	4.56	4.02	3.99	2.61	1.42	0.00

Πλαγιοκάλυψη πίσω

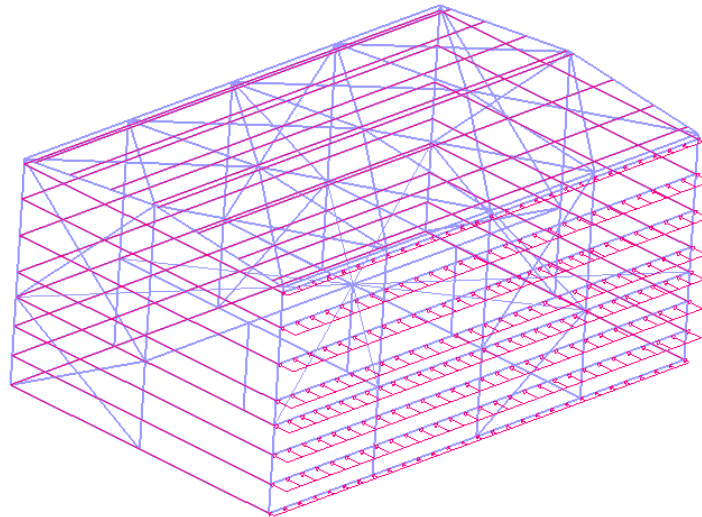
Χρόνος (ms)	0	9	12	6	22	30	35
Αντίδραση στήριξης άρθρωσης (kN)	0.00	4.27	3.46	2.90	1.82	0.58	0.00
Αντίδραση στήριξης πάκτωσης (kN)	0.00	7.10	5.78	4.81	3.04	0.98	0.00

Ωστόσο, ο χρόνος που παρουσιάζεται δεν συμπεριλαμβάνει τον χρόνο εμφάνισης του φορτίου της έκρηξης που παρουσιάστηκε στην αρχή. Αυτός ο χρόνος διαφέρει καθοριστικά ανάλογα με τη θέση στην οποία γίνεται αναφορά και, άρα, πρέπει οπωσδήποτε να ληφθεί υπόψιν σε χρονική ανάλυση. Ο χρόνος είναι 30ms στην επικάλυψη, 25ms στην πλαγιοκάλυψη μπροστά, 31ms στην πλαγιοκάλυψη στο πλάι και 60ms στην πλαγιοκάλυψη πίσω.

Οπότε τα φορτία τελικά εισάγονται ως:



Σχήμα 10-29. Φόρτιση στις μηκίδες της μπροστινής όψης του κτιρίου (time functions).



Σχήμα 10-30. Φόρτιση στις μηκίδες της μπροστινής όψης του κτιρίου (απεικόνιση).

Time Function Number: 4

Function Multiplier: Constant (=1.0)

Function Parameters:

	Time	Value
1	0.0	0.0
2	16.0	0.0
3	24.0	0.00913
4	26.0	0.00805
5	30.5	0.00797
6	38.0	0.00521
7	46.0	0.00284
8	58.0	0.0
9	250.0	0.0
10		

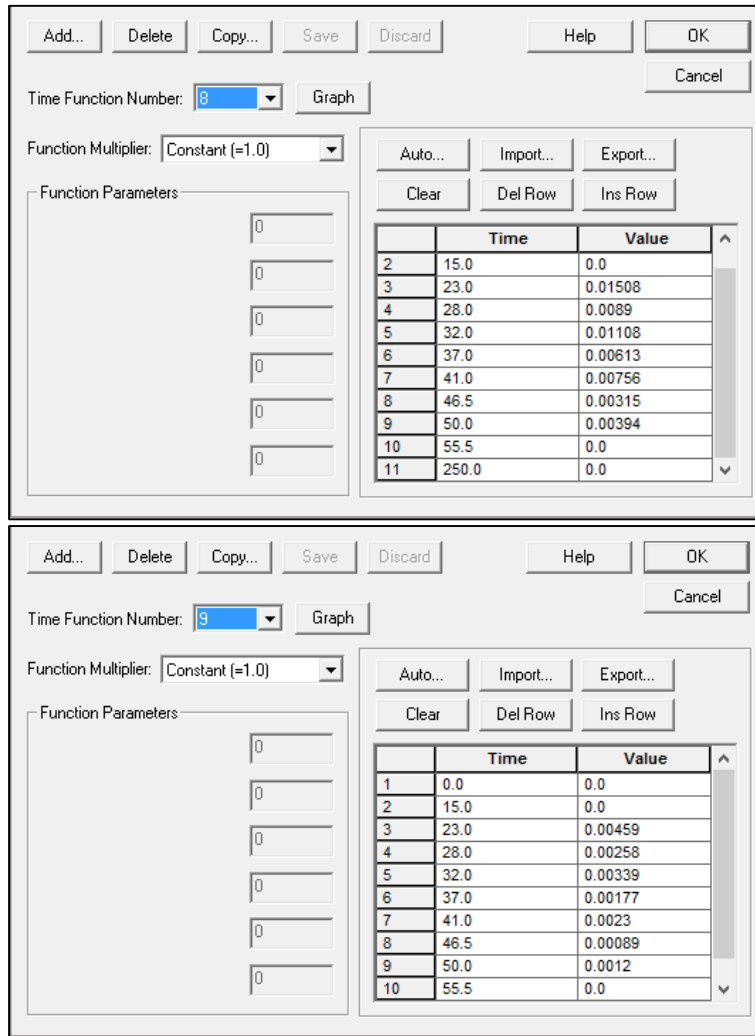
Time Function Number: 5

Function Multiplier: Constant (=1.0)

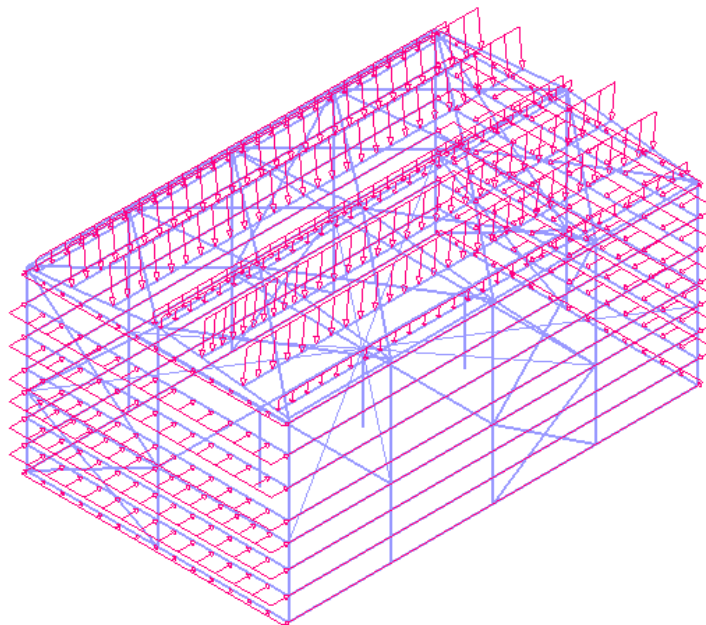
Function Parameters:

	Time	Value
1	0.0	0.0
2	16.0	0.0
3	24.0	0.00273
4	26.0	0.00238
5	30.5	0.00234
6	38.0	0.00153
7	46.0	0.00087
8	58.0	0.0
9	250.0	0.0
10		

Σχήμα 10-31. Φόρτιση στις μηκίδες των πλαϊνών όψεων του κτιρίου (time functions).



Σχήμα 10-32. Φόρτιση στις τεγίδες του κτιρίου κάθετα και όχι κατακόρυφα (time functions).



Σχήμα 10-33. Φόρτιση στις πλαϊνές μηκίδες και στις τεγίδες του κτιρίου (απεικόνιση).

The figure displays two screenshots of a software interface for defining time functions. Both screenshots show a control panel with buttons for 'Add...', 'Delete', 'Copy...', 'Save', 'Discard', 'Help', 'OK', and 'Cancel'. The 'Time Function Number' is set to 6 in the top screenshot and 7 in the bottom screenshot. The 'Function Multiplier' is set to 'Constant (=1.0)'. A 'Graph' button is present in both. Below the multiplier are six input fields for function parameters, all containing the value '0'. To the right of the input fields are buttons for 'Auto...', 'Import...', 'Export...', 'Clear', 'Del Row', and 'Ins Row'. A table with columns 'Time' and 'Value' is shown in both screenshots, with rows numbered 1 to 10.

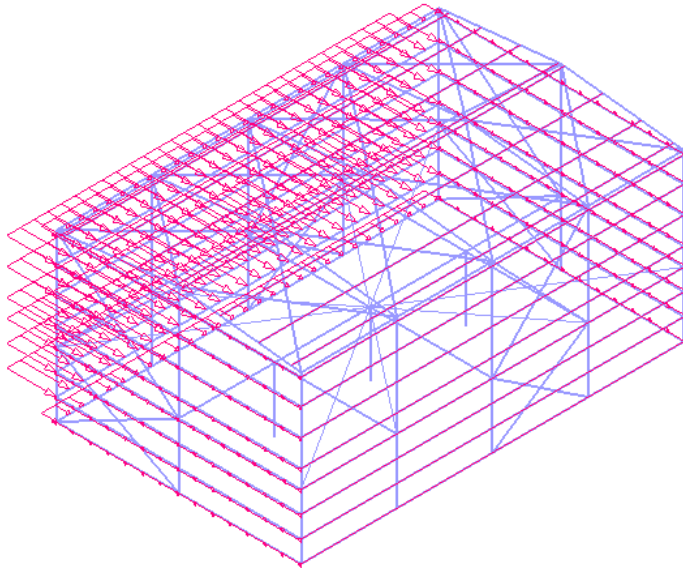
Top Screenshot (Time Function Number: 6):

	Time	Value
1	0.0	0.0
2	45.0	0.0
3	54.0	0.01419
4	57.0	0.01156
5	61.0	0.00962
6	67.0	0.00609
7	75.0	0.00197
8	250.0	0.0
9		
10		

Bottom Screenshot (Time Function Number: 7):

	Time	Value
1	0.0	0.0
2	45.0	0.0
3	54.0	0.00427
4	57.0	0.00346
5	61.0	0.0029
6	67.0	0.00182
7	75.0	0.00058
8	250.0	0.0
9		
10		

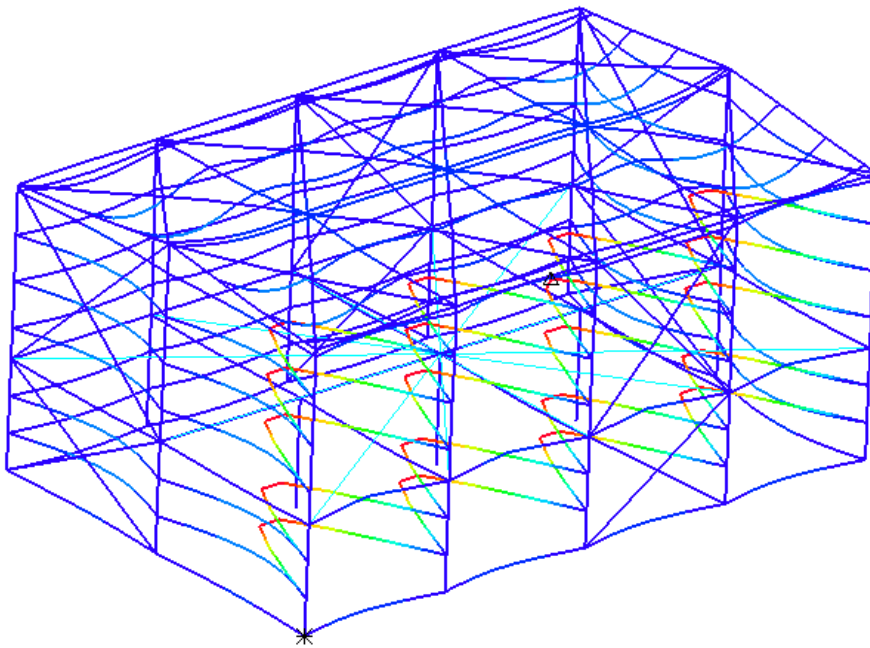
Σχήμα 10-34. Φόρτιση στις πίσω μηκίδες του κτιρίου (time functions).



Σχήμα 10-35. Φόρτιση στις πίσω μηκίδες του κτιρίου (απεικόνιση).

10.5.3 Απόκριση φορέα

Στον φορέα όπως προαναφέρθηκε εκτελούνται κυρίως δύο αναλύσεις, μία με ενεργοποιημένες τις μικρές και μία με τις μεγάλες μετακινήσεις. Η επίλυση γίνεται για 250ms (δηλαδή για το $\frac{1}{4}$ ενός δευτερολέπτου) στο οποίο όμως προλαβαίνουν όπως θα δειχθεί να αναπτυχθούν αρκετοί κύκλοι ταλαντώσεων.

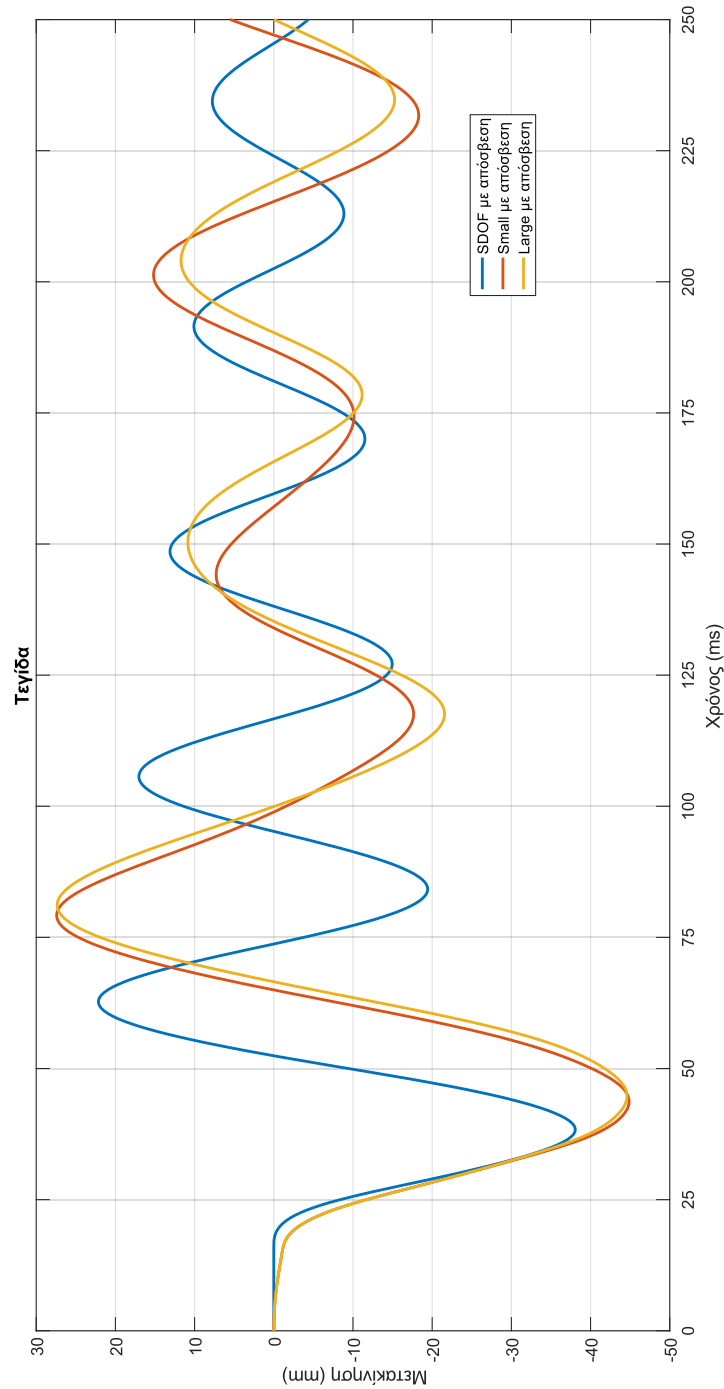


Σχήμα 10-36. Ενδεικτική απόκριση του φορέα με μεγεθυμένες μετακινήσεις στα 50.90ms.

10.6 Συγκρίσεις

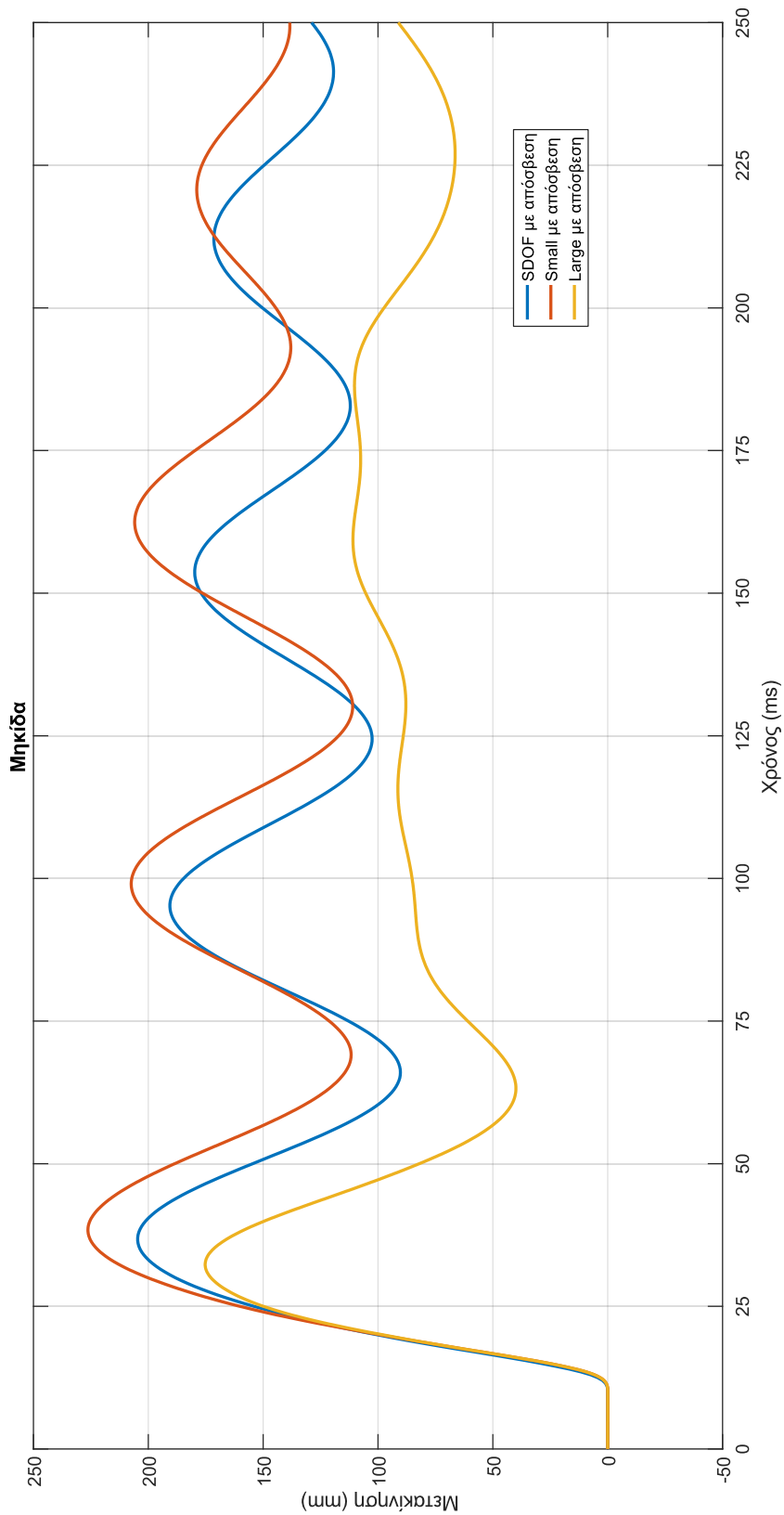
Παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα του μοντέλου με τις δύο μορφές ανάλυσης (γραμμική γεωμετρική ανάλυση και μη γραμμική γεωμετρική ανάλυση). Υπενθυμίζεται ότι η μη γραμμικότητα υλικού λαμβάνεται υπόψιν και στις δύο περιπτώσεις.

10.6.1 Τεγίδα



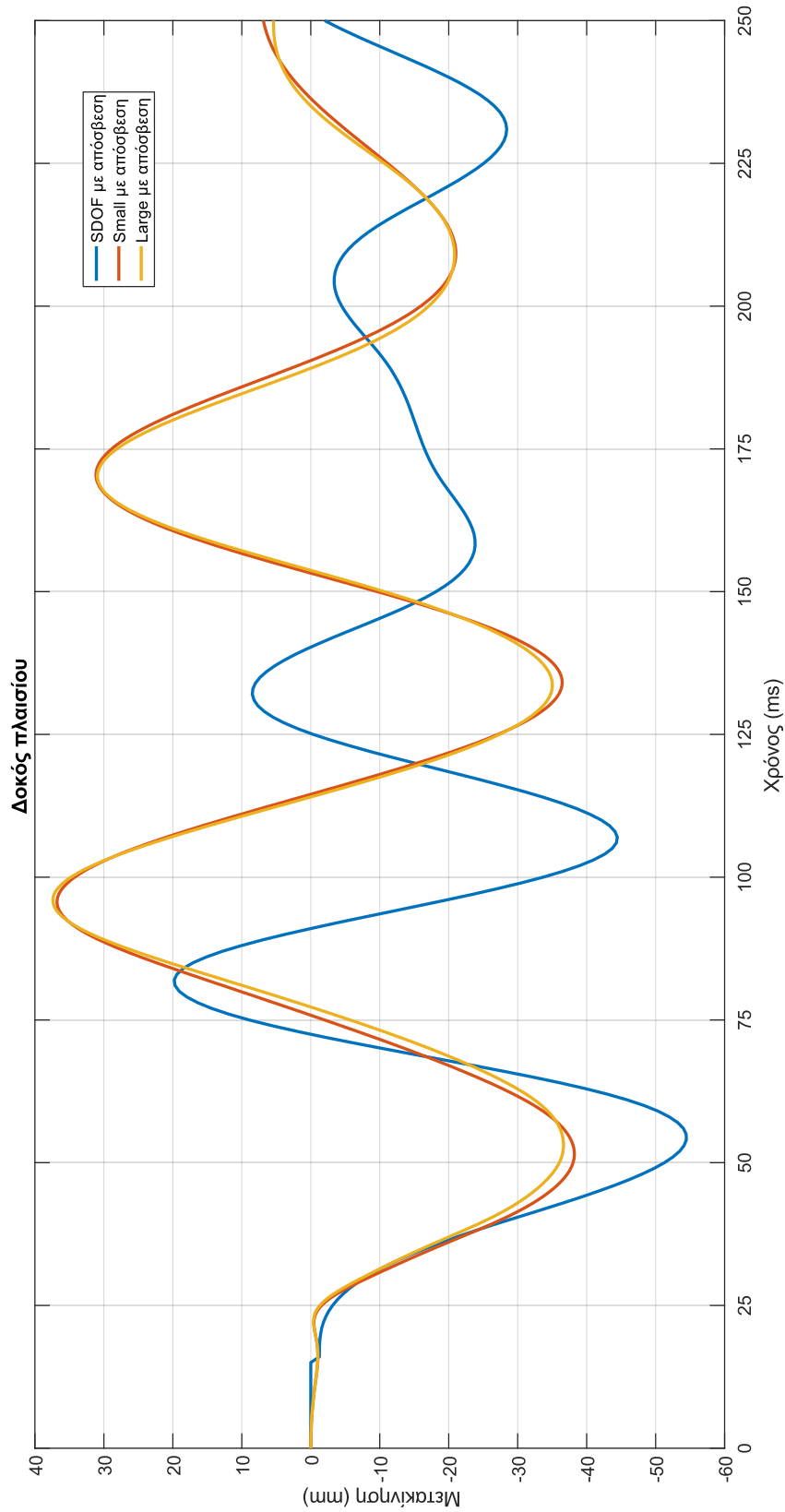
Σχήμα 10-37. Απόκριση τεγίδας σε μονοβάθμιο ταλαντωτή και σε συνολικό μοντέλο τόσο με μικρές μετακινήσεις όσο και με μεγάλες μετακινήσεις.

10.6.2 Μηκίδα



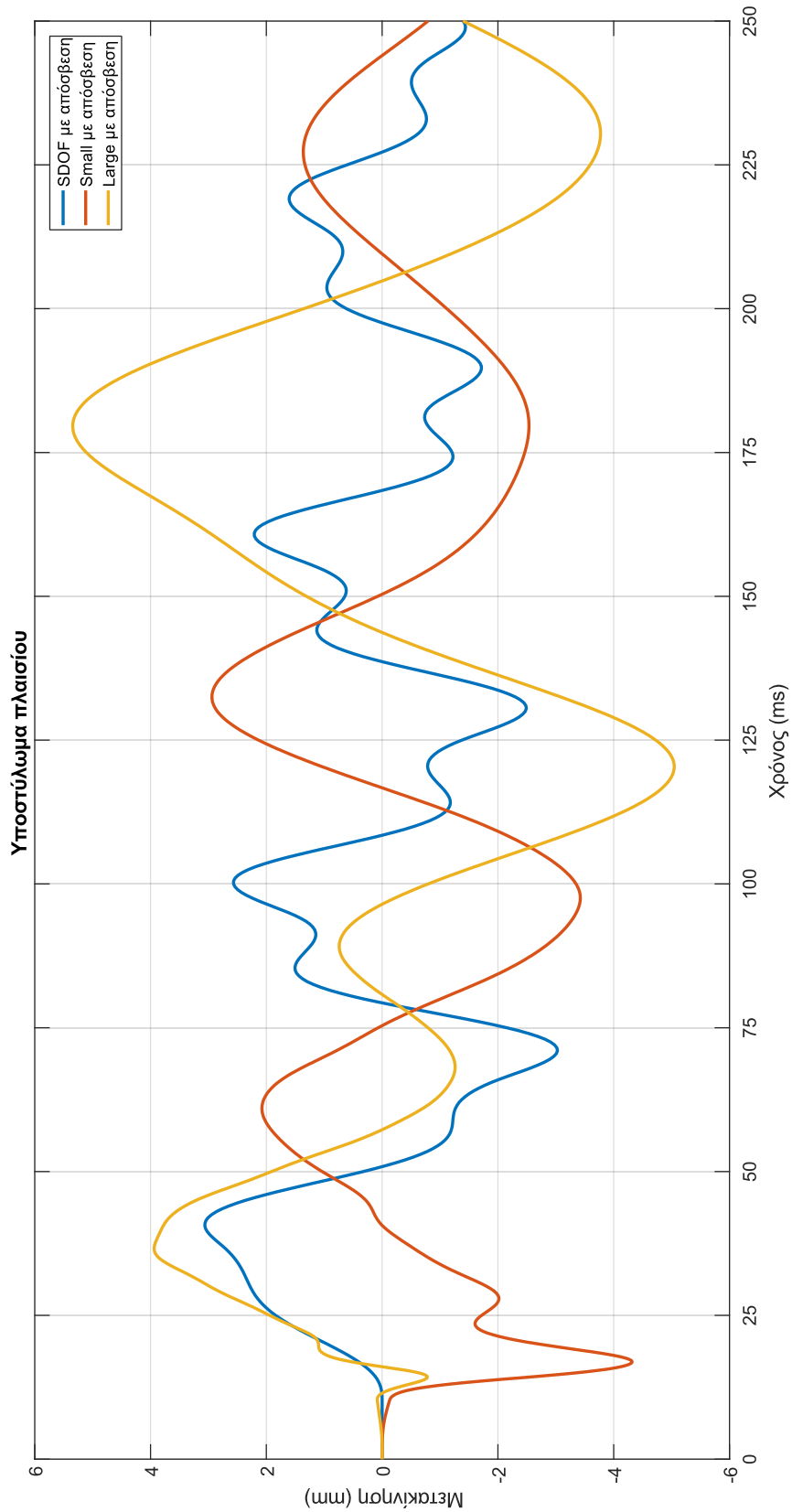
Σχήμα 10-38. Απόκριση μηκίδας σε μονοβάθμιο ταλαντωτή και σε συνολικό μοντέλο τόσο με μικρές μετακινήσεις όσο και με μεγάλες μετακινήσεις.

10.6.3 Δοκός πλαισίου



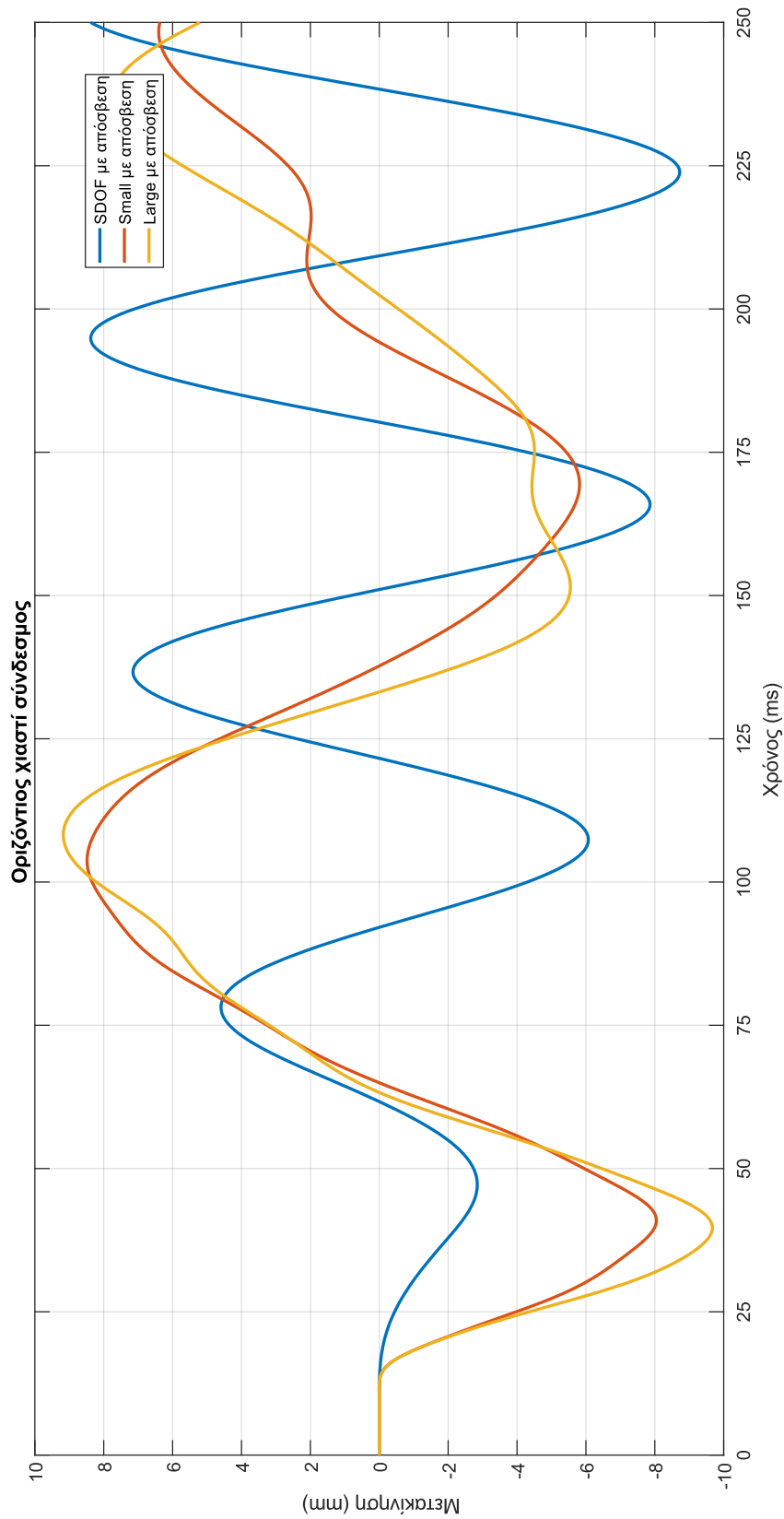
Σχήμα 10-39. Απόκριση δοκού πλαισίου σε μονοβάθμιο ταλαντωτή και σε συνολικό μοντέλο τόσο με μικρές μετακινήσεις όσο και με μεγάλες μετακινήσεις.

10.6.4 Υποσύλωμα πλαισίου



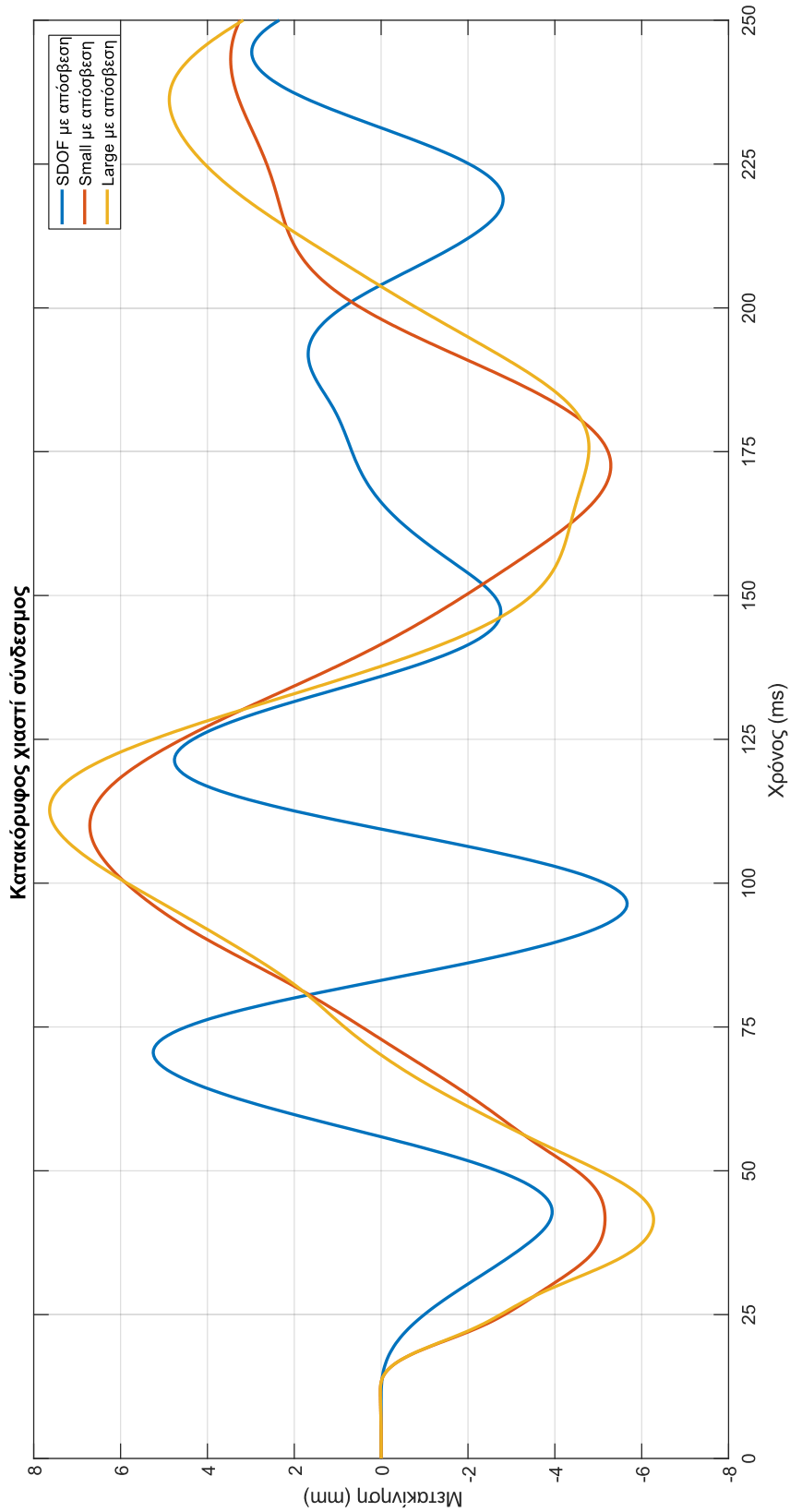
Σχήμα 10-40. Απόκριση υποστυλώματος πλαισίου σε μονοβάθμιο ταλαντωτή και σε συνολικό μοντέλο τόσο με μικρές μετακινήσεις όσο και με μεγάλες μετακινήσεις.

10.6.5 Οριζόντιος χιαστί σύνδεσμος



Σχήμα 10-41. Απόκριση οριζόντιων συνδέσμων σε μονοβάθμιο ταλαντωτή και σε συνολικό μοντέλο τόσο με μικρές μετακινήσεις όσο και με μεγάλες μετακινήσεις.

10.6.6 Κατακόρυφος χιαστί σύνδεσμος



Σχήμα 10-42. Απόκριση κατακόρυφων συνδέσμων σε μονοβάθμιο ταλαντωτή και σε συνολικό μοντέλο τόσο με μικρές μετακινήσεις όσο και με μεγάλες μετακινήσεις.

10.6.7 Σύνοψη

Πίνακας 10-2. Σύγκριση συνολικών αποτελεσμάτων.

	Ισοδύναμος μονοβάθμιος ταλαντωτής		Γραμμική γεωμετρική ανάλυση		Μη γραμμική γεωμετρική ανάλυση		Όριο medium level of protection		Όριο low level of protection	
	θ (°)	μ	θ (°)	μ	θ (°)	μ	θ (°)	μ	θ (°)	μ
Πετάσματα επικάλυψης	0.22°	0.32	(-)		(-)		3°	3	6°	6
Πετάσματα πλαγιοκάλυψης	0.43°	1.96	(-)		(-)		3°	3	6°	6
Τεγίδα	2.03°	0.91	1.49°	0.67	1.49°	0.67	3°	3	12°	10
Μηκίδα	5.44°	3.36	6.11°	3.77	4.65°	2.87	4°	(-)	12°	(-)
Δοκός πλαισίου	0.78°	1.64	0.56°	1.18	0.56°	1.18	3°	3	12°	10
Υποστύλωμα πλαισίου	0.18°	0.14	0.24°	0.19	0.31°	0.24	(-)	1	(-)	3
Οριζόντιος χιαστί σύνδεσμος	(-)	0.53	(-)	0.51	(-)	0.59	(-)	1	(-)	3
Κατακόρυφος χιαστί σύνδεσμος	(-)	0.31	(-)	0.41	(-)	0.47	(-)	1	(-)	3

Κατά συνέπεια, λόγω της μηκίδας και μόνον το κτίριο χαρακτηρίζεται ότι προσφέρει low level of protection, ήτοι χαμηλό επίπεδο προστασίας στη συγκεκριμένη έκρηξη. Η έκρηξη αυτή (25kg στα 15m) αποτελεί μια τυπική έκρηξη. Ωστόσο, ακριβής τοπογραφία του χώρου θα μπορούσε να ορίσει καλύτερα την απόσταση πρόκλησης της έκρηξης (για παράδειγμα με την ύπαρξη φράχτη) ενώ η είσοδος οχημάτων και η ευκολία πρόσβασης πέριξ του κτιρίου δύναται να ορίσει και το μέγεθος της έκρηξης που μπορεί να προκληθεί όσον αφορά στα κιλά TNT της έκρηξης.

10.7 Αναλύσεις επί της μηκίδας

Οι μηκίδες του φορέα είναι αυτές που δέχονται την υψηλότερη φόρτιση (στην μπροστινή πλευρά) σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα στοιχεία. Έτσι, μία εξ αυτών εκλέγεται για την εκτέλεση παραμετρικών αναλύσεων και τη διαπίστωση ποιες μέθοδοι κάθε φορά και με ποιες επιλογές αποτελούν τις καλύτερες λύσεις προσομοίωσης.

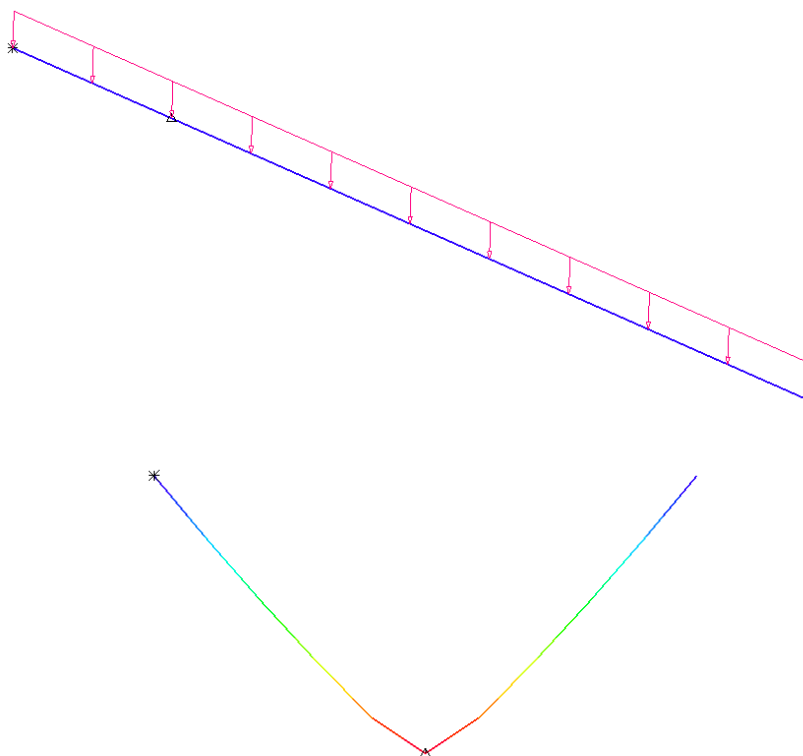
Συνολικά εκτελούνται αναλύσεις τόσο με τη χρήση της μεθόδου κεντρικών διαφορών (που είναι στην κατηγορία των explicit) όσο και με τη μέθοδο μέσης επιτάχυνσης (που είναι στην κατηγορία των implicit). Επιπλέον, γίνονται τόσο μη γραμμικές γεωμετρικές όσο και γραμμικές γεωμετρικές αναλύσεις. Σε κάποιες εξ αυτών λαμβάνεται υπόψιν ο στρεβλωτικός ελευθερίας βαθμός και σε κάποιες όχι. Το ίδιο συμβαίνει

και με την απόσβεση (Rayleigh damping). Ενώ, μάλιστα, επιστρατεύεται και μοντέλο το οποίο έχει προσομοιωθεί με χρήση επιφανειακών στοιχείων.

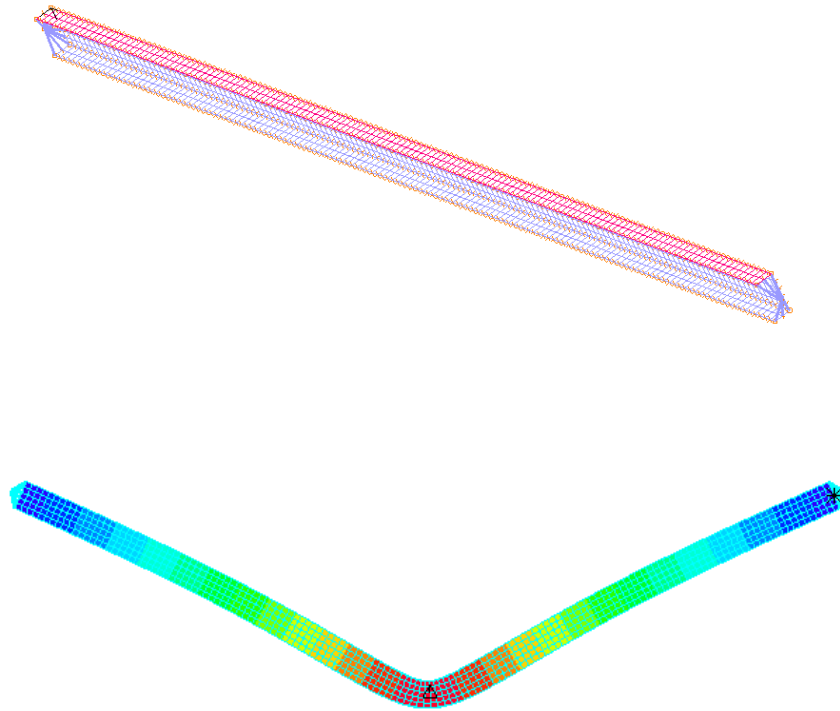
Έτσι, συνολικά εκτελούνται έντεκα αναλύσεις:

Πίνακας 10-3. Είδη αναλύσεων επί της μηκίδας.

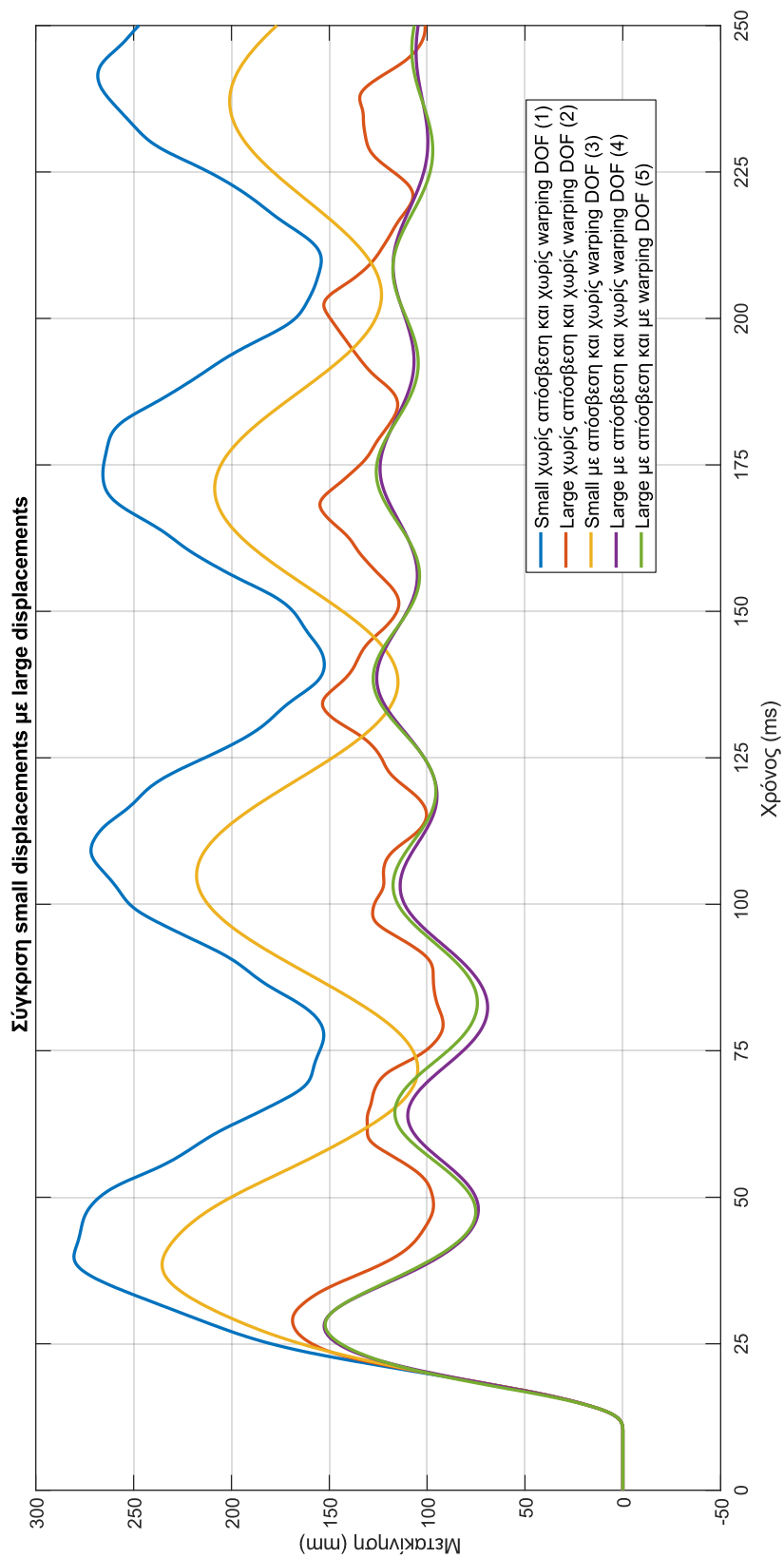
Αριθμός	Μη γραμμική γεωμετρική (ΝΑΙ/ΟΧΙ)	Beam/Shell	Στρεβλωτικός βαθμός ελευθερίας (ΝΑΙ/ΟΧΙ)	Implicit/Explicit	Απόσβεση (ΝΑΙ/ΟΧΙ)
1	Ο	B	Ο	I	Ο
2	N	B	Ο	I	Ο
3	Ο	B	Ο	I	N
4	N	B	Ο	I	N
5	N	B	N	I	N
6	Ο	B	N	E	N
7	N	B	N	E	N
8	Ο	B	N	I	Ο
9	N	B	N	I	Ο
10	Ο	S	-	I	Ο
11	N	S	-	I	Ο



Σχήμα 10-43. Απεικόνιση γραμμικού μέλους μηκίδας με μεγεθυμένες μετακινήσεις.

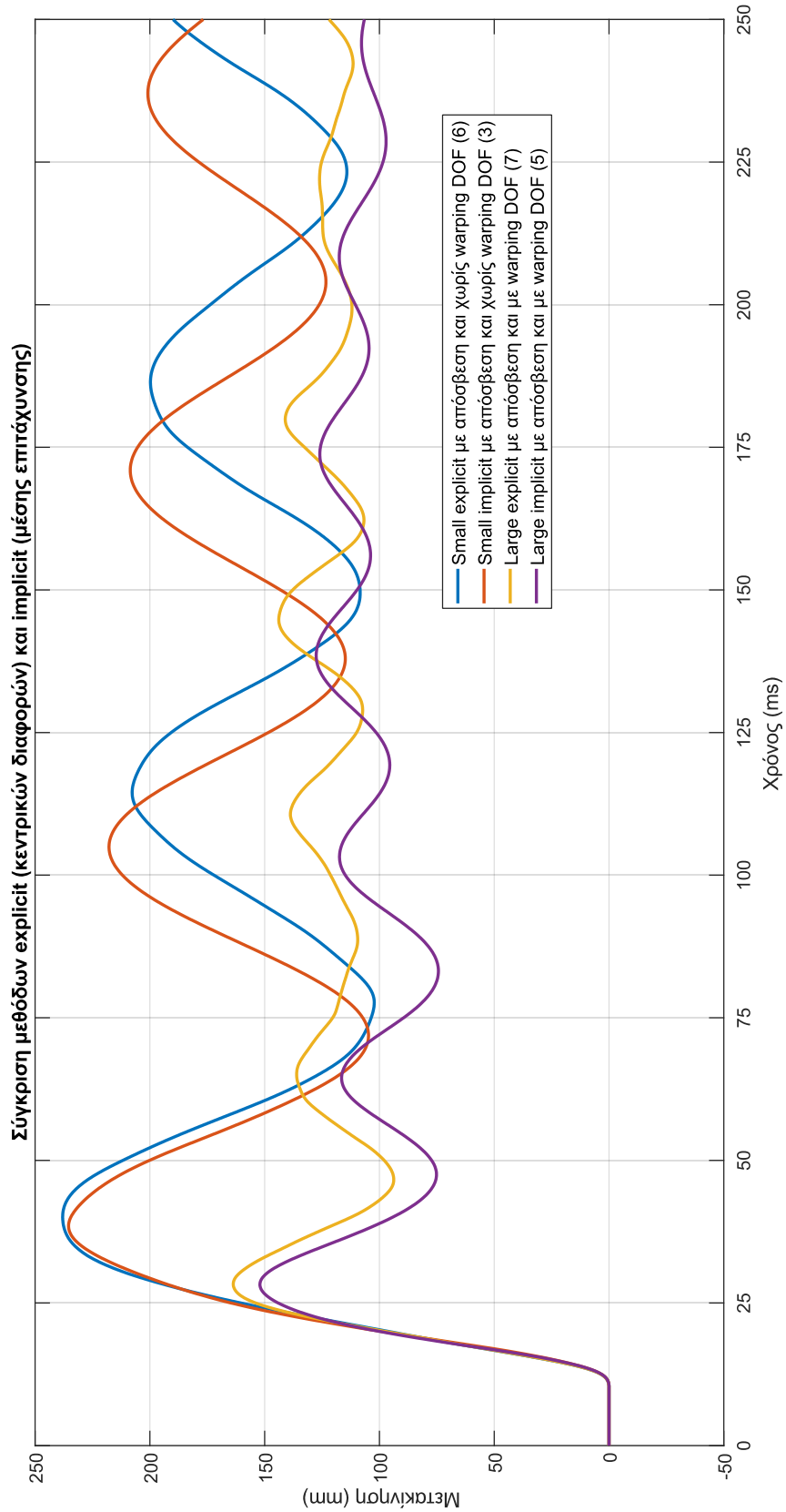


Σχήμα 10-44. Απεικόνιση μηκίδας με επιφανειακά στοιχεία και με μεγεθυμένες μετακινήσεις.



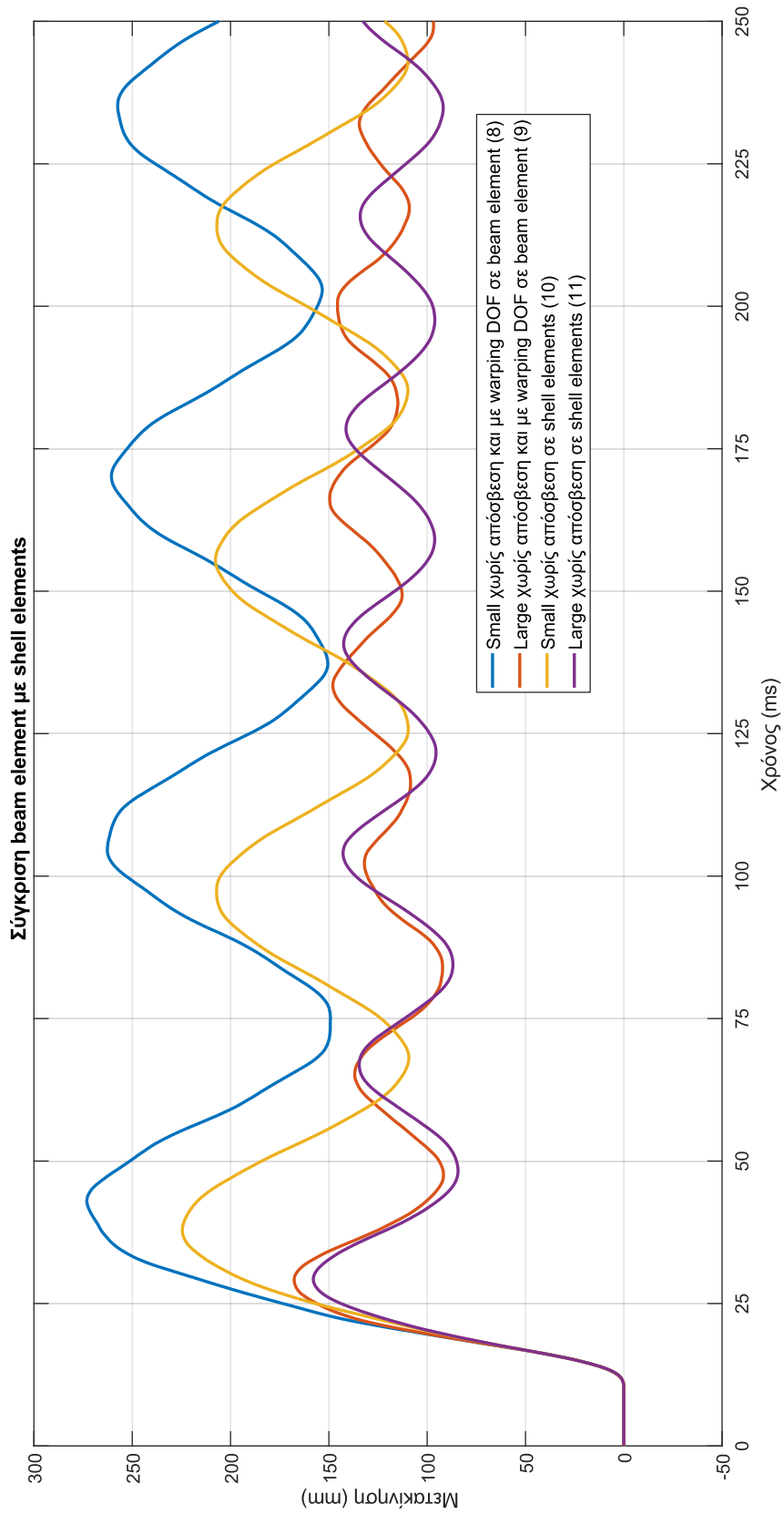
Σχήμα 10-45. Σύγκριση μικρών μετακινήσεων με μεγάλες μετακινήσεις.

Όπως παρουσιάζεται, οι μεγάλες μετακινήσεις δίνουν σαφώς θετικότερα αποτελέσματα, περί τα 100mm χαμηλότερα.



Σχήμα 10-46. Σύγκριση μεθόδου κεντρικών διαφορών με μέθοδο μέσης επιτάχυνσης.

Όπως παρουσιάζεται, υπάρχει ελαφριά απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων ενώ σταδιακά παύουν να είναι συμφασικές οι ταλαντώσεις.



Σχήμα 10-47. Σύγκριση beam element με shell elements.

Όπως παρουσιάζεται, υπάρχει απόκλιση σαφής απόκλιση σε μεγάλες μετακινήσεις.

11 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία επιτυγχάνει το στόχο της που είναι η εμβάθυνση στις βασικές αρχές που διέπουν την έκρηξη ως δράση επί των κατασκευών και η παρουσίαση των βασικών εργαλείων για τον σχεδιασμό ενός έργου σε έκρηξη. Παράλληλα, δίνεται έμφαση σε εφαρμογές που βρίσκονται στην αιχμή των πλέον επίκαιρων τεχνολογικών προσπαθειών γύρω από την έκρηξη. Έτσι, γίνεται προσπάθεια προαγωγής των γνώσεων στο πεδίο των εκρήξεων που είναι ένα από τα πλέον μείζονα προβλήματα της κοινωνίας.

Διεθνώς, η βασική διαδικασία εφαρμογής που τυγχάνει ευρείας αποδοχής είναι η μέθοδος του ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή (SDOF). Στην ουσία μετατρέπονται τα στοιχεία του φορέα σε ισοδύναμους μονοβάθμιους ταλαντωτές και είτε επιλύονται απλοποιητικά μέσω διαγραμμάτων είτε εκτελούνται χρονικές αναλύσεις. 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.

Στο πλαίσιο αυτό παρουσιάζονται οι εφαρμογές που σκοπό έχουν να δείξουν τον δρόμο και τους ελέγχους που πρέπει να ακολουθήσει ο σχεδιαστής για να προσεγγίσει μια έκρηξη. Έτσι, επιλύονται με τη μέθοδο SDOF ένα απλό χαλύβδινο μέλος, ένας τοίχος οπλισμένου σκυροδέματος και ένα σύμμικτο panel χάλυβα και σκυροδέματος ενώ παρουσιάζεται και ένα παράδειγμα όσον αφορά στον τρόπο υπολογισμού των φορτίων από μια έκρηξη.

Παρουσιάζονται, όμως, και πιο σύνθετες και παράλληλα ερευνητικές εφαρμογές που είναι στην ουσία επίλυση ενός υαλοπίνακα με τη χρήση του SDOF και η ανάλυση ενός μεταλλικού κτιρίου το οποίο επιλύεται τόσο με τη μέθοδο SDOF όσο και με κατάλληλο προσομοίωμα σε λογισμικό στατικής ανάλυσης, οπότε και συνάγονται οι επιζητούμενες συγκρίσεις μεταξύ των μεθόδων.

Η περίπτωση του υαλοπίνακα αποτελεί μια σύνθετη κατάσταση όπου πρέπει να ληφθεί υπόψη μέσα σε χρονική ανάλυση (που από μόνη της αποτελεί ένα σχοινοτενές εργαλείο) το σύνθετο διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων του laminated υαλοπίνακα καθώς και η αντίστοιχα σύνθετη υστερητική του συμπεριφορά, ώστε τελικά να παρουσιαστεί το διάγραμμα πίεσης – ώθησης που είναι αυτό που κρίνει τι βάρους εκρηκτική ύλη TNT αντέχει (σε ρηγμάτωση και θραύση) και σε τι απόσταση.

Η περίπτωση του μεταλλικού κτιρίου αποτελεί μια συνήθη κατάσταση σχεδιασμού όπου όμως πέρα από την εφαρμογή της ευρέως χρησιμοποιούμενης μεθόδου SDOF επιδιώκεται και η σύγκριση με την πιο ρεαλιστική χρήση ενός προσομοιώματος σε λογισμικό στατικής ανάλυσης. Μάλιστα, στο προσομοίωμα εκτελούνται πολλαπλές διαφορετικές αναλύσεις. Οι αναλύσεις αυτές εκτελούνται με διαφορετικές επιλογές κάθε φορά οι οποίες άλλοτε αυξάνουν την ακρίβεια και ταυτόχρονα τον υπολογιστικό κόπο και άλλοτε όχι. Έπειτα, αναζητείται η απόκλιση ανάμεσα σε αυτές μεθόδους ανάλογα με την εκάστοτε απόκριση του φορέα, προτείνονται οι καταλληλότερες προς χρήση μέθοδοι και διαπιστώνονται τα όρια εφαρμογής των μεθόδων και τα περιθώρια βελτίωσης του τρόπου προσέγγισης της συμπεριφοράς του φορέα σε έκρηξη.

Συνοπτικά, λοιπόν, στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία επιτυγχάνονται:

- Η σύγκριση των μεθόδων ανάλυσης μιας κατασκευής σε έκρηξη με διαφοροποίηση ποικίλων παραμέτρων.
- Η αναλυτική παρουσίαση των αρχών που διέπουν την έκρηξη, την απόκριση των κατασκευών σε αυτές και τον τελικό σχεδιασμό τους.
- Η παράθεση πολυσυλλεκτικών παραδειγμάτων και εναλλακτικών εργαλείων προς επίλυση προβλημάτων έκρηξης καθώς τα πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενα βοηθήματα προστατεύονται εσωτερικά σε άλλες χώρες και δυσχεραίνουν την επίλυση προβλημάτων έκρηξης από πολίτες τρίτων χωρών, όπως η Ελλάδα.

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 δύνανται να είναι η σύγκριση των μονοβάθμιων ταλαντωτών με διαφορετικά μοντέλα και εξαγωγή των ανάλογων αποκλίσεων, 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. Αυτές οι προτάσεις μπορούν να αποτελέσουν μοχλό έρευνας και να οδηγήσουν σε περαιτέρω επιστημονικές αναζητήσεις.

12 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Παρουσιάζονται αναλυτικά οι βιβλιογραφικές αναφορές που χρησιμοποιήθηκαν για τη μεταπτυχιακή εργασία:

- [1] On the thermodynamic theory of waves of finite longitudinal disturbance, W.J.M.Rankine, Philosophical Transactions of the Royal Society, 160, 277-288, 1870.
- [2] Elements of gas dynamics, H.W. Liepmann, A.Roshko, Wiley, New York, 1957.
- [3] Explosive shocks in air, G.F.Kinney, K.J.Graham, Springer-Verlag, 1985.
- [4] Pressures recorded in partially closed chambers at explosion of TNT charges, H.R.W.Weibull, Annals of the New York Academy of Sciences, 152 (1), 357-361, 1968.
- [5] Numerical solution of spherical blast waves, H.L.Brode, Journal of Applied Physics, No.6, 26, 766-775, 1955.
- [6] Design and analysis of hardened structures to conventional weapon effects, US Army Corps of Engineers, 2002.

- [7] Structures to resist the effects of accidental explosions, US Army Corps of Engineers, 2014.
- [8] British ordnance board minutes, B.Hopkinson, 13565, 1915.
- [9] Explosion hazards and evaluation, W.E.Baker, P.A.Cox, P.S.Westine, J.J.Kulesz, R.A.Strehlow, Elsevier, 1983.
- [10] Blast effects on buildings, D.Cormie, G.Mays, P.Smith, Thomas Telford, 2009.
- [11] The chemistry of explosives, J.Akhavan, Royal Society of Chemistry, 2011.
- [12] Υγιεινή και ασφάλεια εγκαταστάσεων, Φ.Ρήγας, 2013.
- [13] ΦΕΚ 733, Τεύχος δεύτερο, Εφημερίς της Κυβέρνησης.
- [14] Review of the state of the art in gas explosion modelling, H.S.Ledin, Health and Safety Laboratory, HSL Report No. HSL/2002/02, 2002.
- [15] Airblast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical surface burst, C.N.Kingery, G.Bulmash, Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, ARBRL-TR-02555, 1984.
- [16] Fundamentals of protective design for conventional weapons, D.Hyde, Structures Laboratory, USACE Waterways Experiment Station, 1992.
- [17] Vapour cloud explosion model, B.J.Wiekema, Journal of Hazardous Materials, 3, 221-232, 1980.
- [18] The multi-energy method: a framework for vapour cloud explosion blast prediction, A.C. van den Berg, Journal of Hazardous Materials, 12, 1-10, 1985.
- [19] A new set of blast curves from vapor cloud explosion, M.J.Tang, Q.A.Baker, Process Safety Progress, 18, 3, 235-240, 1999.
- [20] A simple assessment methodology for vented explosion, A.T.Cates, B.Samuels, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 13, 419-430, 2000.
- [21] Prediction of vapour cloud explosion using the SCOPE model, J.S.Puttock, M.R.Yardley, T.M.Cresswell, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 13, 419-430, 2000.
- [22] The finite element method for fluid dynamics, O.C.Zienkiewicz, R.L.Taylor, P.Nithiarasu, Butterworth-Heinemann, 2006.

- [23] An approach to the evaluation of blast loads on finite and semi-infinite structures, T.A.Rosa, PhD Thesis, Cranfield University, 2001.
- [24] The numerical computation of turbulent flows, B.E.Launder, D.B.Spalding, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 3, 269-289, 1974.
- [25] Workbook for predicting pressure wave and fragment effects of exploding propellant tanks and gas storage vessels, W.E.Baker, J.J.Kulesz, R.E.Ricker, R.L.Bessey, P.S.Westine, V.B.Parr, G.A.Oldham, NASA Lewis Research Centre, Report No.CR-134906, 1975.
- [26] Structural theory and analysis, J.D.Todd, MacMillan, 1974.
- [27] An improved SDOF model for steel members subject to explosion loading—generalized supports and catenary action, Imperial College London, 2001.
- [28] Structural defense, D.G.Christopherson, Ministry of Home Security Research and Experiments Department, Report RC 450, 1946.
- [29] Technical note and worked examples to supplement the interim guidance notes for the design and protection of topside structures against explosion and fire – Simplified methods for analysis of response to dynamic loading, Fire and Blast Information Group, Steel Construction Institute, Technical note 7, 2002.
- [30] Blast and ballistic loading of structures, P.D.Smith, J.G.Hetherington, Buteerworth Heinemann, 1992.
- [31] Quantification of glazing hazards from blast, D.C.Smith, Proceedings of the 29th Department of Defense Explosives Safety Seminar, New Orleans, 2000.
- [32] Introduction to structural dynamics, J.M.Biggs, McGraw-Hill, 1964.
- [33] Eurocodes 0, 1, 2, 3, 4, prEN16612 Glass in building, European Committee for Standardization
- [34] Standard test method for glazing systems subject to airblast loadings, ASTM F 1642-04, American Society for Testing and Materials, 2007.
- [35] Glass in building, Explosion - resistant security glazing, Test and classification for arena air-blast loading, ISO 16993:2007, International Organization for Standardization, 2007.
- [36] Building regulations 2000, Department of Communities and Local Government, London, 2004.

- [37] Design of buildings to resist progressive collapse, UFC 4-023-03, US Department of Defense, 2008.
- [38] Development and analysis of low-order models of frame structures under blast loads, L.Hamra, Universite de Liege, 2016.
- [39] Structural assessment of multiple story steel buildings subjected to blast loads, A.Appelbaum, Master Thesis, Case Western Reserve University, 2013.
- [40] Assessment of progressive collapse in multi-storey buildings, B.A.Izzudin, A.G.Vlassis, A.Y.Elghazouli, D.A.Nethercot, Structures and Buildings, 160, 197-205, 2007.
- [41] Simplified progressive collapse assessment of steel – framed buildings due to column loss, Influence of dynamic column damage. G.V.Gudmundsson, Imperial College, 2007.
- [42] Predictions of structural response to dynamic loads of different loading rates, H.Hao, International Journal of Protective Structures, 2015.
- [43] Best practices for reducing the potential for progressive collapse in buildings, NISTIR7396, B.R.Ellingwood, R.Smilowitz, D.O.Susenberry, D.Duthink, H.S.Lew, N.J.Carino, National Institute of Standards and Technology, United States Department of Commerce, 2006.
- [44] Progressive analysis procedure for progressive collapse, S.M.Marjanishvili, Journal of Performance of Constructed Facilities, 18, 2, 79-85, 2004.
- [45] Comparison of various procedures for progressive collapse analysis, S.M.Marjanishvili, E.Agnew, Journal of Performance of Constructed Facilities, 20, 4, 365-374, 2006.
- [46] Modern protective structures. T.Krauthammer, CRC Press, 2008.
- [47] Progressive collapse: comparison of main standards, formulation and validation of new computational procedures, K.Menchel, Universite Libre de Bruxelles Faculte de Sciences Appliquees, 2008.
- [48] Counter – terrorist protective security manual, Cabinet Office Security Policy Division and the Security Service, 2003.
- [49] M&E services in protected spaces, interim design manual, Arup Security Consulting, 2006.
- [50] On the blast resistance of laminated glass, P.A.Hooper, R.A.M.Sukhram, B.R.K.Blackman, J.P.Dear, International Journal of Solids and Structures, 49, 899-918, 2012.

- [51] Explosives and incendiaries used in terrorist attacks on public surface transportation: a preliminary empirical examination, Mineta Transportation Institute, 2010.
- [52] The shock wave of a nuclear explosion, I.Naumenko, I.Petroskyim, BOEH CCCP, 1956.
- [53] The dynamics of explosions and its use, J.Henrych, Elsevier, 1979.
- [54] The design of concrete structures to resist explosions and weapon effects, C.A.Mills, Proceedings of the 1st international conference on concrete for hazard protections, Edinburg, Amsterdam, 61–73, 1987.
- [55] Explosive Shocks in Air, G.F.Kinney, K.J.Graham, Springer, 1985.
- [56] Technical report ARBRL-TR-02555: Air blast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical burst, C.N.Kingery, G.Bulmash, U.S. Army Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD, 1984.
- [57] Design of blast resistant structures, N.M.Newmark, R.J.Hansen, Shock and Vibration Handbook, Vol.3, McGraw-Hill, 1961.
- [58] Best practices for reducing the potential for progressive collapse in buildings, NISTIR7396, B.R.Ellingwood, R.Smilowitz, D.O.Susenberry, D.Duthink, H.S.Lew, N.J.Carino, National Institute of Standards and Technology, United States Department of Commerce, 2006.
- [59] Progressive analysis procedure for progressive collapse, S.M.Marjanishvili, Journal of Performance of Constructed Facilities, 18, 2, 79-85, 2004.
- [60] Comparison of various procedures for progressive collapse analysis, S.M.Marjanishvili, E.Agneu, Journal of Performance of Constructed Facilities, 20, 4, 365-374, 2006.
- [61] Modern protective structures. T.Krauthammer, CRC Press, 2008.
- [62] Progressive collapse: comparison of main standards, formulation and validation of new computational procedures, K.Menchel, Universite Libre de Bruxelles Faculte de Sciences Appliquees, 2008.
- [63] Counter – terrorist protective security manual, Cabinet Office Security Policy Division and the Security Service, 2003.
- [64] M&E services in protected spaces, interim design manual, Arup Security Consulting, 2006.

- [65] On the blast resistance of laminated glass, P.A.Hooper, R.A.M.Sukhram, B.R.K.Blackman, J.P.Dear, *International Journal of Solids and Structures*, 49, 899-918, 2012.
- [66] Explosives and incendiaries used in terrorist attacks on public surface transportation: a preliminary empirical examination, *Mineta Transportation Institute*, 2010.
- [67] The shock wave of a nuclear explosion, I.Naumyenko, I.Petroskyim, *BOEH CCCP*, 1956.
- [68] The dynamics of explosions and its use, J.Henrych, *Elsevier*, 1979.
- [69] The design of concrete structures to resist explosions and weapon effects, C.A.Mills, *Proceedings of the 1st international conference on concrete for hazard protections*, Edinburg, Amsterdam, 61–73, 1987.
- [70] Explosive Shocks in Air, G.F.Kinney, K.J.Graham, *Springer*, 1985.
- [71] Technical report ARBRL-TR-02555: Air blast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical burst, C.N.Kingery, G.Bulmash, U.S. Army Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD, 1984.
- [72] Design of blast resistant structures, N.M.Newmark, R.J.Hansen, *Shock and Vibration Handbook*, Vol.3, McGraw-Hill, 1961.
- [73] The resistance of laminated glass to blast pressure loading and the coefficients for single degree of freedom analysis of laminated glass, C.Morison, PhD Thesis, Cranfield University.