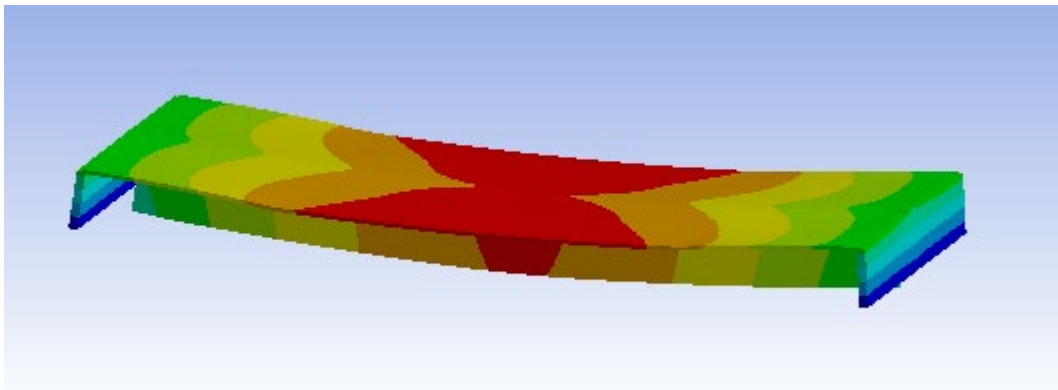




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

**ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ
ΤΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΠΕΤΑΣΜΑΤΩΝ
ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΑ ΕΚΡΗΞΕΩΝ**



Διπλωματική Εργασία
Άννα Μαντζουράνη

ΕΜΚ ΔΕ 2020 7

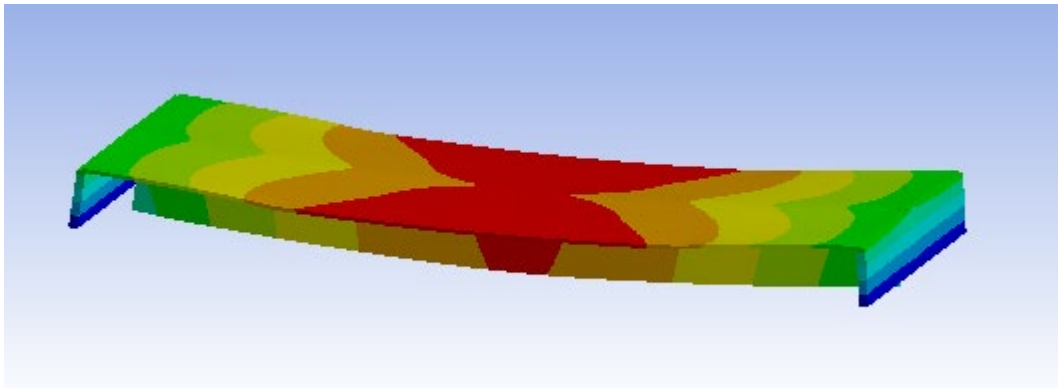
Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές
Συνεπιβλέπων: Ορέστης Ιωάννου

Αθήνα, Μάρτιος 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΠΕΤΑΣΜΑΤΩΝ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΑ ΕΚΡΗΞΕΩΝ



Διπλωματική Εργασία
Άννα Μαντζουράνη

ΕΜΚ ΔΕ 2020 7

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές
Συνεπιβλέπων: Ορέστης Ιωάννου
Αθήνα, Μάρτιος 2020

Copyright © Άννα Μαντζουράνη, 2020
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 της συγγραφέως. 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 την συγγραφέα.

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

Copyright © Anna Mantzourani, 2020
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).

Άννα Μαντζουράνη (2020)

Παραμετρική διερεύνηση της απόκρισης χαλύβδινων πετασμάτων υπό φορτία εκρήξεων
Διπλωματική Έργασία ΕΜΚ ΔΕ 2020 7
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Anna Mantzourani 2020

Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2020 7

Parametric investigation of the response of steel panels under blast loading
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Κ. Χάρη Γαντέ για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο πολύ ενδιαφέρον αντικείμενο, καθώς και για την πλήρη καθοδήγηση του καθ'όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Η συμβολή του στο πόνημα αυτό ήταν καθοριστική και η βοήθεια του ανεκτίμητη στην επίλυση των προβλημάτων που εμφανίζονταν. Με εύστοχες παρατηρήσεις πάντα με οδηγούσε στη σωστή πορεία εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Ορέστη Ιωάννου που με βοήθησε σε όλα τα στάδια της εργασίας, παρέχοντας μου χρήσιμες πληροφορίες και δεδομένα, καθώς και συμβουλές σχετικά με τη χρήση του λογισμικού που χρησιμοποίησα. Σε όποιο πρόβλημα ή απορία ανέκυπτε, με καθοδηγούσε στην κατανόηση και την επίλυση του.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2020 7

Παραμετρική διερεύνηση της απόκρισης χαλύβδινων πετασμάτων υπό φορτία εκρήξεων

Άννα Μαντζουράνη

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές
Συνεπιβλέπων: Ορέστης Ιωάννου

Μάρτιος 2020

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη σύγχρονη εποχή δεν είναι λίγες οι φορές που συναντάμε την έννοια της έκρηξης. Τα παλαιότερα χρόνια συναντούσαμε τις εκρήξεις μόνο ως σπάνια φυσικά φαινόμενα, όμως η ανθρώπινη παρέμβαση και η διαρκής τρομοκρατική απειλή έχουν αυξήσει σε πολύ μεγάλο βαθμό τη συχνότητα τους. Με αφετηρία τις τρομοκρατικές επιθέσεις στις Η.Π.Α. στο Παγκόσμιο Κέντρο Εμπορίου (World Trade Center) το 2001, οι εκρήξεις θεωρούνται ένας από τους σημαντικότερους κινδύνους της σύγχρονης εποχής με εξαιρετικά δυσμενείς συνέπειες για την κοινωνία.

Σε επίπεδο κατασκευής, τα εκρηκτικά φαινόμενα συγκαταλέγονται στις τυχηματικές δράσεις, όπως ο σεισμός, που ενδέχεται να εκδηλωθούν κατά τη διάρκεια ζωής του έργου και μπορεί να προκαλέσουν μερική ή πλήρη προοδευτική κατάρρευση του. Σε μία έκρηξη τρομοκρατικού χαρακτήρα που συμβαίνει κυρίως εξωτερικά ενός κτιρίου, αναπτύσσεται υπερηχητικό κύμα που διαδίδεται μέσω του αέρα και ασκεί ακαριαία πίεση, όμοια με αυτή του ανέμου αλλά πολλαπλάσιας έντασης, ενώ δευτερευόντως αναπτύσσεται κύμα το οποίο διαδίδεται μέσω του εδάφους, δημιουργείται τοπικά κρατήρας, αυξάνεται η θερμοκρασία και ενδεχομένως να εκδηλώνεται περιορισμένου εύρους φωτιά. Το γεγονός ότι το φορτίο ασκείται σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα το καθιστά δυναμικό και η μελέτη του φαινομένου είναι αρκετά πολύπλοκη. Ωστόσο, παρ' όλο που η θωράκιση των κατασκευών υπό φορτία εκρήξεων κρίνεται απαραίτητη, ο σχεδιασμός των κατασκευών εξακολουθεί να εκτελείται μόνο υπό συμβατικά φορτία.

Ειδικότερα, δεχόμενη το φορτίο μιάς έκρηξης, η επικάλυψη μιας κατασκευής κατέχει βαρύνοντα ρόλο ασφάλειας, καθώς σε περίπτωση που αστοχήσει θα αναπτυχθεί εσωτερικά της κατασκευής υψηλή πίεση και θα μεταφερθούν θρύμματα. Συνεπώς, απαιτείται η διερεύνηση της συμπεριφοράς της επικάλυψης, η οποία αποτελείται από πολύ μεγάλη ποικιλία υλικών (πανέλα από χάλυβα, αλουμίνιο, σκυρόδεμα, ξύλο, μέχρι υαλοπίνακες, πολυκαρβονικά και κεραμίδια) καθώς και τρόπου κατασκευής.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία προσομοιώνονται, αναλύονται, αξιολογούνται και συγκρίνονται πετάσματα επικάλυψης μορφής επίπεδου μεταλλικού ελάσματος χωρίς / με νευρώσεις έναντι έκρηξης. Η μελέτη πραγματοποιείται μέσω εξειδικευμένου λογισμικού με δυναμικές αναλύσεις με

ενσωματωμένες μη γραμμικότητες γεωμετρίας και υλικού, καθώς και εξειδικευμένους νόμους υλικού, οι οποίοι να μπορούν να λάβουν υπόψη τον ρυθμό παραμόρφωσης, ο οποίος αλλάζει σημαντικά την απόκριση των υλικών σε περίπτωση έκρηξης. Διατηρώντας σταθερή τη χρονοϊστορία φόρτισης και τις συνοριακές συνθήκες των μοντέλων γίνεται παραμετρική ανάλυση κατά την οποία διαφοροποιείται μόνο ένας παράγοντας όπως το μήκος, η απόσταση μεταξύ των νευρώσεων, το πάχος των ελασμάτων, το πάχος των νευρώσεων καθώς και η ποιότητα του χάλυβα, ενώ οι υπόλοιποι παραμένουν σταθεροί, προκειμένου να διαπιστωθεί η επίπτωση στην απόκριση.



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

DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ 2020 7

Parametric investigation of the response of steel panels under blast loading

Anna Mantzourani

Supervisor: Professor Charis Gantes
Co-supervisor: Orestis Ioannou

March 2020

ABSTRACT

Nowadays, the concept of an explosion is not rare to come across. In older times, an explosion was supposed to be only an infrequent physical event, such as an explosion of a volcano. However, the human interference and the continuous terrorist threat have raised their frequency to a large scale. Starting with the terrorist attacks at the World Trade Center in 2001, New York USA, explosions are considered one of the most important risks of our era, with extremely adverse effects for the society.

For structures, explosive events are considered as random phenomena, like earthquakes, that may occur during the life span of the structure and are likely to cause its partial or complete progressive collapse. When a terrorist explosion takes place, mainly outside of a building, a supersonic blast wave is developed and transferred through the air, which applies pressure similar to the wind's but of much larger intensity. Secondly, a wave that transfers through the ground is developed, creating a crater, rising the temperature and possibly causing limited fire. The fact that the load is implemented for a very short amount of time makes the phenomenon dynamic and complicated to study. Nevertheless, although the design of structures to resist blast loading seems to be indispensable, this is only carried out in rare cases of very important structures.

Specifically, when loaded by blast, the cladding of a structure plays an important safety role. In case of its failure, high pressure will develop inside the construction and splinters will be transferred. As a result, an investigation of the response of the cladding is required. Cladding is characterized by a wide variety of materials (steel panels, aluminum, concrete, wood, panes, polycarbonates and even tiles) and construction methods.

In the present diploma thesis steel panel without / with stiffeners under explosion are simulated, analyzed, evaluated and compared. For that purpose, a specialized software is employed and dynamic analyses including geometrical and material non-linearity are carried out, adopting special material laws that can take into consideration the high strain rate effect, which changes significantly the strength of materials in case of an explosion. Maintaining the blast load and the boundary conditions of the models constant, a parametric investigation is performed, in which only one parameter changes

like the length of the plate, the distance between the stiffeners, the thickness of the plate, the thickness of the stiffeners and the quality of steel, while the other parameters remain constant, in order to draw conclusions about their influence on the panel response.

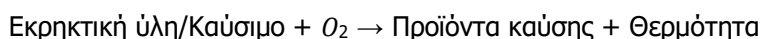
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Το φαινόμενο της έκρηξης.....	1
1.2	Στατιστική των σύγχρονων τρομοκρατικών επιθέσεων με εκρηκτικά.....	2
2	ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΝΟΣ ΕΚΡΗΚΤΙΚΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ	3
2.1	Εκρηκτικό φορτίο.....	3
2.2	Υλικό υπό ταχεία καταπόνηση - Μοντέλο Cowper-Symonds.....	7
2.3	Μη γραμμική συμπεριφορά.....	9
2.4	Σχεδιασμός κατασκευής υπό εκρηκτικό φόρτιο	9
3	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	13
3.1	Πλαγιοκάλυψη κτιρίων	14
3.2	Επίπεδο μεταλλικό έλασμα από χάλυβα S355.....	14
3.2.1	Αναλυτικό παράδειγμα ανάλυσης επίπεδου μεταλλικού ελάσματος από χάλυβα S355.....	14
3.3	Επίπεδη μεταλλική πλάκα με νεύρωση	18
3.3.1	Αναλυτικό παράδειγμα ανάλυσης επίπεδης πλάκας με νεύρωση.....	19
3.4	Κριτήρια βέλτιστου συνδυασμού αναλύσεων	24
3.5	Αξιοπιστία μοντέλου	25
4	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ	27
4.1	Αποτελέσματα αναλύσεων επίπεδης μεταλλικής πλάκας	27
4.2	Αποτελέσματα αναλύσεων πλάκας με νεύρωση.....	29
4.2.1	Επιρροή ποιότητας χάλυβα και πάχους ελάσματος νεύρωσης.....	32
4.2.2	Επιρροή απόστασης μεταξύ των νευρώσεων	39
4.2.3	Επιρροή μήκους πλάκας.....	49
4.2.4	Επιρροή πάχους πλάκας.....	58
4.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων.....	62
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	65
5.1	Περίληψη	65
5.2	Συμπεράσματα.....	65
5.3	Προτάσεις για περαιτέρω ανάλυση	66
6	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	67

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Το φαινόμενο της έκρηξης

Μελετώντας τη βιβλιογραφία, διαπιστώνεται ότι δεν υπάρχει κάποιος ακριβής ορισμός του φαινομένου της έκρηξης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι υπάρχουν πολλά είδη εκρήξεων καθώς δεν είναι σαφές που είναι ακριβέστερο να δοθεί έμφαση στον ορισμό, στο αίτιο της έκρηξης ή στο αποτέλεσμα και τις επιπτώσεις της. Οι περισσότεροι ορισμοί συγκλίνουν στο αποτέλεσμα της έκρηξης και όχι στο αίτιο πρόκλησής της. Ως αποτέλεσμα ορίζεται η πολύ γρήγορη απελευθέρωση ενέργειας και αερίων. Γενικά, έκρηξη ορίζουμε το προϊόν μιας εξώθερμης χημικής αντίδρασης, η οποία συμβαίνει σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα (της τάξης των ms) και παράγει μηχανικό έργο υπό την παρουσία απότομης αλλαγής της ενέργειας. Οι εκρήξεις χωρίζονται σε πολλά είδη όπως είναι φυσική, αστρική, χημική, πυρηνική, ηλεκτρική, μαγνητική, μηχανική έκρηξη ή έκρηξη ατμού. Κάποια παραδείγματα είναι η έκρηξη ενός ηφαιστείου, η κατεδάφιση κτιρίων με εκρηκτικά μέσα, η χρήση εκρηκτικών σε έργα υποδομής όπως σήραγγες, η βίαιη μείξη δυο υγρών σε διαφορετική θερμοκρασία. Κατά τη διεργασία της χημικής έκρηξης, συμβαίνει μια ταχεία χημική αντίδραση με την ταυτόχρονη απελευθέρωση θερμότητας, υπάρχει βίαιη εκτόνωση αερίων και αναθυμιάσεων ενώ δημιουργείται ωστικό κύμα. Για να δημιουργηθεί έκρηξη χρειάζεται να υπάρχει καύσιμη ύλη (π.χ. αέριο όπως το υδρογόνο ή σκόνη όπως το αλεύρι), μέσο οξειδωσης (το οξυγόνο στην ατμόσφαιρα) και πηγή ανάφλεξης (π.χ. θερμή επιφάνεια ή και ηλεκτρικός σπινθήρας). Όταν η καύσιμη ύλη αναμειχθεί με τον αέρα και η συγκέντρωση της καύσιμης ύλης είναι μέσα στα όρια έκρηξης, το μείγμα μπορεί να αναφλεγεί στην παρουσία μιας πηγής ανάφλεξης με επαρκή ενέργεια. Η έκρηξη, συντελείται σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:



Η έκρηξη συντελείται σε τρία στάδια τα οποία έχουν διαφορετική ταχύτητα το καθένα. Το πρώτο στάδιο είναι η καύση με ταχύτητα της τάξης των cm/sec, το δεύτερο η ανάφλεξη με ταχύτητες της τάξης των dm/sec και το τρίτο η έκρηξη με ταχύτητες km/sec. Οι εκρήξεις που συμβαίνουν από την καύση εύφλεκτων υλικών ή εκρηκτικών υλών ανήκουν όλες στις χημικές εκρήξεις. Παράλληλα δημιουργείται ωστικό κύμα το οποίο αποτελεί μια διαταραχή που λαμβάνει χώρα στην ατμόσφαιρα και γενικότερα στο μέσον στο οποίο συντελείται η έκρηξη και διαδίδεται φυγόκεντρα με σφαιρική συμμετρία. Το βασικό γνώρισμα του ωστικού κύματος είναι η απότομη αύξηση της πίεσης εντός του

σφαιρικού χώρου που περικλείει την έκρηξη. Στα περισσότερα είδη εκρήξεων δημιουργείται ωστικό κύμα και ο όγκος, που καταλαμβάνει η ύλη που εκρήγνυται, αυξάνει απότομα. Η απότομη μεταβολή του όγκου που καταλαμβάνει η ύλη προκαλεί απότομα διαφορά πίεσης στον περιβάλλοντα χώρο και αυτή η διαφορά μεταφέρεται στην περιρρέουσα ύλη με τη μορφή ωστικού κύματος, γι' αυτό και μια έκρηξη μπορεί να είναι καταστροφική.

Σύνθετες ή απλές ουσίες που περιέχουν μεγάλη ποσότητα αποθηκευμένης ενέργειας που υπό ορισμένες συνθήκες μπορεί να απελευθερωθεί απότομα προκαλώντας έκρηξη, ονομάζονται εκρηκτικές ύλες. Χωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες: μηχανικές, πυρηνικές και χημικές. Μηχανικές εκρήξεις οφείλονται στην απότομη μεταβολή κατάστασης από υγρό σε αέριο, ή στην απότομη θέρμανση αερίου σε κλειστό χώρο. Παράδειγμα πυρηνικών εκρηκτικών υλών είναι η σχάση ισοτόπων, όπως του πλουτωνίου 239. Τέλος οι χημικές εκρηκτικές ύλες έχουν τη μεγαλύτερη εφαρμογή σε θέματα μηχανικού. Διακρίνονται σε χαμηλής και σε υψηλής εκρηκτικότητας ύλες. Υψηλής εκρηκτικότητας ύλες, όπως το TNT, χαρακτηρίζονται για την εξαιρετικά μεγάλη ταχύτητα καύσης και την ανάπτυξη υπερπρίεσεων.

1.2 Στατιστική των σύγχρονων τρομοκρατικών επιθέσεων με εκρηκτικά

Στις μέρες μας, η τρομοκρατία, υπό την μορφή των βομβιστικών επιθέσεων και εκρήξεων που έχουν στόχο άμαχο πληθυσμό, εμπνεόμενη από τον φανατισμό και στηριζόμενη στα μέσα που της προσφέρει η ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη, καταφέρνει να προκαλεί τραυματισμούς, θανάτους, φόβο και χάος.

Τα συμβατικά εκρηκτικά αποτελούν τα πλέον συνηθισμένα εργαλεία των τρομοκρατικών επιθέσεων, εξαιτίας της σχετικής ευκολίας με την οποία κατασκευάζονται και χρησιμοποιούνται. Με τη χρήση εκρηκτικών μηχανισμών, και ιδιαίτερα σε περιπτώσεις επιθέσεων αυτοκτονίας, παρατηρείται αποτελεσματικότητα του σκοπού του τρομοκράτη, μιας και αυτή η μέθοδος εξασφαλίζει υψηλή θνησιμότητα και ακρίβεια στόχου. Μάλιστα, σε αντίθεση με την κοινή γνώμη, που θέλει τα μη συμβατικά όπλα να είναι πιο απειλητικά, ο αριθμός των τραυματισμών, των θανάτων και των καταστροφών των δομικών έργων φαίνεται να είναι υψηλότερος συγκριτικά με εκείνον που προκλήθηκε λόγω χημικών και βιολογικών όπλων.

Σύμφωνα με μια ανάλυση που πραγματοποιήθηκε από τη Global Terrorism Database (GTD), για τα έτη μεταξύ του 1970 και του 2014, πραγματοποιήθηκαν παγκοσμίως παραπάνω από 58.000 τρομοκρατικές εκρήξεις. Στη Μέση Ανατολή παρουσιάστηκαν τα περισσότερα περιστατικά, πιο συγκεκριμένα το 26,9% των συνολικών επιθέσεων, ενώ στην Ευρώπη, η οποία κατέχει την τέταρτη θέση, αντιστοιχεί το 13,2% αυτών. Παράλληλα, παρατηρήθηκε ότι κάθε χρόνο ο αριθμός των βομβιστικών επιθέσεων τείνει να αυξάνεται.

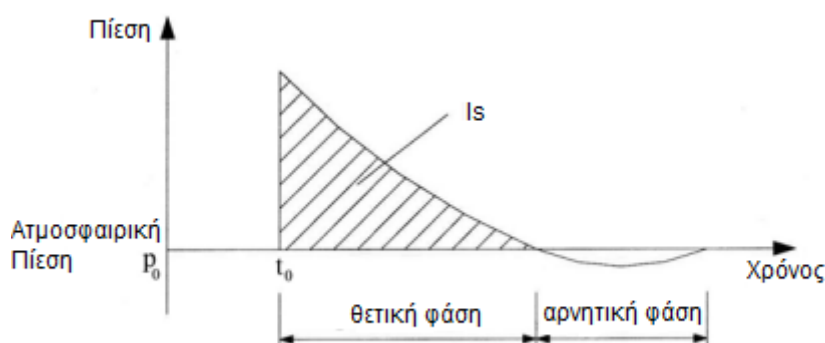
Επίσης, 41 δημοσιεύσεις κάνουν λόγο για 167 τρομοκρατικές εκρήξεις εκ των οποίων το 3,9% αναφέρει κατάρρευση κτιρίων, το 60,8% πραγματοποιούνται σε κλειστό χώρο, ενώ το 23,5% και το 11,8% σε ανοιχτό και σε σχετικά περιορισμένο χώρο αντίστοιχα. Συνολικά σε κάθε επίθεση αντιστοιχούν περίπου 32 θάνατοι και 180 τραυματισμοί, ενώ σε επιθέσεις όπου παρατηρήθηκε κατάρρευση κτιρίων ο αντίστοιχος αριθμός των θανάτων είναι αρκετά ανεβασμένος.

Αρκετές αιματηρές βομβιστικές επιθέσεις συγκλόνισαν τη σύγχρονη εποχή, αποκαλύπτοντας τα δεινά που μπορούν να προκαλέσουν. Χαρακτηριστικό και πιο πρόσφατο παράδειγμα αποτελεί η βομβιστική επίθεση αυτοκτονίας με τρομοκρατικό χαρακτήρα κλειστού χώρου, που έλαβε χώρα στη Σρι Λάνκα στις 11 Απριλίου 2019. 258 άτομα έχασαν τη ζωή τους και περισσότερα από 500 τραυματίστηκαν.

2 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΝΟΣ ΕΚΡΗΚΤΙΚΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ

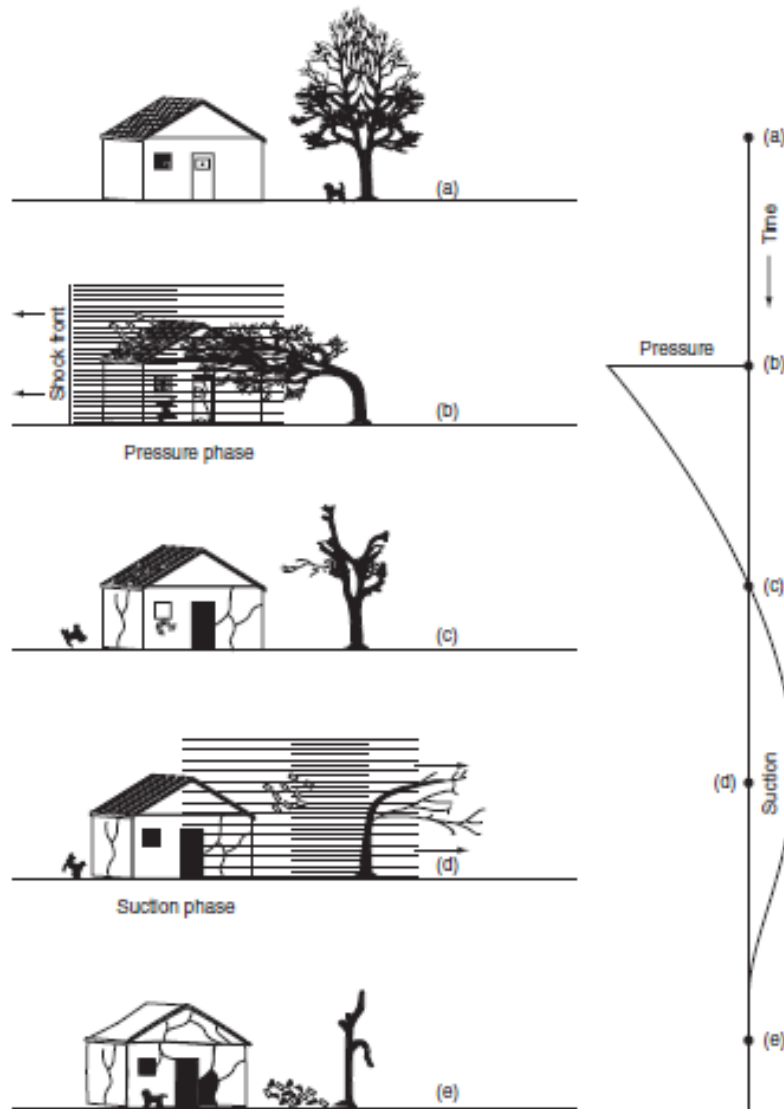
2.1 Εκρηκτικό φορτίο

Για να γίνει κατανοητή η ειδική συμπεριφορά της έκρηξης πρέπει να μετατραπεί το φαινόμενο σε ένα διάγραμμα τάσης-χρόνου. Συναντάμε δύο φάσεις κατά τη διάρκειά του. Το ωστικό κύμα που αναπτύσσεται, διαδίδεται στον αέρα με υπερηχητική ταχύτητα, φτάνει στην κατασκευή και έχει ως αποτέλεσμα μη συνεχή αύξηση πίεσης, πυκνότητας και θερμοκρασίας. Η επίδραση του μετώπου του εκρηκτικού φαινομένου φθίνει μέχρι η τιμή της πίεσης να φτάσει την ατμοσφαιρική, ονομάζεται θετική φάση του εκρηκτικού φαινομένου με διάρκεια μερικά ms. Η δεύτερη φάση που παρατηρείται κατά τη διάρκεια ενός εκρηκτικού φαινομένου είναι η αρνητική που ακολουθεί της θετικής με πιέσεις μικρότερες της ατμοσφαιρικής.



Διάγραμμα 2-1: Οι φάσεις ενός εκρηκτικού φαινομένου

Σύμφωνα με τη δημοσίευση "The Negative Phase of Blast Load", υπογραμμίζεται η σημασία της αρνητικής φάσης του εκρηκτικού φαινομένου. Ακόμα και αν στην αρνητική φάση η πίεση είναι πολύ μικρότερη σε απόλυτη τιμή από τη θετική, και λόγω αυτού συχνά αμελείται στον σχεδιασμό, μπορεί να προκαλέσει εξίσου σημαντικές ζημιές στην κατασκευή. Για παράδειγμα, ένα κτίριο μπορεί να μην υποστεί ζημιές στη θετική φάση αλλά να καταρρεύσει κατά τη διάρκεια της αρνητικής. Παρακάτω, παρουσιάζεται σχηματικά η επίδραση του εκρηκτικού φαινομένου.



Εικόνα 2-1: Συνέπειες της έκρηξης

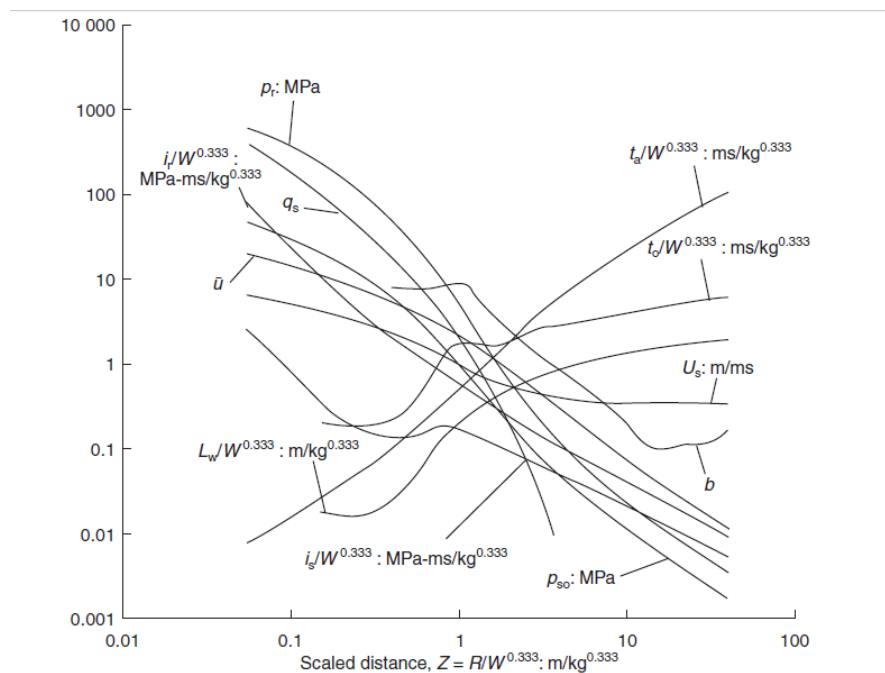
Για την πρόβλεψη του εκρηκτικού φορτίου έχει συμβάλει η ανάπτυξη του τομέα της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (computational fluid dynamics). Για τον προσδιορισμό της χρονοϊστορίας αρχικά είναι απαιτούμενη η επιλογή του υλικού της έκρηξης. Η χρήση του TNT ως εκρηκτική ύλη αναφοράς είναι παγκόσμια σύμβαση. Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί διαφορετική εκρηκτική ύλη πρέπει να μετατραπεί σε ισοδύναμη μάζα TNT. Δύο είναι τα σημαντικά μεγέθη από τα οποία προκύπτει και η τελική χρονοϊστορία η μάζα $W(\text{kg})$ και η απόσταση $R(\text{m})$ που θα γίνει η χρήση του TNT. Με την αδιαστατοποιημένη απόσταση κλίμακας Z , Εξ. (2-1) και τις εξισώσεις Kingery-Bulmash (1984)

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (2-1)$$

προκύπτουν τα μεγέθη p_s (kPa) η μέγιστη στατική πίεση ή μέγιστη υπερπίεση, ο απαιτούμενος χρόνος άφιξης του εκρηκτικού κύματος t_a καθώς και η διάρκεια της θετικής φάσης t_0 , μεγέθη που χρειάζονται για τον προσδιορισμό της εξίσωσης της θετικής φάσης, Εξ. (2-2)

$$p(t) = p_s \left[1 - \frac{t}{t_0} \right] \exp \left\{ -\frac{bt}{t_0} \right\} \text{ για } t_a < t < t_0 \quad (2-2)$$

όπου b η παράμετρος του εκρηκτικού κύματος που προκύπτει από το παρακάτω διάγραμμα με την κατάλληλη τιμή της αδιαστατοποιημένης απόστασης κλίμακας Z.



Διάγραμμα 2-2: Υπολογισμός b

Το μέγεθος i_s αποτελεί το εμβαδό της γραφικής παράστασης της πίεσης ως προς το χρόνο από τη στιγμή άφιξης του κύματος t_a μέχρι το τέλος της θετικής φάσης t_d και χρειάζεται για τους υπολογισμούς της αρνητικής φάσης.

Για την εξίσωση της αρνητικής φάσης, αρχικά υπολογίζεται η παράμετρος της αρνητικής φάσης C_r με την εξίσωση

$$C_r = \frac{1,9Z - 0,45}{Z} \text{ για } Z > 0,5 \tag{2-3}$$

και τη βελτιωμένη αδιαστατοποιημένη απόσταση α όπου

$$\alpha = 1,52Z^{0,38} \text{ για } 0,1 < Z < 30 \tag{2-4}$$

και τελικά τη διάρκεια της αρνητικής φάσης t_d' όπου

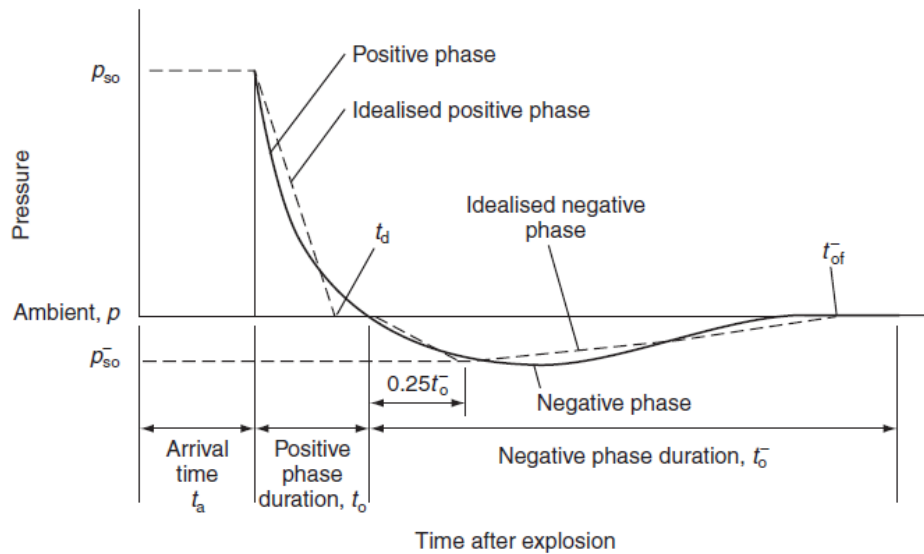
$$t_d' = \frac{16i_s'}{9p_{s'}} \tag{2-5}$$

όπου $p_{s'}$ η μέγιστη τιμή της υποπίεσης και i_s' το εμβαδό της γραφικής παράστασης της πίεσης ως προς το χρόνο της αρνητικής φάσης με προσεγγιστική τιμή

$$i_s' = C_r \frac{p_{std}}{\alpha^2} e^{-\alpha} \tag{2-6}$$

Με υπολογισμένα αυτά τα μεγέθη μπορεί να υπολογιστεί και η σχέση πίεσης-χρόνου της αρνητικής φάσης της έκρηξης

$$p r'(t) = -ps' \left(\frac{6,75(t-t_d)}{td'} \right) \left(1 - \frac{t-t_d}{td'} \right)^2 \text{ για } t_d < t < t_d + t_d' \quad (2-7)$$



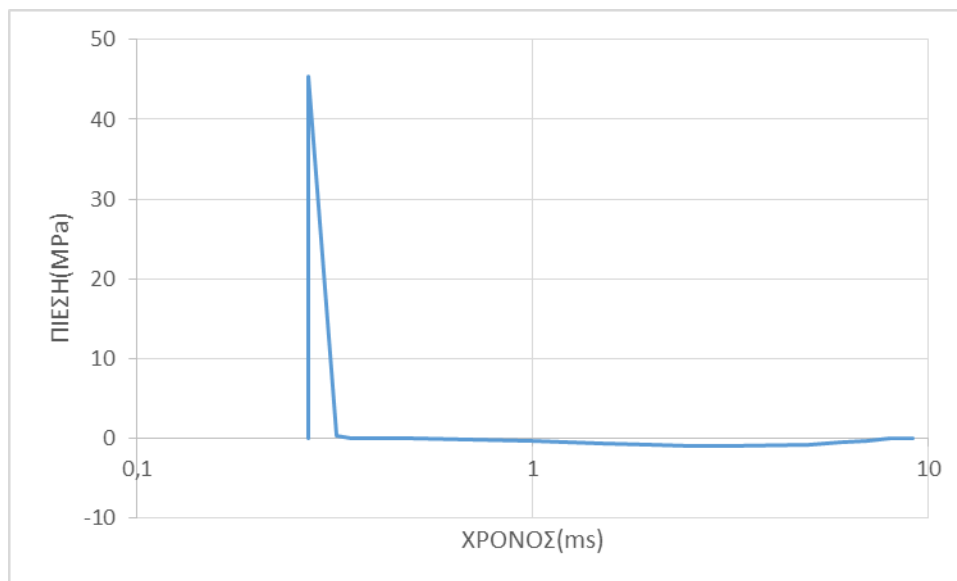
Διάγραμμα 2-3 Τυπικό διάγραμμα πίεσης-χρόνου για εκρηκτικό κύμα στον αέρα

Στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε ως εκρηκτικό υλικό 10kg TNT σε απόσταση 1m από την κατασκευή. Επιλέχθηκε αυτός ο συνδυασμός καθώς αναπαριστά μία έκρηξη κοντινού πεδίου, όχι επαφής. Πραγματοποιείται μία έκρηξη εξωτερικά και κοντά στην κατασκευή. Τα 10kg TNT μπορεί να τοποθετηθούν ίσως σε μία τσάντα από κάποιον τρομοκράτη και έτσι να μην κινήσει υποψίες για το σκοπό του. Από τις παραπάνω εξισώσεις προέκυψαν τα μεγέθη:

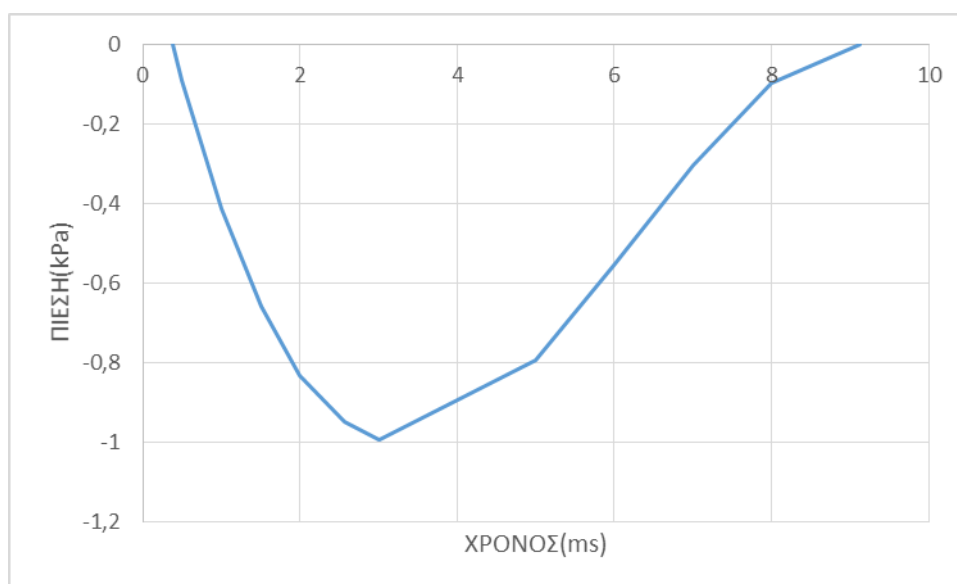
Πίνακας 2-1: Χαρακτηριστικά μεγέθη εκρηκτικού φαινομένου για 10kg σε απόσταση 1m

Weight of TNT	10kg	Distance R	1m
Z	0,46	b	10
Cr	3,05	a	2,01
ps	45,404MPa	ps'	-100kPa
ta	0,27ms	td	0,108ms
td'	8,75ms		

και η χρονιοιστορία με διάγραμμα πίεσης χρόνου



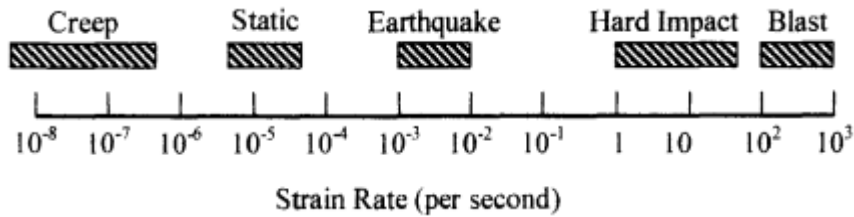
Διάγραμμα 2-4: Πίεση- χρόνος για 10kg TNT σε απόσταση 1m από την κατασκευή, με λογαριθμική κλίμακα



Διάγραμμα 2-5: Πίεση-χρόνος για 10kg TNT σε απόσταση 1m από την κατασκευή, λεπτομέρεια αρνητικής φάσης

2.2 Υλικό υπό ταχεία καταπόνηση - Μοντέλο Cowper-Symonds

Αξιοσημείωτο είναι ότι τα υλικά όταν υπόκεινται σε φορτίο με ταχεία καταπόνηση (high strain rate effect) παρουσιάζουν βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Το συμπέρασμα αυτό έχει βγει από πολλές πειραματικές δοκιμές που υπογραμμίζουν ότι η μεγάλη εναλλαγή της τάσης και ο ακαριαίος τρόπος φόρτισης είναι τα δύο σημαντικά στοιχεία που προκαλούν το φαινόμενο αυτό. Ειδικά αν ασχολούμαστε με ένα φαινόμενο όπως η έκρηξη η διάρκεια της οποίας είναι μερικά ms κατά την οποία αναπτύσσεται πολλαπλάσιου μεγέθους πίεση σε σχέση με τα μεγέθη που καταπονούν συνήθως την κατασκευή όπως ο άνεμος που μπορούν να παρουσιάζουν διαφορές τριών τάξεων μεγέθους, αλλάζει ριζικά τον τρόπο δυναμικής απόκρισης της κατασκευής και της συμπεριφοράς του υλικού.



Εικόνα 2-2: Ρυθμός παραμόρφωσης

Η φύση του φαινομένου με τη θετική φάση με την υπερπίεση και ακολούθως την αρνητική φάση με την υποπίεση, όπως προαναφέρθηκε δημιουργούν αυτές τις αλλαγές στο υλικό που πρέπει να ληφθούν υπόψη στο σχεδιασμό. Παρ' όλο που γνωρίζουμε ότι οι χαρακτηριστικές τιμές του υλικού θα αυξηθούν, δεν μπορούμε να είμαστε σίγουροι για την τιμή των αυξητικών συντελεστών. Πρέπει να καταφύγουμε σε εμπειρικά μοντέλα αντοχής όπως είναι το Cowper-Symonds και το Johnson-Cook, που η χρήση τους ενδείκνυται για φαινόμενα ταχείας καταπόνησης. Ιδιαίτερα το Cowper-Symonds, αποτελεί ένα απλό ελαστοπλαστικό μοντέλο που λαμβάνει υπόψη του το μεγάλο ρυθμό καταπόνησης και αυξάνει την αντοχή των υλικών όταν σε αυτά εφαρμόζονται πλαστικές παραμορφώσεις. Το εμπειρικό αυτό μοντέλο έχει τα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα με μικρό ποσοστό λάθους σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις, ειδικά στο χάλυβα. Γενικευμένα, εκφράζεται μαθηματικά

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{\rho}} * (\sigma_0 + \beta E \epsilon_{pl}^{eff}) \right] \quad (2-8)$$

όπου σ_0 η αρχική τάση, $\dot{\epsilon}$ ο ρυθμός καταπόνησης, C και ρ οι παράμετροι Cowper-Symonds, ϵ_{pl} η πλαστική παραμόρφωση. Στην ανάλυση που έγινε σε αυτή την εργασία χρησιμοποιήθηκε μια διαφοροποιημένη εκδοχή του μοντέλου όπως δόθηκε από το λογισμικό Ansys με την εξίσωση:

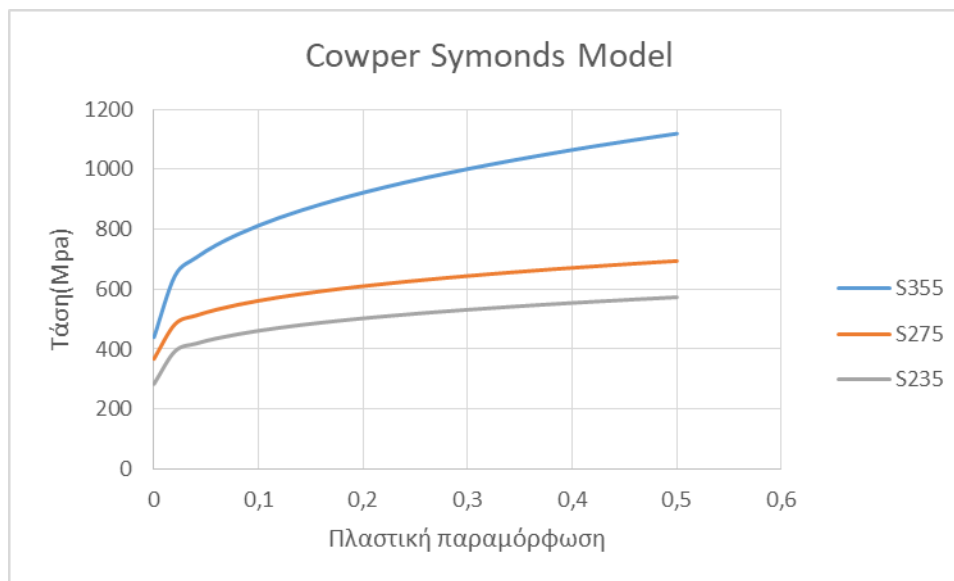
$$Y = (A + B * \epsilon_{pl}^n) \left(1 + \frac{\epsilon_{pl}^{\frac{1}{D}}}{D} \right)^q \quad (2-9)$$

όπου A η αρχική τάση, B ο ρυθμός καταπόνησης, ϵ_{pl} η πλαστική παραμόρφωση και D και q οι παράμετροι Cowper-Symonds.

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, χρησιμοποιείται σαν υλικό ο χάλυβας S355, S275 και S235. Προκειμένου να συμπεριληφθούν τα φαινόμενα ταχείας καταπόνησης είναι επιτακτική η χρήση του παραπάνω μοντέλου για την ακρίβεια των αναλύσεων. Δύσκολο κομμάτι αποτέλεσε ο ορισμός των παραμέτρων για κάθε περίπτωση καθώς δεν υπάρχουν σαφείς οδηγίες χρήσης του. Έτσι, από πειράματα λήφθηκαν χαρακτηριστικές τιμές των καμπυλών τάσης παραμόρφωσης οι οποίες επαληθεύονται από τις παρακάτω τιμές.

Πίνακας 2-2: Παράμετροι μοντέλου Cowper-Symonds

Τύπος	A	B	n	D	q
S355	440	865	0.37	38370	2.395
S275	367.7	400	0.32	38370	2.395
S235	284	350	0.3	38370	2.395



Διάγραμμα 2-6: Σχέση τάσης και πλαστικής παραμόρφωσης χαλύβων S355, S275 και S235 με το εμπειρικό μοντέλο Cowper-Symonds.

2.3 Μη γραμμική συμπεριφορά

Βασικός στόχος σχεδιασμού μιας κατασκευής αποτελεί η επίτευξη ασφάλειας και οικονομίας υλικού. Συνεπώς, και ο σχεδιασμός μιας κατασκευής έναντι εκρηκτικού φορτίου θα πρέπει να έχει αυτήν την κατεύθυνση. Η φύση του εκρηκτικού φαινομένου έχει δύο κύρια χαρακτηριστικά όπως έχει προαναφερθεί:

- Μεγάλες παραμορφώσεις

Παρατηρείται έντονη αύξηση της παραμόρφωσης για μικρό διάστημα επιβολής του φορτίου. Παράλληλα, η πλέον παραμορφωμένη γεωμετρία διαφέρει σημαντικά από την αρχική απαραμόρφωτη. Επομένως, οι κλασσικές μέθοδοι ανάλυσης οδηγούν σε σημαντικά σφάλματα και πρέπει να αποφεύγονται.

- Ειδικοί νόμοι υλικών

Λόγω έντονου ρυθμού παραμόρφωσης, το υλικό είναι προτιμότερο να υπαχθεί σε ειδικούς νόμους υλικού. Λόγω του μεγάλου επιπέδου φόρτισης, ο χάλυβας οδηγείται σε μετελαστική συμπεριφορά υπερβαίνοντας το όριο διαρροής. Κάτι τέτοιο οδηγεί στην κατάργηση της αναλογίας μεταξύ επιβαλλόμενων φορτίων και αναπτυσσόμενης έντασης.

Συνεπώς, στην ανάλυση ενός εκρηκτικού φαινομένου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη μη γραμμικές συμπεριφορές υλικού και γεωμετρίας. Με αυτόν τον τρόπο, ο σχεδιασμός ανταποκρίνεται πιο πολύ στην πραγματικότητα, οι ιδιότητες του υλικού εκμεταλλεύονται σωστά, χωρίς να γίνει υπερδιαστασιολόγηση και έτσι προκύπτει ένας ασφαλής και οικονομικός σχεδιασμός.

2.4 Σχεδιασμός κατασκευής υπό εκρηκτικό φόρτιο

Πιο ειδικά, όσον αφορά τη μελέτη μιας κατασκευής υπό εκρηκτικό φορτίο η πορεία που πρέπει να ακολουθηθεί βρίσκεται ακόμη σε πειραματικό στάδιο. Δεδομένου του ότι η έκρηξη αποτελεί ένα ακραίο γεγονός με πολύ μικρή πιθανότητα να συμβεί και του ότι η έννοια της τρομοκρατικής απειλής αποτελεί σχετικά νέο όρο, παρατηρείται έλλειψη κανονισμών τόσο σε εθνικό όσο και σε ευρωπαϊκό επίπεδο.

Δυστυχώς, η σημερινή κατάσταση επιβάλλει σε ορισμένα κτίρια, όπως ειδικού ενδιαφέροντος ή σε πολυσύχναστες εγκαταστάσεις, να υπάρχει πρόβλεψη έναντι εκρηκτικού φορτίου. Αν και στην παρούσα εργασία εξετάζονται οι συνέπειες μιας τρομοκρατικής επίθεσης, οι αρχές είναι ίδιες για κάθε εκρηκτικό φαινόμενο.

Αναφορικά με τον σχεδιασμό, το σκεπτικό ενός μηχανικού πρέπει να είναι πιο σύνθετο και πολύπλευρο. Δεν πρέπει να ληφθεί μόνο ως μια δυναμική φόρτιση που αναπτύσσεται σε ακαριαίο χρόνο. Αντίστοιχα με το σεισμικό σχεδιασμό μιας κατασκευής, δίνεται ιδιαίτερο βάρος στην έννοια του βαθμού της προστασίας, όπου το κόστος της προστασίας με το κόστος της πιθανής απώλειας ζωής πρέπει να έρθουν σε ισορροπία. Η αστοχία των δομικών μελών, οι απώλειες ζωής και ο κοινωνικός πανικός είναι παράγοντες που πρέπει να ελαχιστοποιηθούν αν συμβεί κάποια τρομοκρατική απειλή. Σχεδιάζοντας τις κατασκευές με ελαστική απόκριση υπό εκρηκτικά φορτία είναι μια μη ρεαλιστική και αντιοικονομική προσέγγιση.

Γενική αρχή του σχεδιασμού κατασκευών υπό εκρηκτικά φορτία είναι αρχικά να υπάρχει η δυνατότητα διαφυγής όλων όσων βρίσκονται μέσα στο κτίριο (σταδιακή κατάρρευση). Αυτή είναι και η αφετηρία της φιλοσοφίας του σχεδιασμού. Πιο ειδικά, μια ολοκληρωμένη «αντιτρομοκρατική» μελέτη πρέπει να εξασφαλίζει τις εξής προδιαγραφές:

- Αποτροπή επίθεσης έχοντας μέσω πλάνου ασφάλεια και αμυντικούς μηχανισμούς υποδεικνύοντας ότι μια επίθεση έχει χαμηλό ποσοστό επιτυχίας
- Κάλυψη των σημαντικών δομικών μελών της κατασκευής και αποπροσανατολισμός ώστε να προκύψει μία λιγότερη επιτυχημένη επίθεση
- Παύση της επίθεσης σε ένα πιθανό στόχο με φυσικά εμπόδια
- Άμβλυση των συνεπειών της επίθεσης εφόσον πραγματοποιηθεί έχοντας ενισχύσει την κατασκευή με τέτοιο τρόπο ώστε να απορροφήσει την ενέργεια της έκρηξης

Ο τελευταίος τρόπος προστασίας έναντι εκρηκτικών φορτίων αφορά και το θέμα αυτής της εργασίας.

Εφόσον αποφασιστεί να πραγματοποιηθεί ο σχεδιασμός μιας κατασκευής και υπό φορτία έκρηξης θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι παρακάτω ειδικές παράμετροι:

- Πρόκειται για τυχηματικό γεγονός
- Αξιολογώντας τη σημασία και τον κίνδυνο του έργου αποφασίζεται το μέγεθος της έκρηξης με δύο παράγοντες: το βάρος του εκρηκτικού μηχανισμού και η απόσταση του από το έργο
- Επιτρέπονται οι μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις
- Οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών ενισχύονται

Ακολουθώντας, η επιλογή της θέσης που πραγματοποιείται μια έκρηξη έχει διαφορετικό αντίκτυπο στην μελέτη, εσωτερικά ή εξωτερικά του κτιρίου καταπονούνται διαφορετικά μέρη της κατασκευής. Αντίστοιχης σημασίας επιλογή αποτελεί και αυτή της μάζας του εκρηκτικού υλικού, ή αλλιώς του τρόπου με τον οποίο θα λάβει χώρα μια έκρηξη. Ο συνδυασμός αυτών των δύο επιλογών καθορίζει και τα χαρακτηριστικά του εκρηκτικού φορτίου.

Σε αυτή την εργασία μελετάται έκρηξη που συμβαίνει εξωτερικά της κατασκευής. Σε μία έκρηξη που λαμβάνει χώρα εξωτερικά του κτιρίου, κυρίαρχο ρόλο παίζει η συμπεριφορά της επικάλυψης του. Ζητούμενο είναι η επικάλυψη να επιβιώσει της ασκούμενης πίεσης του εκρηκτικού κύματος χωρίς να αστοχήσει και να επιτρέψει στο κύμα να εισέλθει στο εσωτερικό της κατασκευής.

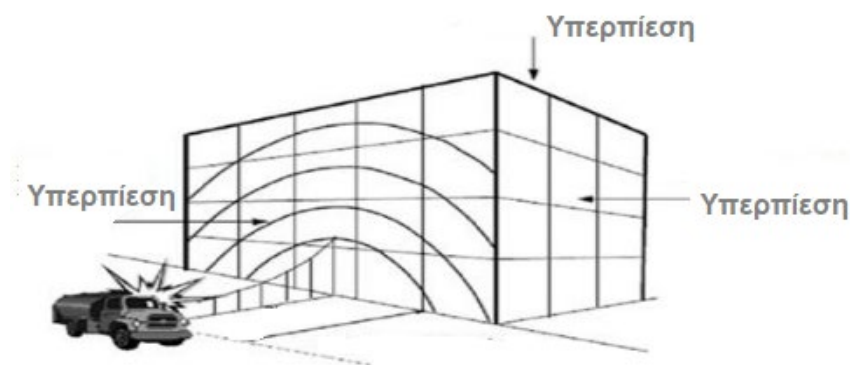
Συνοψίζοντας, η μελέτη και η αξιολόγηση μιας κατασκευής έναντι εκρηκτικού φορτίου είναι δύσκολη καθώς το φαινόμενο είναι πολύπλοκο και χρειάζεται γνώση της δυναμικής απόκρισης των δομικών

μελών της. Αυτό θα πραγματοποιηθεί με προσέγγιση βάσει κινδύνου εκτιμώντας τη σημασία του έργου και την πιθανότητα εμφάνισης τέτοιου γεγονότος στο χρόνο ζωής του. Σχηματικά, για τη μελέτη μια κατασκευής υπό εκρηκτικό φορτίο πρέπει να ακολουθηθούν τα εξής βήματα:

Εκτίμηση κινδύνου → Προσδιορισμός φορτίου → Μοντελοποίηση →
Ανάλυση → Αξιολόγηση

3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Κατά την διάρκεια μιας έκρηξης που συμβαίνει εξωτερικά ενός κτιρίου, αναπτύσσεται εκρηκτικό κύμα. Αρχικά, την πίεση που ασκείται αναλαμβάνει η επικάλυψη του φορέα, έπειτα το φορτίο διαδίδεται στις τεγίδες/μηκίδες και καταλήγει στα κύρια δομικά μέλη και από εκεί στη θεμελίωση. Μέσα σε αυτόν τον κρίκο, η επικάλυψη έχει βαρύνοντα ρόλο καθώς σε περίπτωση που αστοχήσει θα αναπτυχθεί εσωτερικά της κατασκευής πίεση και θα μεταφερθούν θρύμματα. Κάτι τέτοιο, ειδικά σε ένα πολυσύχναστο κτίριο είναι πιθανό να έχει πολύ άσχημες συνέπειες και δυστυχώς να καταστήσει επιτυχημένη μια τρομοκρατική ενέργεια. Σε αυτό το πλαίσιο, κρίνεται πολύ σημαντική η απόκριση της επικάλυψης σε έκρηξη. Λόγω της ιδιαιτερότητας των επικαλύψεων δεν υπάρχει πρότυπη μεθοδολογία υπολογισμού τους, καθώς συναντάται παράλληλα και μεγάλη ποικιλία υλικών αλλά και τρόπων κατασκευής. Υπογραμμίζοντας επίσης τη δυναμική φύση ενός τέτοιου φαινομένου, προστίθεται επιπλέον πολυπλοκότητα στο πρόβλημα. Με τη χρήση κατάλληλων εργαλείων που θα έχουν τη δυνατότητα να συμπεριλάβουν τις ιδιαιτερότητες του προβλήματος, κρίνουμε ενδιαφέρουσα τη συμπεριφορά τυπικών ειδών επικάλυψης που εφαρμόζοντας συχνά γύρω μας υπό εκρηκτικό φορτίο. Στην παρούσα εργασία, για κάθε επιλεγμένο είδος επικάλυψης θα πραγματοποιηθεί προσομοίωση και ανάλυση. Από τα αποτελέσματα που θα προκύψουν, θα αξιολογηθεί η επιρροή των διαφόρων παραμέτρων του προβλήματος. Τέλος, σκοπός της εργασίας είναι να προταθεί ένας κατάλληλος συνδυασμός των παραμέτρων και να συγκριθεί η απόκριση των τυπικών ειδών.



Εικόνα 3-1: Έκρηξη εξωτερικά μιας κατασκευής

3.1 Πλαγιοκάλυψη κτιρίων

Προκειμένου να ολοκληρωθεί μία κατασκευή πρέπει να προστεθούν στην φέρουσα κατασκευή τα στοιχεία πλήρωσης. Στις κατασκευές με μεταλλικό φέροντα οργανισμό τα στοιχεία πλήρωσης και επικάλυψης είναι δυνατόν να κατασκευαστούν με διάφορους τρόπους, αναλόγως των απαιτήσεων και των αναγκών που πρέπει να καλυφθούν. Ένας από αυτούς είναι να χρησιμοποιηθούν μεταλλικά στοιχεία. Τα μεταλλικά φύλλα σε διάφορες μορφές και συνδυασμούς χρησιμοποιούνται ευρέως για την στέγαση και την κάλυψη των όψεων των μεταλλικών κτιρίων. Το μικρό βάρος και η δυνατότητα παραγωγής τους σε μεγάλες επιφάνειες προσφέρει το πλεονέκτημα της γρήγορης και οικονομικής τοποθέτησης. Η δυνατότητα μορφοποίησης και βαφής των μεταλλικών φύλλων σε μεγάλη ποικιλία σχημάτων και μορφών προσφέρει στον αρχιτέκτονα μηχανικό την δυνατότητα να προσδώσει στα κτήρια την χαρακτηριστική μορφή που επιθυμεί. Από μηχανική άποψη, η χρήση απλών φύλλων παρουσιάζει το μειονέκτημα του λυγισμού. Για την αύξηση της μηχανικής αντοχής εμφανίσθηκαν καταρχήν τα κυματοειδή και αργότερα τα τραπεζοειδή μεταλλικά φύλλα. Ακόμη για περαιτέρω αύξηση της αντοχής παρασκευάσθηκαν μεταλλικά φύλλα των προηγούμενων κατηγοριών με πρόσθετες νευρώσεις. Με τις κατάλληλες μηχανικές κατεργασίες των άκρων επιτυγχάνεται η ακριβής σύνδεση των στοιχείων μεταξύ τους με την χρήση δε κατάλληλων εξαρτημάτων εξασφαλίζεται η επαρκής στερέωση στο σκελετό του μεταλλικού κτηρίου. Στην παρούσα εργασία θα μελετηθούν μια επίπεδη μεταλλική πλάκα και μία μεταλλική πλάκα με νευρώσεις.

3.2 Επίπεδο μεταλλικό έλασμα από χάλυβα S355

Σε πρώτο επίπεδο, έγινε ανάλυση επίπεδου μεταλλικού ελάσματος υπό εκρηκτικό φορτίο. Για την ανάλυση του πρώτου είδους επικάλυψης έγινε χρήση του προγράμματος ANSYS 19.1 και ειδικότερα το σύστημα ανάλυσης Explicit Dynamics. Πρόκειται για λογισμικό, το οποίο δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα ενσωμάτωσης δυναμικών φαινομένων, μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας καθώς και τη δυνατότητα χρήσης ειδικών νόμων υλικού. Για την προσομοίωση του επίπεδου μεταλλικού ελάσματος, θεωρήσαμε γεωμετρική επιφάνεια διαστάσεων πλάτους 1m και κυμαινόμενο μήκος από 1m έως 2,5m. Σε αυτή την πλάκα, για κάθε μήκος έγινε παραμετρική ανάλυση με μεταβλητή το πάχος της πλάκας προκειμένου να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός των παραπάνω μεγεθών. Η πλάκα θεωρήθηκε αμφιέριστη, δηλαδή γραμμικά δεσμευμένη με ελευθερία στροφής.

Πραγματοποιήθηκαν δυναμικές αναλύσεις ενσωματωμένης μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας. Στην πλάκα ασκήθηκε ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο, όμοιο με της χρονοϊστορίας που παρουσιάστηκε σε παραπάνω κεφάλαιο, με χαρακτηριστικά μεγέθη 45,404MPa υπερπίεση, 100kPa υποπίεση και συνολικό χρόνο υλοποίησης του φαινομένου 9ms. Το υλικό είναι χάλυβας S355, ο οποίος λειτουργεί σύμφωνα με τον Νόμο Υλικών Cowper-Symonds.

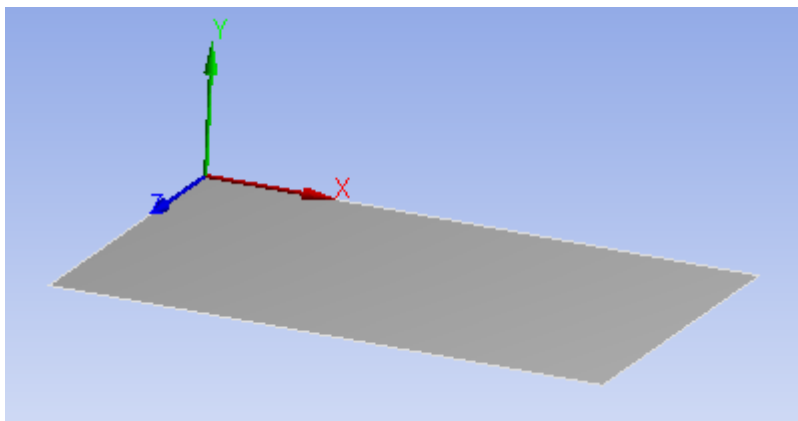
3.2.1 Αναλυτικό παράδειγμα ανάλυσης επίπεδου μεταλλικού ελάσματος από χάλυβα S355

Ακολουθώς, παρουσιάζεται διεξοδικά μια ανάλυση από το είδος της επικάλυψης επίπεδης πλάκας από χάλυβα S355. Επιλέχθηκε τυχαία η ανάλυση με χαρακτηριστικά:

- 1500mm μήκος
- 1000mm πλάτος
- 4mm πάχος πλάκας

Αρχικά, στο λογισμικό Ansys 19.1, στο πεδίο dynamics explicit, έγινε το πρώτο βήμα προσομοίωσης όπου μορφώθηκε γεωμετρικά ο φορέας. Σχεδιάστηκε πλάκα μήκους 1500mm και πλάτους 1000mm και

ορίστηκε και το καθολικό σύστημα συντεταγμένων με τον άξονα X ως τον κύριο άξονα της πλάκας. Στη συνέχεια, ορίστηκε το πάχος της επιφάνειας της πλάκας στα 4mm.

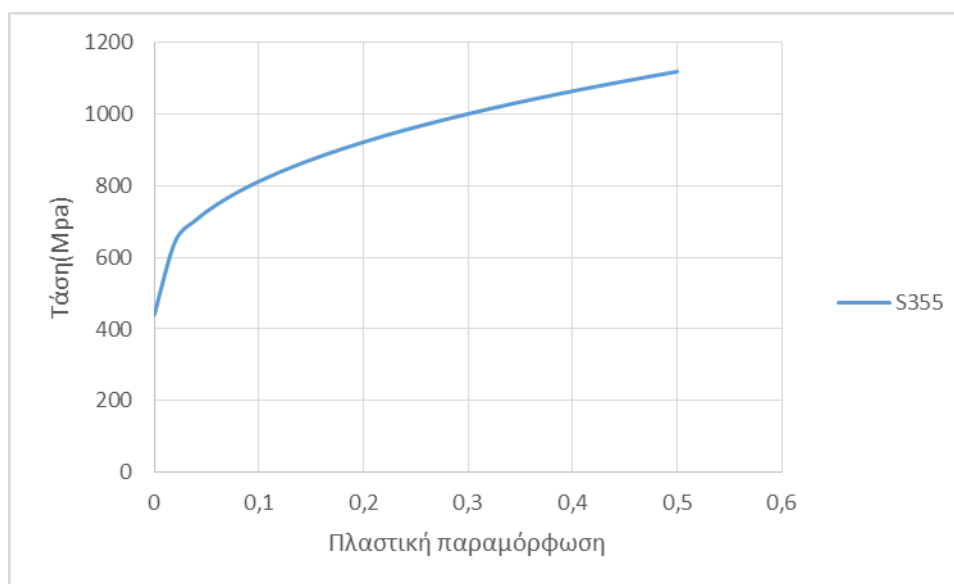


Εικόνα 3-2: Γεωμετρία επίπεδης πλάκας

Στο τρέχον παράδειγμα προσομοιώθηκε χάλυβας ποιότητας S355 υπό έκρηξη. Στην ελαστική περιοχή έχει χαρακτηριστικά: μέτρο ελαστικότητας E 210GPa και λόγος Poisson 0.3 ενώ στη μετελαστική ορίστηκαν τα χαρακτηριστικά του σύμφωνα με τον ειδικό νόμο υλικών Cowper Symonds σύμφωνα με πειραματικές μετρήσεις.

Πίνακας 3-1 Παράμετροι μοντέλου Cowper Symonds

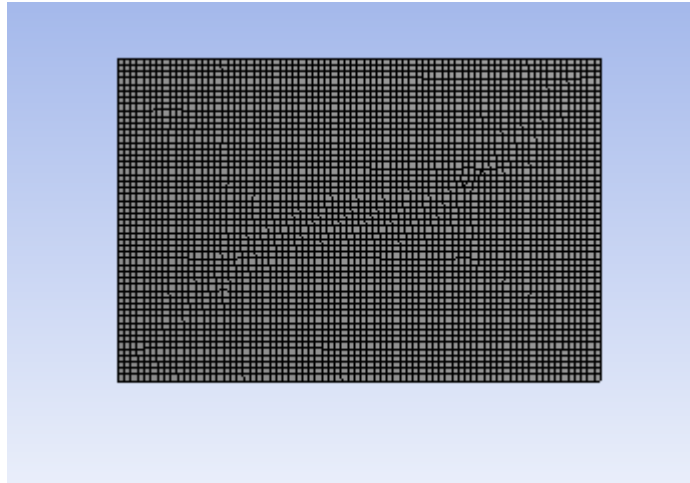
Τύπος	A	B	n	D	q
S355	440	865	0.37	38370	2.395



Διάγραμμα 3-1: Σχέση τάσης και πλαστικής παραμόρφωσης χάλυβα ποιότητας S355 με το εμπειρικό μοντέλο Cowper-Symonds.

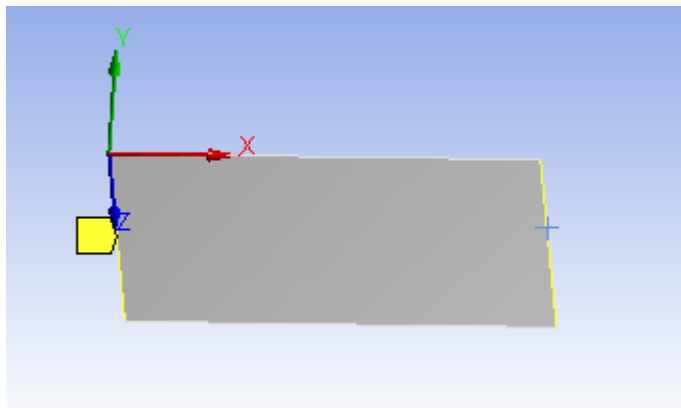
Παράλληλα, τέθηκε ανώτερο όριο πλαστικής παραμόρφωσης 0,5.

Ακολούθως, έγινε η διακριτοποίηση του φορέα με επιφανειακά στοιχεία μεγέθους 0,15m.



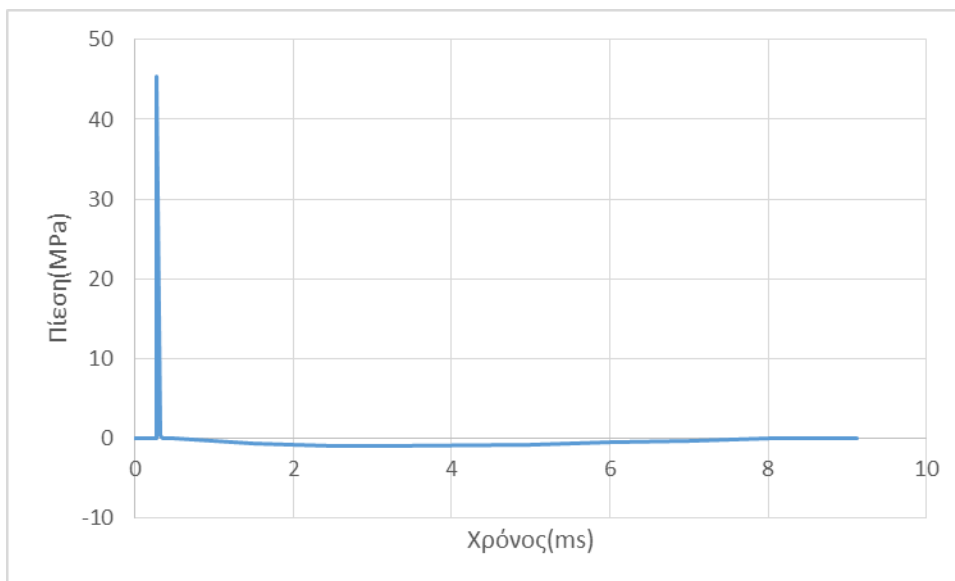
Εικόνα 3-3: Διακριτοποίηση του φορέα

Αναφορικά με τις συνοριακές συνθήκες του προβλήματος, εφαρμόστηκαν γραμμικές στηρίξεις. Δεσμεύτηκαν οι μετακινήσεις των άκρων της πλάκας, έτσι ώστε να προκύψει αμφιέριστο το μοντέλο στην μία διεύθυνση.

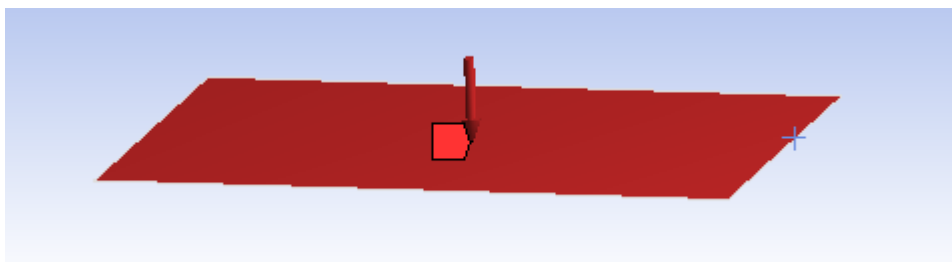


Εικόνα 3-4: Συνοριακές συνθήκες προβλήματος, δέσμευση μετακινήσεων

Ασκήθηκε ομοιόμορφα κατανεμημένο δυναμικό φορτίο, όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο για 10kg TNT σε 1m απόσταση από το κτίριο. Το φορτίο ασκήθηκε κάθετα στην επιφάνεια της πλάκας,



Διάγραμμα 3-2: Πίεσης χρόνου για 10kg TNT σε απόσταση 1m από την κατασκευή

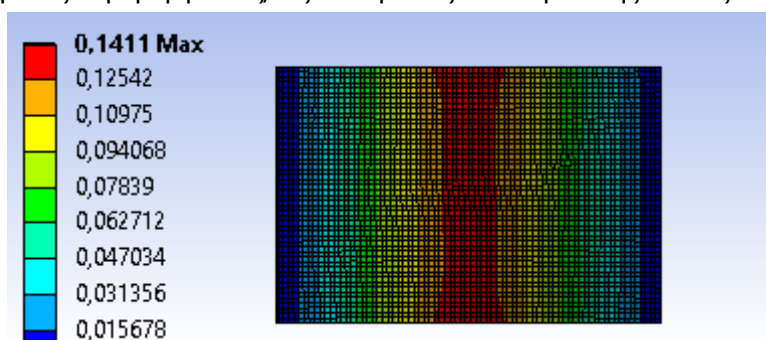


Εικόνα 3-5: Άσκηση φορτίου στην πλάκα

Για την ομαλή διεξαγωγή της ανάλυσης, έγινε διαχωρισμός του χρόνου της σε 26 βήματα.

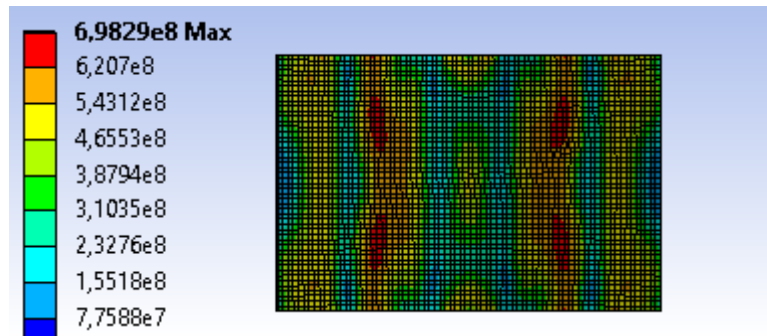
Το λογισμικό έχει ενσωματωμένη μη γραμμικότητα γεωμετρίας στα αποτελέσματά του.

Όσον αφορά στα αποτελέσματα του προγράμματος, αποφασίστηκε το μοντέλο με αυτά τα δεδομένα να εξαγάγει τις μέγιστες παραμορφώσεις, τις αντιδράσεις των άκρων της πλάκας



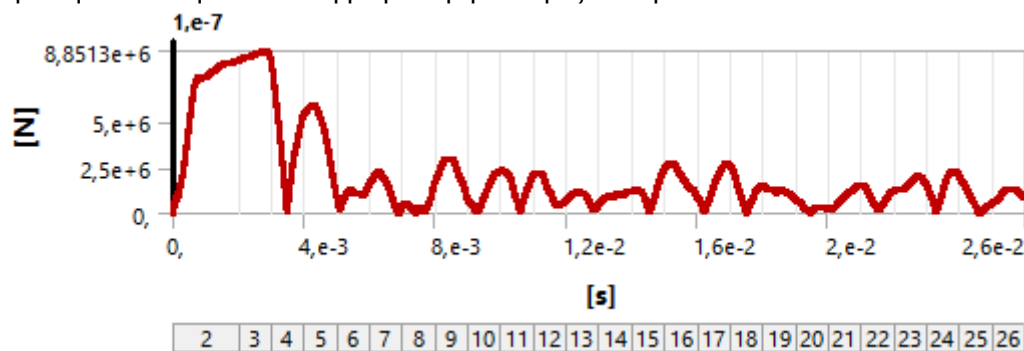
Εικόνα3-6: Μέγιστη παραμόρφωση

Το στιγμιότυπο που απεικονίζεται αναφέρεται στη μέγιστη παραμόρφωση, στο μέγιστο βέλος της πλάκας.



Εικόνα 3-7: Ένταση κατά Von Mises

Απεικονίζεται η ισοδύναμη τάση κατά Von Mises. είναι μια αντιπροσωπευτική τάση και μπορεί να περιγράψει την εντατική κατάσταση με μια τιμή. Οι τιμές αντιπροσωπεύουν Pascal.

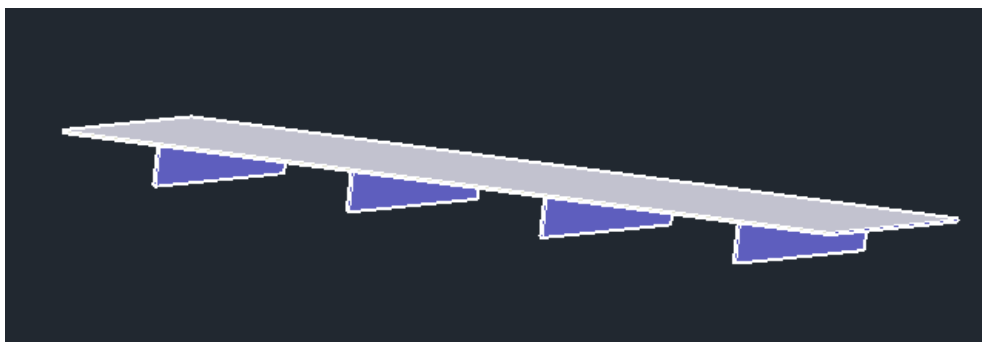


Διάγραμμα 3-3: Αντίδρασης-χρόνου

Τέλος, το λογισμικό εξάγει και διάγραμμα αντίδρασης-χρόνου, από το οποίο μπορούμε να αντλήσουμε την μέγιστη τιμή. Αναφερόμαστε στην αντίδραση ως το μέτρο του διανύσματος των αντιδράσεων στο χώρο.

3.3 Επίπεδη μεταλλική πλάκα με νεύρωση

Με την προσθήκη μιας δευτερεύουσας κάθετης πλάκας στο επίπεδο της κύριας δημιουργήθηκε μια δεύτερη ομάδα αναλύσεων με μία πλάκα και μία νεύρωση που εκτείνεται κατά την έννοια του μήκους της πλάκας. Η νεύρωση τοποθετείται ως ένα πιο άκαμπτο στοιχείο ως προς το επίπεδο της πλάκας, με σκοπό τη μείωση της αντίδρασης και του μέγιστου βέλους. Θεωρούμε ότι το πέτασμα που δημιουργείται θα αποτελείται από συνεχή μεταλλική πλάκα και νευρώσεις με σταθερή απόσταση μεταξύ τους.

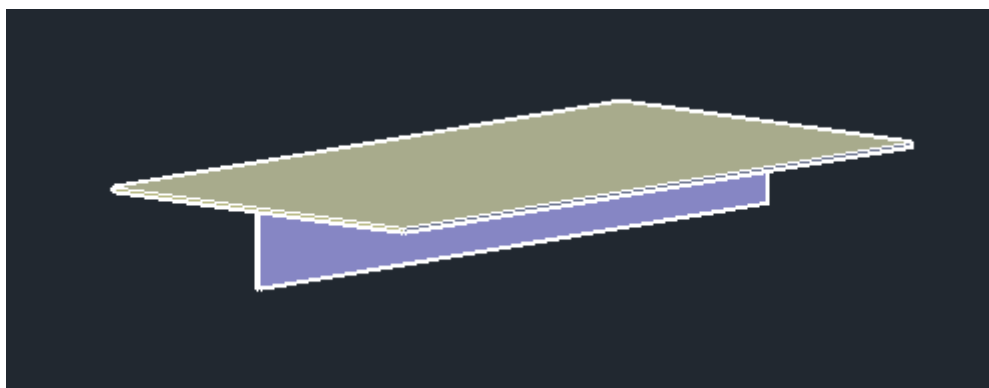


Εικόνα 3-8: Συνολικός φορέας



Εικόνα 3-9: Τομή συνολικού φορέα

Όμως, για την ευκολία και την ταχύτητα των αναλύσεων δεν προσομοιώνεται ολόκληρο το πέτασμα αλλά μέρος του, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 3-10, με δέσμευση στροφής σε διεύθυνση γύρω από τον άξονα του πετάσματος και οριζόντιας μετακίνησης στις άκρες, για αξιοποίηση της συμμετρίας.



Εικόνα 3-10: Φορέας που προσομοιώθηκε

Το εκρηκτικό φορτίο που ασκήθηκε, ίσο με αυτό που προκαλείται από 10 kg TNT σε απόσταση 1m από την κατασκευή, καθώς και οι συνοριακές παρέμειναν σταθερά σε όλες τις αναλύσεις. Αλλάζοντας το πλάτος του μοντέλου είναι σαν να αλλάζει η απόσταση μεταξύ των νευρώσεων. Στο μοντέλο που περιγράφεται διακρίνονται 5 μεταβλητές. Το μήκος του πετάσματος, η απόσταση μεταξύ των νευρώσεων, το πάχος της πλάκας, το πάχος της νεύρωσης και η ποιότητα του χάλυβα. Προκειμένου να κατανοηθεί η επίδραση των μεγεθών στις αναλύσεις που ακολουθούν παραμένουν σταθερές οι τέσσερις από τις πέντε μεταβλητές και διαφοροποιείται η πέμπτη. Να σημειωθεί ότι το ύψος της νεύρωσης παραμένει σταθερό με τιμή 100mm. Αλλάζοντας λοιπόν το πλάτος του πετάσματος, ή αλλιώς την απόσταση μεταξύ των νευρώσεων, ή το μήκος του πετάσματος, αλλάζει και ο λόγος h/l της νεύρωσης.

3.3.1 Αναλυτικό παράδειγμα ανάλυσης επίπεδης πλάκας με νεύρωση

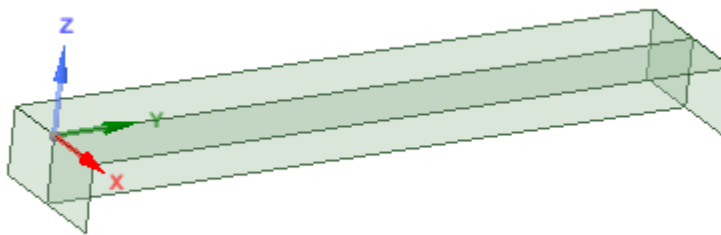
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται διεξοδικά μια ανάλυση από το είδος της επικάλυψης επίπεδης πλάκας με νεύρωση.

Επιλέχθηκε τυχαία η ανάλυση με χαρακτηριστικά:

- 1000mm μήκος
- 200mm πλάτος ή απόσταση μεταξύ των νευρώσεων
- Ποιότητα χάλυβα S355

- Πάχος πλάκας 4mm
- Πάχος νεύρωσης 5mm

Αρχικά, στο λογισμικό Ansys 19.1, στο πεδίο dynamics explicit, έγινε το πρώτο βήμα προσομοίωσης όπου μορφώθηκε γεωμετρικά ο φορέας. Σχεδιάστηκε πλάκα μήκους 1000mm και πλάτους 200mm. Κάθετα στο επίπεδο της σχεδιάστηκε η νεύρωση με ύψος 100mm και μήκος όσο η πλάκα. Έπειτα, κάθετα και στη νεύρωση αλλά και στην πλάκα σχεδιάστηκαν ως ελάσματα στήριξης στοιχεία με μεγαλύτερο πάχος αρκετά στιβαρά. Αναπαριστούν μια γωνιά συγκολλημένη με το πέτασμα η οποία συνδέεται με τον υποκείμενο φορέα. Όλα τα στοιχεία προσομοιώθηκαν σαν επιφάνειες προκειμένου κατά τη διάρκεια των αναλύσεων να είναι εύκολη η αλλαγή του πάχους τους. Παράλληλα ορίστηκε και το καθολικό σύστημα συντεταγμένων με τον άξονα Y ως τον κύριο άξονα της πλάκας,

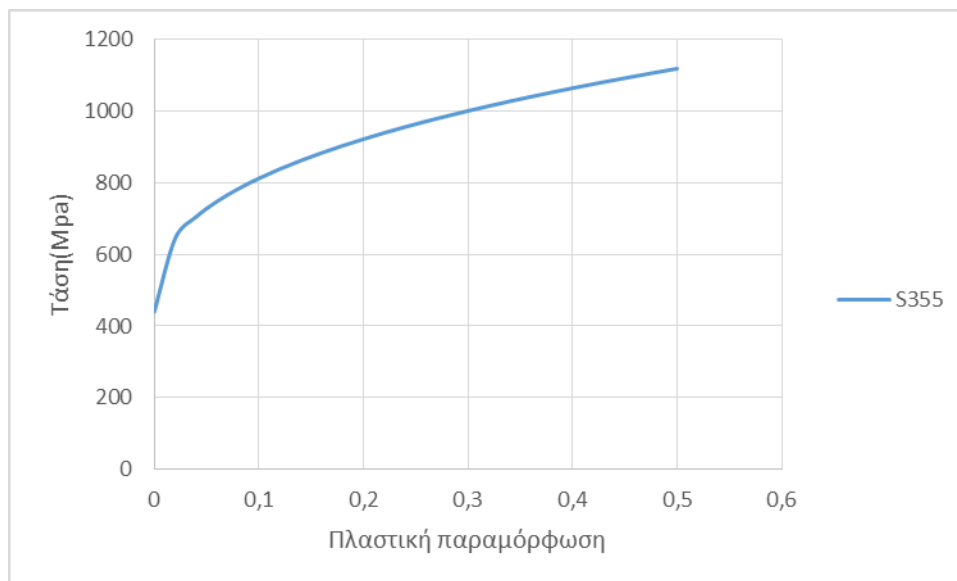


Εικόνα 3-11: Γεωμετρία πετάσματος με νεύρωση

Στο τρέχον παράδειγμα προσομοιώθηκε χάλυβας ποιότητας S355 υπό έκρηξη. Στην ελαστική περιοχή έχει χαρακτηριστικά: μέτρο ελαστικότητας E 210GPa και λόγο Poisson 0.3 ενώ στη μετελαστική ορίστηκαν τα χαρακτηριστικά του σύμφωνα με τον ειδικό νόμο υλικών Cowper Symonds σύμφωνα με πειραματικές μετρήσεις,

Πίνακας 3-2 Παράμετροι μοντέλου Cowper Symonds

Τύπος	A	B	n	D	q
S355	440	865	0.37	38370	2.395



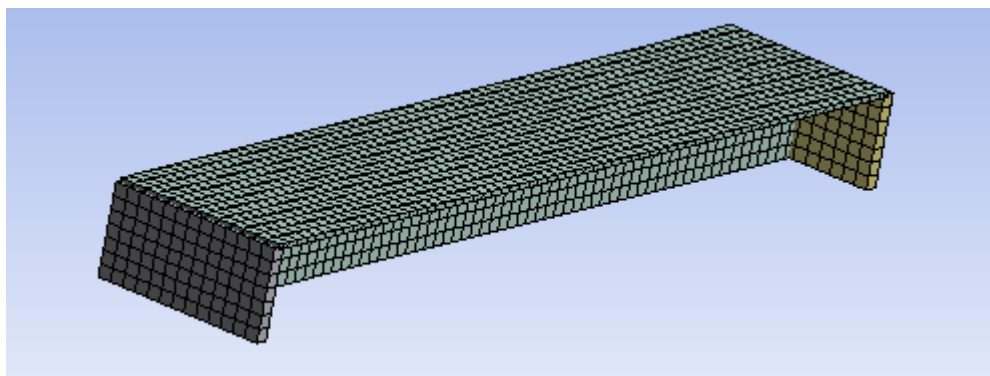
Διάγραμμα 3-4: Σχέση τάσης πλαστικής παραμόρφωσης χάλυβα ποιότητας S355 με το εμπειρικό μοντέλο Cowper-Symonds.

Παράλληλα, τέθηκε ανώτερο όριο πλαστικής παραμόρφωσης 0,5.

Στη συνέχεια, τα γεωμετρικά στοιχεία συνδέθηκαν μεταξύ τους και ορίστηκαν τα πάχη των επιφανειών:

- 4mm το πάχος της πλάκας
- 5mm το πάχος της νεύρωσης
- 15mm το πάχος των ελασμάτων στήριξης

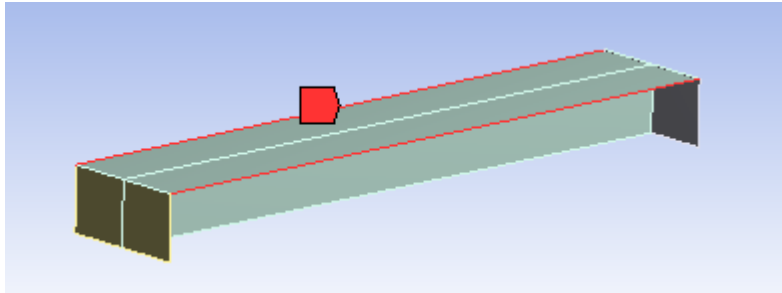
Ακολούθως, έγινε η διακριτοποίηση του φορέα με επιφανειακά στοιχεία μεγέθους 0,015m. Η διακριτοποίηση αυτή θεωρείται επαρκής καθώς επιφανειακά στοιχεία μικρότερου μεγέθους, δηλαδή πιο ακριβής διακριτοποίηση δεν επιφέρει μεγάλη διαφορά στα αποτελέσματα και αυξάνει κατά πολύ το χρόνο περάτωσης μιας ανάλυσης.



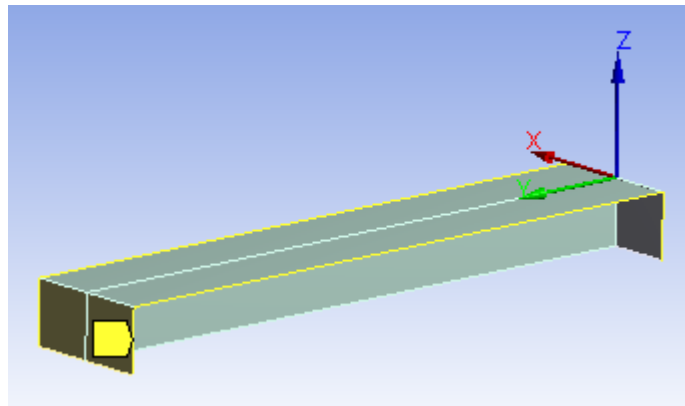
Εικόνα 3-12: Διακριτοποίηση του φορέα

Αναφορικά με τις συνοριακές συνθήκες του προβήματος, εφαρμόστηκαν γραμμικές στηρίξεις στα γεωμετρικά στοιχεία ως εξής:

- Για τη συνέχεια του πετάσματος, δεσμεύτηκε η στροφή ως προς τον κύριο άξονα της πλάκας Y και η οριζόντια μετακίνησή της στον άξονα X

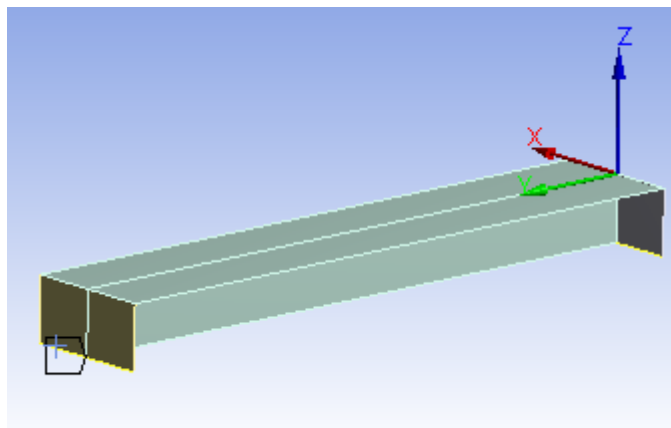


Εικόνα 3-13: Συνοριακές συνθήκες προβλήματος, δέσμευση στροφής



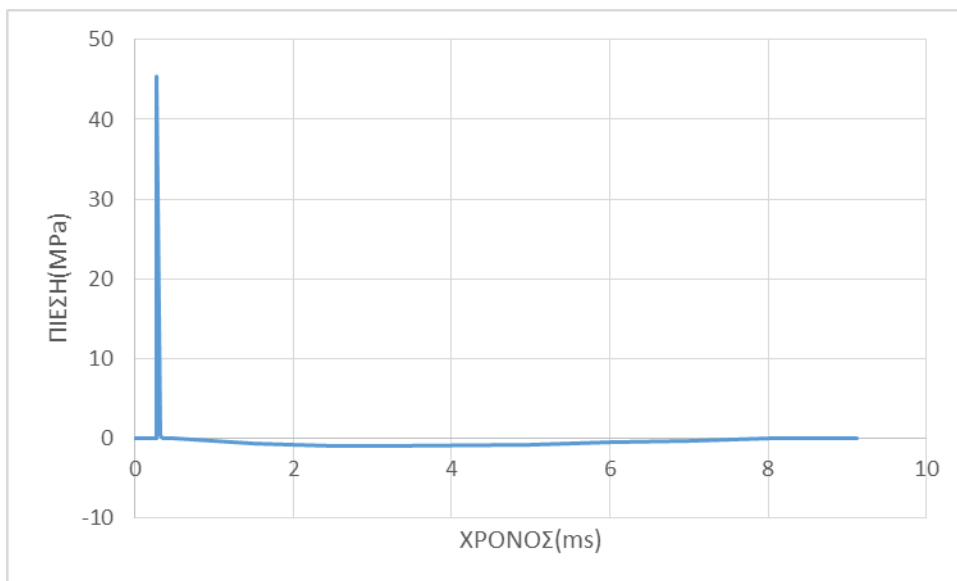
Εικόνα 3-14: Συνοριακές συνθήκες προβλήματος, δέσμευση οριζόντιας μετακίνησης

- Δεσμεύτηκαν οι μετακινήσεις των Endplates, έτσι ώστε να προκύψει αμφιέριστο το μοντέλο στη μία διεύθυνση.

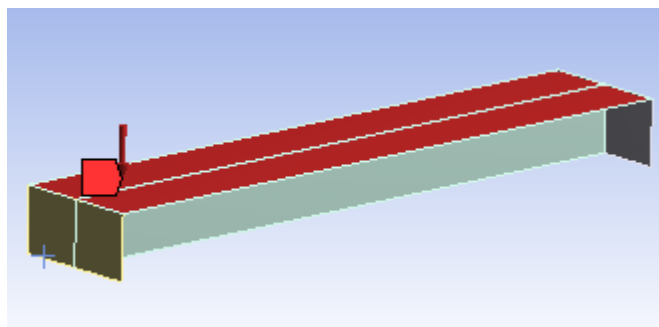


Εικόνα 3-15: Συνοριακές συνθήκες προβλήματος, δέσμευση μετακινήσεων

Ασκήθηκε ομοιόμορφα κατανεμημένο δυναμικό φορτίο, όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο για 10kg TNT σε 1m απόσταση από το κτίριο. Το φορτίο ασκήθηκε κάθετα στην επιφάνεια της πλάκας.



Διάγραμμα 3-5: Πίεση-χρόνος για 10kg TNT σε απόσταση 1m από την κατασκευή

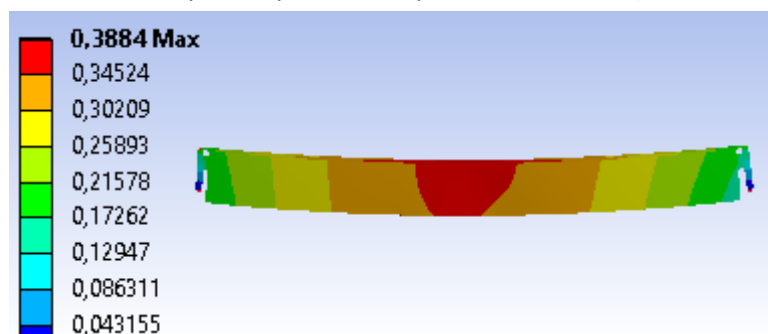


Εικόνα 3-16: Άσκηση φορτίου στο πέτασμα

Για την ομαλή διεξαγωγή της ανάλυσης, έγινε διαχωρισμός του χρόνου της σε 26 βήματα.

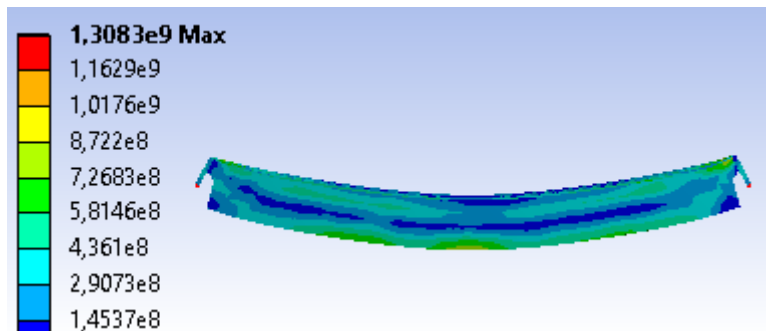
Το λογισμικό έχει ενσωματωμένη μη γραμμικότητα γεωμετρίας στα αποτελέσματά του.

Όσον αφορά στα αποτελέσματα του προγράμματος, αποφασίστηκε το μοντέλο με αυτά τα δεδομένα να εξαγάγει τις μέγιστες παραμορφώσεις, τις αντιδράσεις στα Endplates, την πίεση Von Mises. Από αυτά τα μεγέθη θα αξιολογηθούν και θα συγκριθούν τα είδη επικάλυψης και θα προταθούν οι βέλτιστοι συνδυασμοί. Παρακάτω, παρατίθενται εικόνες των αποτελεσμάτων.



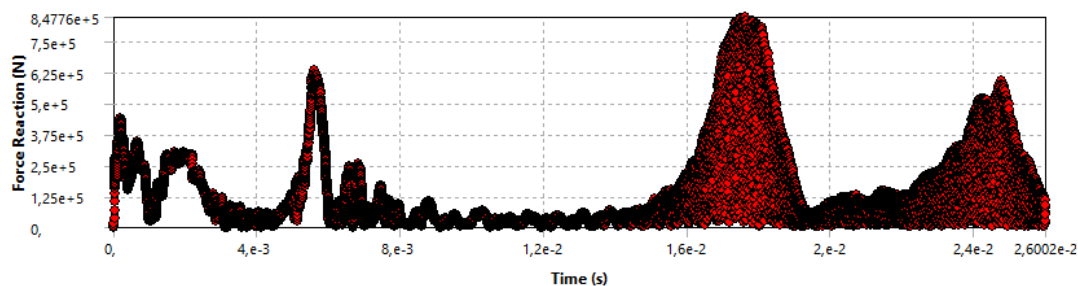
Εικόνα 3-17: Μέγιστη παραμόρφωση

Το στιγμιότυπο που απεικονίζεται αναφέρεται στη μέγιστη παραμόρφωση, στο μέγιστο βέλος του πετάσματος. Μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα όπως αν το σύστημα αστοχεί ή αν λειτουργεί επιθυμητά. Στο παράδειγμα αυτό, παρατηρούμε ότι η νεύρωση αποκολλάται τοπικά από την πλάκα.



Εικόνα 3-18: Ένταση κατά Von Mises

Απεικονίζεται η ισοδύναμη τάση κατά Von Mises. είναι μια αντιπροσωπευτική τάση και μπορεί να περιγράψει την εντατική κατάσταση με μια τιμή. Οι τιμές αντιπροσωπεύουν Pascal.



Διάγραμμα 3-6: Αντίδρασης-χρόνου

Τέλος, το λογισμικό εξάγει και διάγραμμα αντίδρασης-χρόνου, από το οποίο μπορούμε να αντλήσουμε τη μέγιστη τιμή. Αναφερόμαστε στην αντίδραση ως το μέτρο του διανύσματος της αντιδράσης στο χώρο. Συγκρίνουμε τα μοντέλα μεταξύ τους συγκρίνοντας τις μέγιστες τιμές των αντιδράσεων που προκύπτουν από αυτό το διάγραμμα.

3.4 Κριτήρια βέλτιστου συνδυασμού αναλύσεων

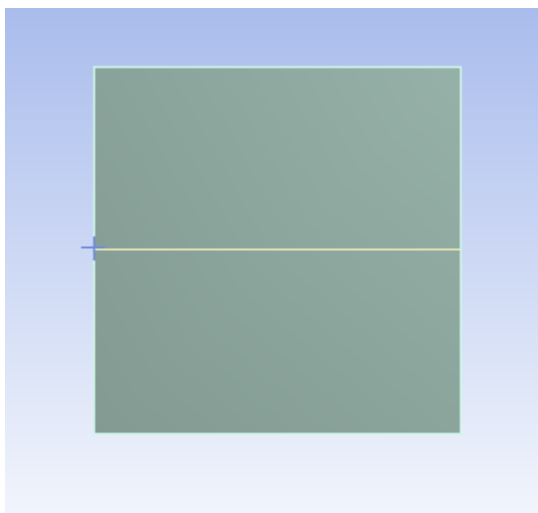
Στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν έπρεπε να οριστούν κάποια κριτήρια προκειμένου να επιλεγεί ο βέλτιστος συνδυασμός των μεταβλητών του προβλήματος. Σκοπός είναι το πέτασμα που θα προκύψει να είναι λειτουργικό, οικονομικό, που να αξιοποιεί πλήρως τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού, αλλά πάνω από όλα να είναι ασφαλές. Το σύστημα δεν πρέπει να αστοχήσει, επιτρέποντας στο εκρηκτικό κύμα να εισέλθει στο κτίριο και να προκαλέσει ζημιές. Έτσι, επιλέγουμε συνδυασμούς οι οποίοι

- δεν αστοχούν
- παρουσιάζουν την ελάχιστη δυνατή τιμή αντίδρασης και
- ο λόγος τους όγκου προς την επιφάνεια άσκησης του εκρηκτικού φορτίου να είναι ο μικρότερος δυνατός.

Ζητούμενο ενός επιθυμητού συνδυασμού των παραμέτρων είναι η μεγαλύτερη δυνατή απορρόφηση ενέργειας. Κατά τη διάρκεια ενός εκρηκτικού φαινομένου, απελευθερώνονται μεγάλα ποσά ενέργειας. Ο φορέας πρέπει να είναι σε θέση να απορροφήσει το μεγαλύτερο ποσοστό αυτής, και να το μετατρέψει σε πλαστικές παραμορφώσεις. Έχει τεθεί όριο πλαστικών παραμορφώσεων 0.5. Το όριο αυτό πρέπει να εξαντλείται αλλά να μην ξεπερνάται. Αν και δεν έχει οριστεί ένα ανώτερο όριο μέγιστου βέλους των πλακών και των πετασμάτων καθώς δεν αποτελεί το πιο σημαντικό κριτήριο, καλό θα ήταν να είναι το μικρότερο δυνατό. Μεγάλα βέλη της τάξεως των 40cm, είναι πιθανό να προκαλέσουν τραυματισμούς και ζημιές εσωτερικά του κτιρίου.

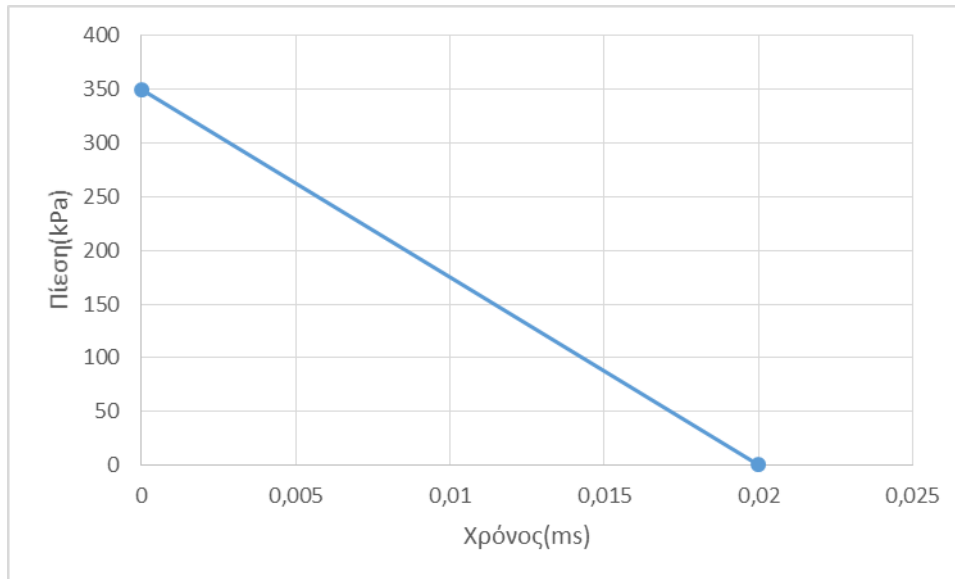
3.5 Αξιοπιστία μοντέλου

Για να αξιολογηθεί η αξιοπιστία του μοντέλου που παρουσιάστηκε, έγινε σύγκριση με μία επιστημονική δημοσίευση που εξετάζει τη συμπεριφορά χαλύβδινων πανέλων με νευρώσεις σε εκρηκτικό φορτίο «Performance of infill stiffened steel panel against blast loading» [10]. Για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα, προσομοιώθηκε στο λογισμικό Ansys 19.1 το μοντέλο που περιγράφεται. Στο άρθρο μελετάται μία πλάκα με μία νευρώση κάθετη στο επίπεδο της πλάκας. Η πλάκα έχει διαστάσεις 3m μήκος, 3m πλάτος και 5mm πάχος, ενώ η νευρώση είναι μήκους 3m, ύψους 100mm και πάχους 5mm. Τα δύο άκρα της πλάκας είναι ελεύθερα, ενώ στα υπόλοιπα δύο άκρα δεσμεύονται οι μετακινήσεις και επιτρέπονται οι στροφές.



Εικόνα 3-19: Γεωμετρία φορέα

Στην πλάκα ασκείται κατακόρυφο ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο, τριγωνικής μορφής, μέγιστης τιμής 350 kPa και διάρκειας 20ms.



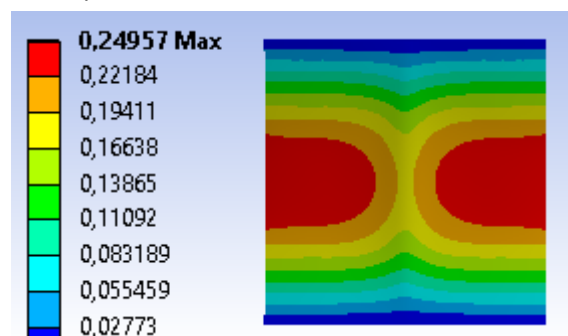
Διάγραμμα Πίεσης-Χρόνου

Οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού προκύπτουν σύμφωνα με τον ειδικό νόμο υλικών Cowper Symonds με τις εξής παραμέτρους:

Πίνακας 3-3: Παράμετροι μοντέλου Cowper Symonds

Τύπος	A	B	n	D	q
S355	240	320	2	40	5

Στο μοντέλο που έχουμε δημιουργήσει και για αυτά τα στοιχεία γεωμετρίας, φόρτισης, υλικού και συνοριακών συνθηκών προκύπτει ως αποτέλεσμα ότι η μέγιστη παραμόρφωση είναι 0,24957m. Στο άρθρο στο ίδιο πρόβλημα το μέγιστο βέλος δίνεται 0,248m. Η διαφορά είναι κάτω του 1%, γεγονός που ενισχύει την αξιοπιστία του μοντέλου.

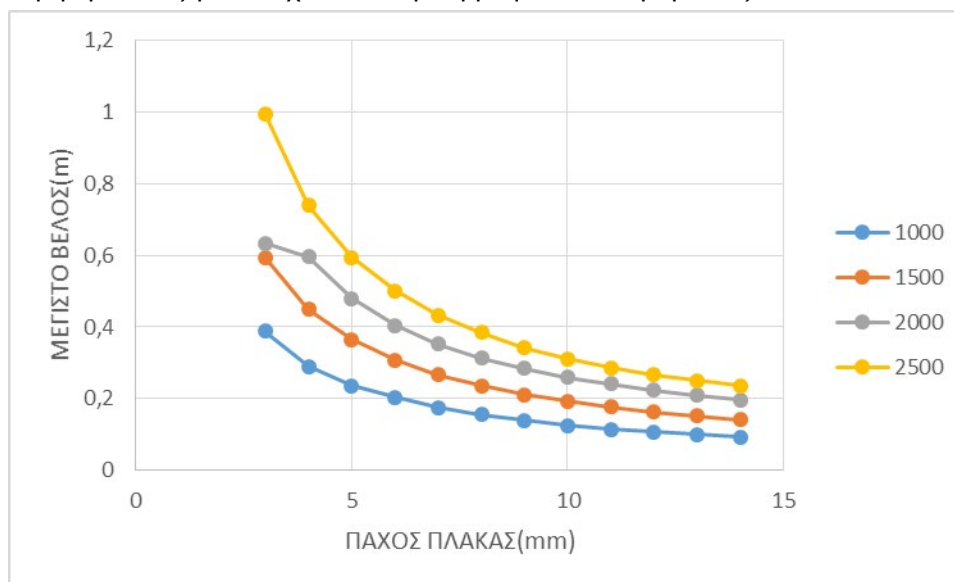


Εικόνα 3-19: Μέγιστη Παραμόρφωση

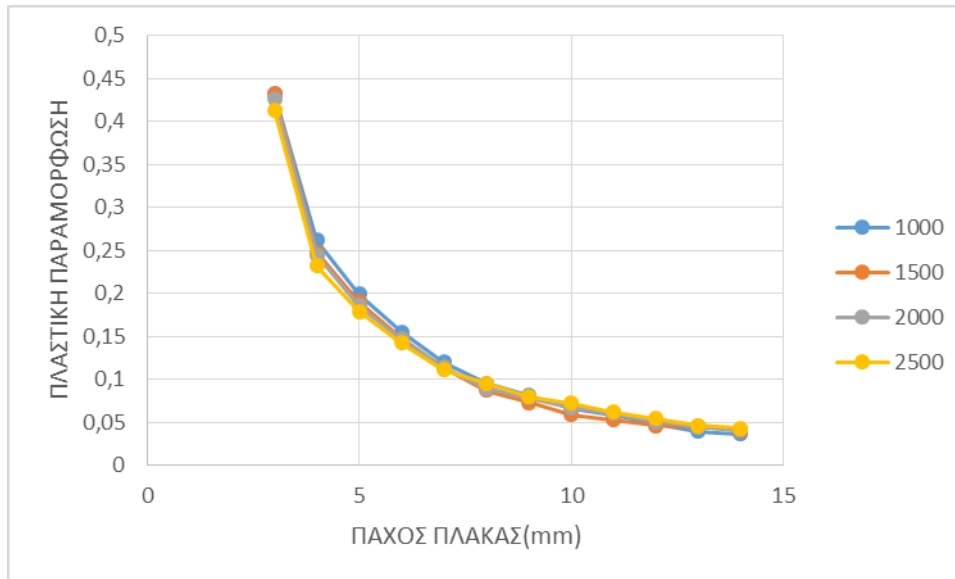
4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

4.1 Αποτελέσματα αναλύσεων επίπεδης μεταλλικής πλάκας

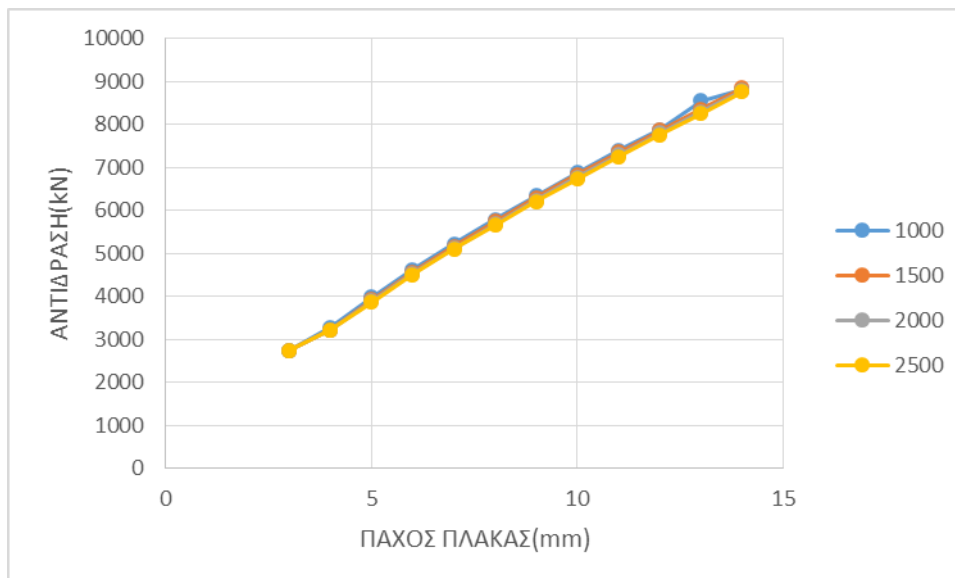
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων της επίπεδης μεταλλικής πλάκας. Μεταβλητές του προβλήματος αυτού είναι το μήκος της πλάκας και το πάχος της. Όλες οι άλλες συνθήκες του προβλήματος διατηρούνται σταθερές. Ακολουθούν διαγράμματα αντίδρασης, πλαστικής παραμόρφωσης και μέγιστου βέλους σε σχέση με το πλάτος της πλάκας για διαφορετικά μήκη πλάκας για να σχολιαστεί η επιρροή του κάθε μεγέθους.



Διάγραμμα 4-1: Μέγιστου βέλους-πάχους πλάκας για διάφορα μήκη πλάκας



Διάγραμμα 4-2: Πλαστικής παραμόρφωσης-πάχους πλάκας για διάφορα μήκη πλάκας



Διάγραμμα 4-3: Αντίδρασης-πάχους πλάκας για διάφορα μήκη πλάκας

Παρατηρήσεις

Από τα διαγράμματα προκύπτει ότι το μήκος επηρεάζει το μοντέλο μόνο ως προς το μέγιστο βέλος, με το οποίο έχει σχέση ανάλογη. Για μεγάλα μήκη προκύπτει μεγάλο βέλος, μεγαλύτερο της τάξης των 40cm που δεν είναι αποδεκτό, καθώς ενδέχεται να προκαλέσει ζημιές εσωτερικά της επικάλυψης. Για διαφορετική μήκη, παρατηρούνται ίδια αποτελέσματα στα μεγέθη της αντίδρασης και της πλαστικής παραμόρφωσης. Όσον αφορά το πάχος της πλάκας, επηρεάζει τα αποτελέσματα του μοντέλου. Αυξάνοντας το πάχος της πλάκας, αυξάνεται η αντίδραση ενώ μειώνεται η πλαστική παραμόρφωση και το μέγιστο βέλος.

Αν θεωρήσουμε ότι προτιμάται η επιλογή ενός μικρού μήκους για την αποφυγή μεγάλων βελών, τότε είναι δυνατή και η επιλογή μικρού πάχους πλάκας. Με τέτοια επιλογή, γίνεται εκμετάλλευση των ιδιοτήτων του υλικού, καθώς σχεδόν εξαντλείται το όριο της μέγιστης πλαστικής παραμόρφωσης και

ταυτόχρονα παρατηρείται η μικρότερη δυνατή αντίδραση. Τέλος, το μέγιστο βέλος, αν και όχι το επιθυμητό, είναι ανεκτό.

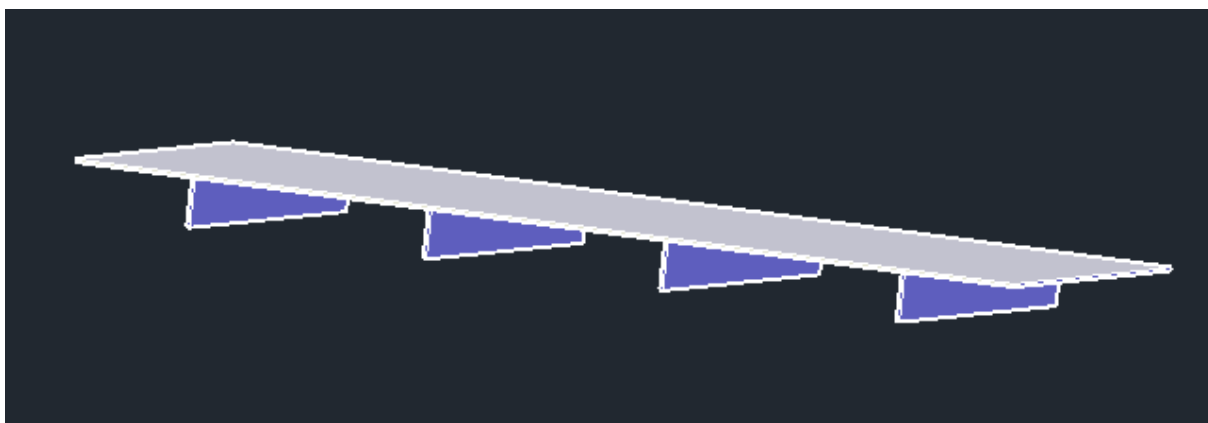
Ιδιαίτερη αναφορά πρέπει να γίνει στα χαρακτηριστικά μεμβρανικής συμπεριφοράς που παρατηρούνται. Η μεταλλική πλάκα ανεξάρτητα από το πάχος της έχει κοινή συμπεριφορά. Πιο έντονα για μικρά πάχη και λιγότερο για μεγαλύτερα, έχει μεγάλη αντίδραση στην έννοια του μήκους και παρουσιάζει μεγάλες παραμορφώσεις που οδηγούν σε μεμβρανική συμπεριφορά.

4.2 Αποτελέσματα αναλύσεων πλάκας με νεύρωση

Κατά τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας πραγματοποιήθηκε πλήθος αναλύσεων, πάνω από 900 αναλύσεις, καθώς είναι αδύνατο να παρουσιαστεί το σύνολο των αποτελεσμάτων έχει γίνει επιλογή μερικών χαρακτηριστικών αναλύσεων με τη βοήθεια των οποίων θα παρουσιαστεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση του θέματος.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων όπως πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος Ansys 19.1. Για να εκτιμηθεί η επιρροή της εκάστοτε μεταβλητής του προβλήματος γίνονται διαδοχικές αναλύσεις κατά τις οποίες κρατούνται σταθερές όλες οι μεταβλητές εκτός μίας. Πραγματοποιείται λοιπόν παραμετρική ανάλυση. Οι μεταβλητές είναι οι εξής:

- Το μήκος της μεταλλικής πλάκας
- Το πλάτος της μεταλλικής πλάκας, ή αλλιώς η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών νευρώσεων
- Η ποιότητα του χάλυβα
- Το πάχος της πλάκας
- Το πάχος της νεύρωσης



Εικόνα 4-1: Συνολικός φορέας

Προκειμένου η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων να είναι πιο εύκολη στην ανάγνωση, παρουσιάζονται, έπειτα από παρατήρηση, τα στάδια από τα οποία περνάει διαδοχικά η πλάκα με τη νεύρωση. Θεωρώντας κύρια μεταβλητή το πάχος της νεύρωσης και διαρκώς αυξάνοντας την τιμή του, παρουσιάζονται τα παρακάτω στάδια με παραδείγματα.

- ❖ 1^ο στάδιο: υποχώρηση πλάκας

Με μικρό πάχος νεύρωσης, η πλάκα με το έλασμα νεύρωσης αστοχεί και υποχωρεί. Μεγάλες τιμές έντασης, αντίδρασης, πλαστικής παραμόρφωσης και μέγιστου βέλους

Μήκος	Πλάτος	Πάχος πλάκας	Πάχος νεύρωσης	Αντίδραση	Πλ. Παραμόρφωση	Μέγιστο βέλος
1000	200	2	2	885,79	0,513	2,874

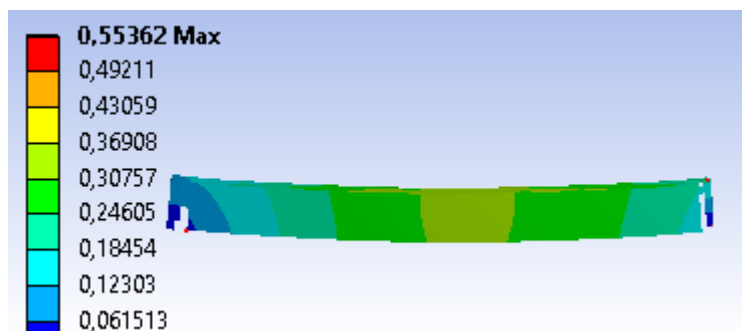


Εικόνα 4-2: Μέγιστο βέλος 1^{ου} στάδιου

❖ 2^ο στάδιο: σκίσιμο νεύρωσης

Αυξάνοντας την τιμή της νεύρωσης, το σύστημα δεν αστοχεί και καταφέρνει να μην εισέλθει η έκρηξη στο εσωτερικό του κτιρίου. Η νεύρωση αποκολλάται τοπικά ενώ οι τιμές έντασης, αντίδρασης, πλαστικής παραμόρφωσης και μέγιστου βέλους μειώνονται.

Μήκος	Πλάτος	Πάχος πλάκας	Πάχος νεύρωσης	Αντίδραση	Πλ. Παραμόρφωση	Μέγιστο βέλος
1000	200	2	7	505,32	0,48	0,554

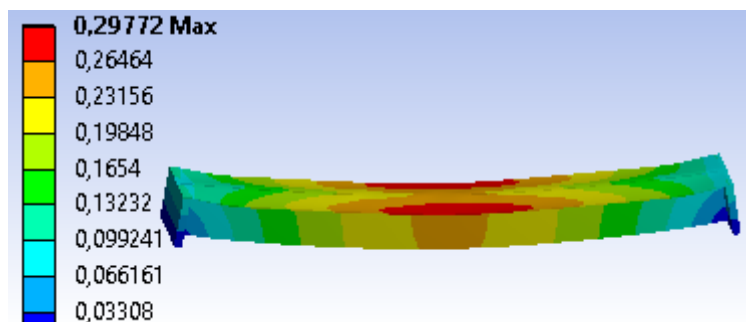


Εικόνα 4-3: Μέγιστου βέλος 2^{ου} στάδιου

❖ 3^ο στάδιο: επιθυμητή λειτουργία συστήματος

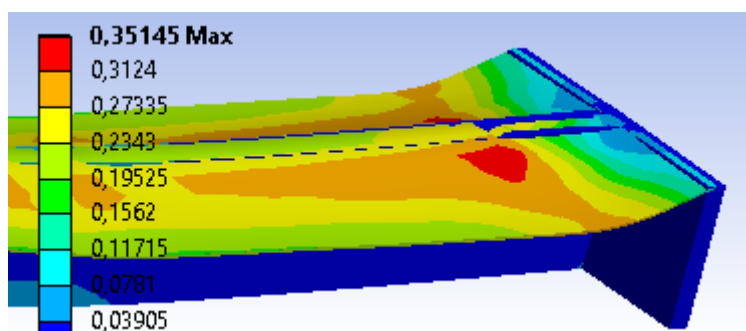
Αυξάνοντας περαιτέρω την τιμή του πάχους της νεύρωσης, το σύστημα δεν αστοχεί και καταφέρνει να μην εισέλθει η έκρηξη στο εσωτερικό του κτιρίου και η νεύρωση δεν σκίζεται τοπικά. Οι τιμές αντίδρασης, πλαστικής παραμόρφωσης αρχίζουν να αυξάνονται ενώ του μέγιστου βέλους μειώνεται.

Μήκος	Πλάτος	Πάχος πλάκας	Πάχος νεύρωσης	Αντίδραση	Πλ. Παραμόρφωση	Μέγιστο βέλος
1000	200	2	9	536,15	0,4	0,3

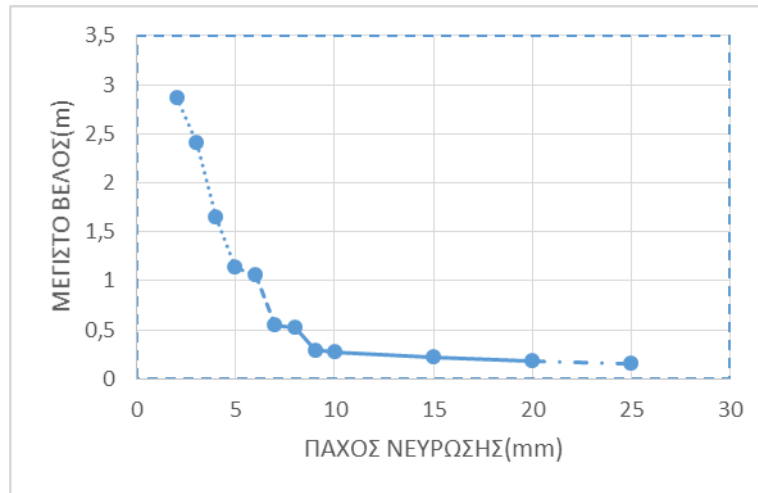
Εικόνα 4-4: Μέγιστο βέλος 3^{ου} στάδιου❖ 4^ο στάδιο: Απόσχιση πλάκας από τη νεύρωση

Αυξάνοντας πολύ περισσότερο την τιμή του πάχους της νεύρωσης, το σύστημα αστοχεί καθώς η νεύρωση σκίζει την πλάκα. Συνήθως τέτοια συμπεριφορά παρατηρείται όταν ο λόγος μεταξύ των δύο παχών είναι μεγαλύτερος του 10. Οι τιμές αντίδρασης, πλαστικής παραμόρφωσης αρχίζουν να αυξάνονται ενώ του μέγιστου βέλους μειώνεται.

Μήκος	Πλάτος	Πάχος πλάκας	Πάχος νεύρωσης	Αντίδραση	Πλ. Παραμόρφωση	Μέγιστο βέλος
1000	100	2	25	500,8	0,19	0,05

Εικόνα 4-5: Μέγιστο βέλος 4^{ου} στάδιου (λεπτομέρεια)

Τα παραπάνω στάδια αποτυπώνονται γραφικά στα διαγράμματα που ακολουθούν με τη διαφοροποίηση της γραμμής που ενώνει τα στοιχεία δύο αναλύσεων. Η γραμμή που αποτελείται από κουκίδες αναφέρεται στο πρώτο στάδιο όπου η πλάκα υποχωρεί, η διακεκομμένη αναφέρεται στο δεύτερο όπου η νεύρωση αποκόπτεται τοπικά, συνεχής γραμμή για το τρίτο στάδιο που παρουσιάζει την επιθυμητή λειτουργία του πετάσματος και τέλος διακεκομμένη με κουκίδες για το σενάριο όπου η ίδια η νεύρωση σκίζει την πλάκα. Ενδεικτικά, παρατίθεται διάγραμμα που περιλαμβάνει κάθε πιθανό στάδιο. Με αυτήν την κωδικοποίηση παρουσιάζονται όλα τα διαγράμματα αυτού του κεφαλαίου.

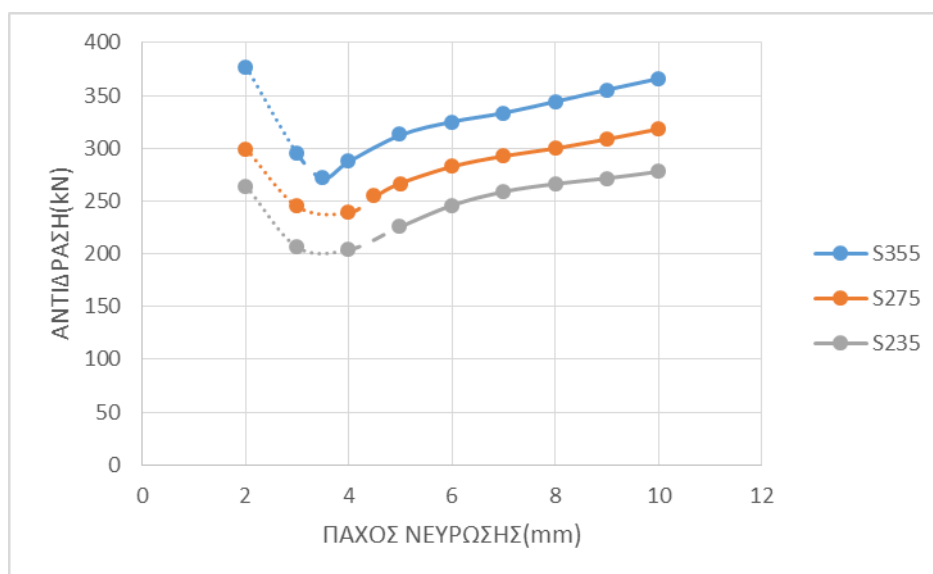


Διάγραμμα 4-4: Μέγιστο βέλος-πάχος νεύρωσης πετάσματος με χαρακτηριστικά: μήκος 1000mm, πλάτος 200 mm, πάχος πλάκας 2 mm και ποιότητας χάλυβα S355

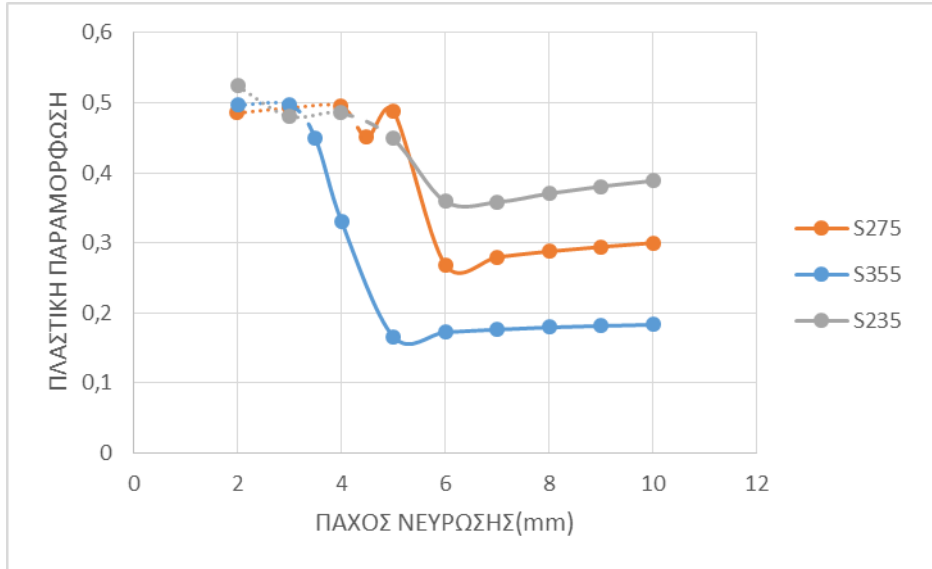
Ως προς τη διάρθρωση των αποτελεσμάτων, κάθε κεφάλαιο που ακολουθεί ελέγχει την επιρροή κάθε μεταβλητής. Πρώτα παρουσιάζονται διαγράμματα αντίδρασης, πλαστικής παραμόρφωσης και μέγιστου βέλους και έπειτα εικόνες παραμόρφωσης και έντασης χαρακτηριστικών συνδυασμών που αποτυπώνουν τα προαναφερθέντα στάδια.

4.2.1 Επιρροή ποιότητας χάλυβα και πάχους ελάσματος νεύρωσης

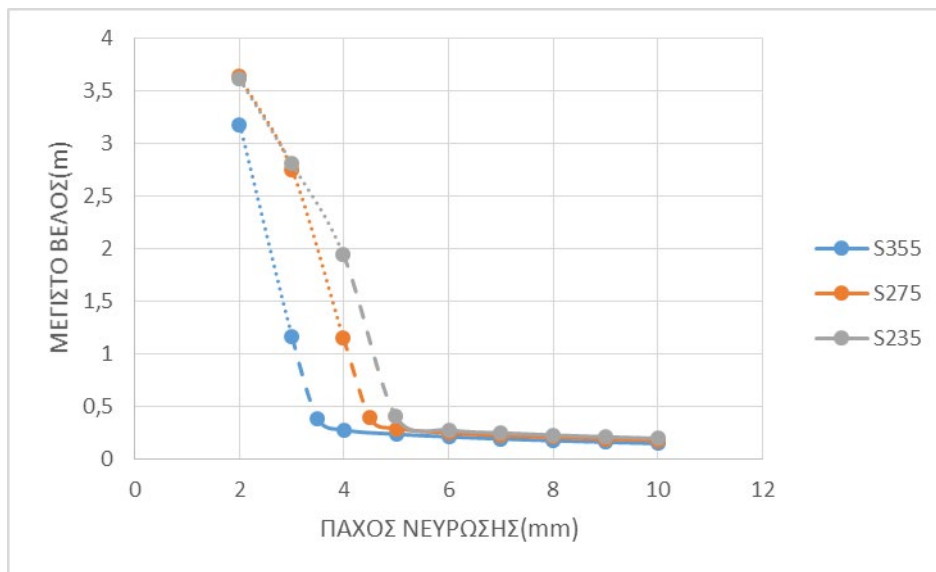
Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται η επιρροή της ποιότητας του χάλυβα στα αποτελέσματα της ανάλυσης. Έχουν επιλεγεί διαφορετικές ποιότητες χάλυβα S355, S275, S235. Σε επιλεγμένο παράδειγμα με χαρακτηριστικά πλάτος 1000mm, πλάτος 100mm, πάχος πλάκας 2mm με αυξανόμενο το πάχος της νεύρωσης, παρουσιάζονται διαγράμματα αντίδρασης, πλαστικής παραμόρφωσης και μέγιστου βέλους σε σχέση με το πάχος της νεύρωσης και ακολούθως εικόνες τάσης και παραμόρφωσης. Το παράδειγμα αυτό προσφέρεται για να σχολιαστεί και η επιρροή του πάχους του ελάσματος νεύρωσης.



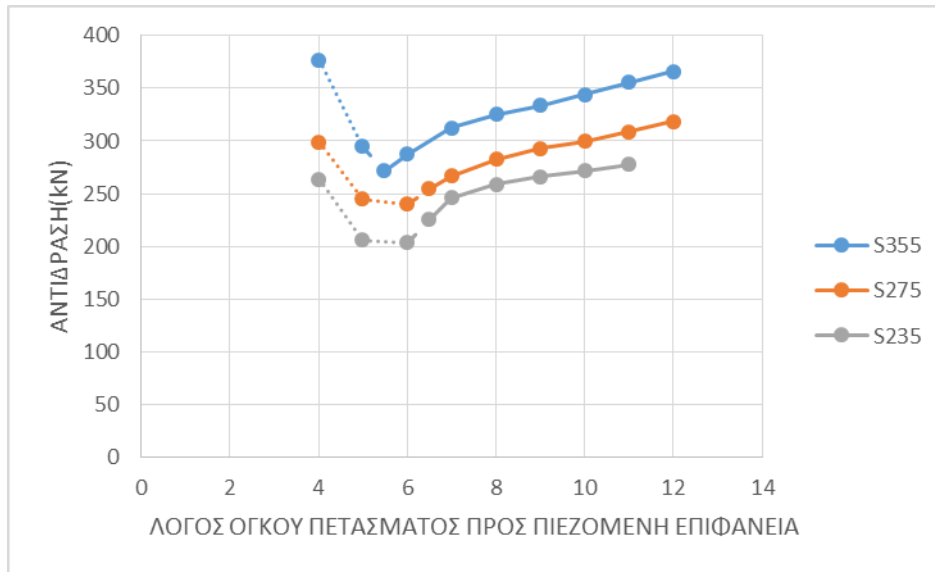
Διάγραμμα 4-5: Αντίδραση-πάχος νεύρωσης για διάφορους τύπους χάλυβα



Διάγραμμα 4-6: Πλαστική παραμόρφωση-πάχος νεύρωσης για διάφορους τύπους χάλυβα



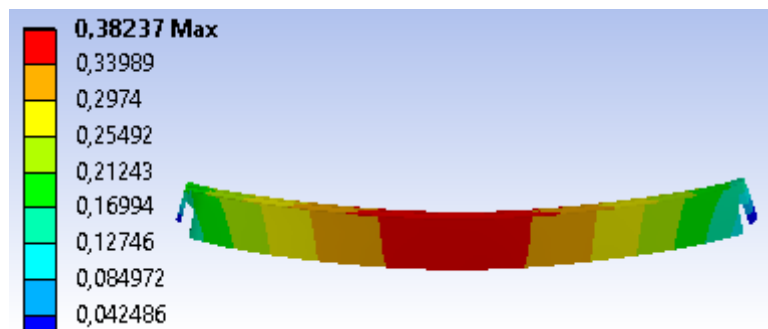
Διάγραμμα 4-7: Μέγιστο βέλος-πάχος νεύρωσης για διάφορους τύπους χάλυβα



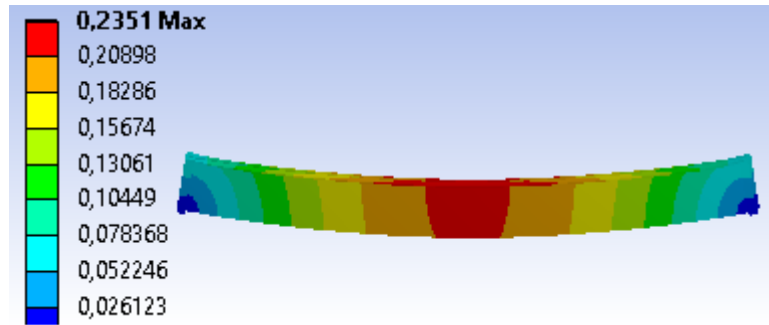
Διάγραμμα 4-8: Αντίδραση-λόγος όγκου πετάσματος προς πιεζόμενη επιφάνεια για διάφορους τύπους χάλυβα



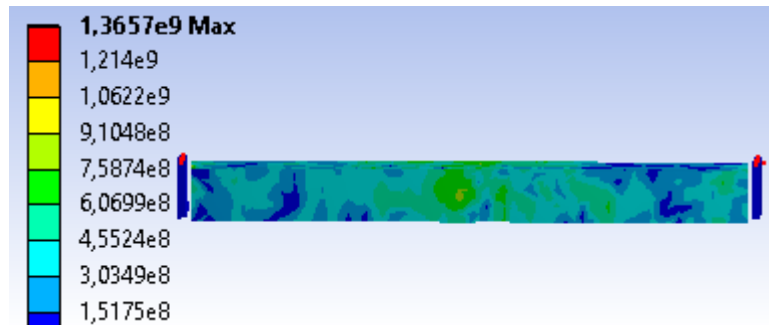
Εικόνες 4-6: Μέγιστο βέλος πετάσματος από χάλυβα ποιότητας S355 με πάχος νεύρωσης 2mm



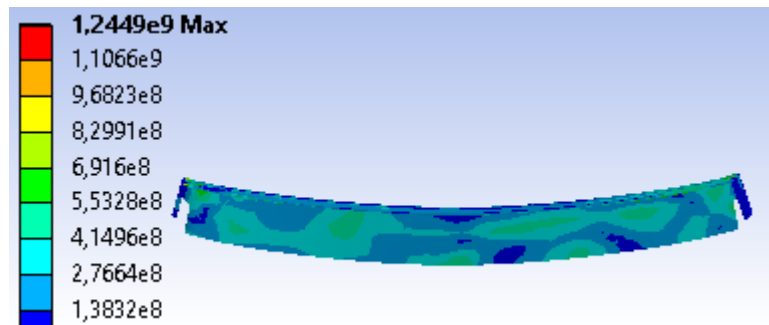
Εικόνες 4-7: Μέγιστο βέλος πετάσματος από χάλυβα ποιότητας S355 με πάχος νεύρωσης 3.5mm



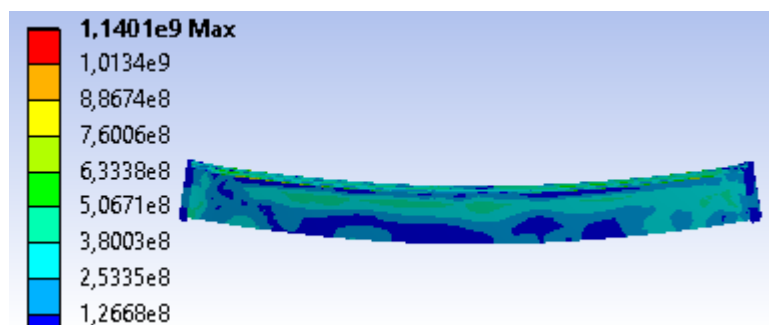
Εικόνες 4-8: Μέγιστο βέλος πετάσματος από χάλυβα ποιότητας S355 με πάχος νεύρωσης 5mm



Εικόνες 4-9: Ένταση πετάσματος χάλυβα ποιότητας S355 με πάχος νεύρωσης 2mm



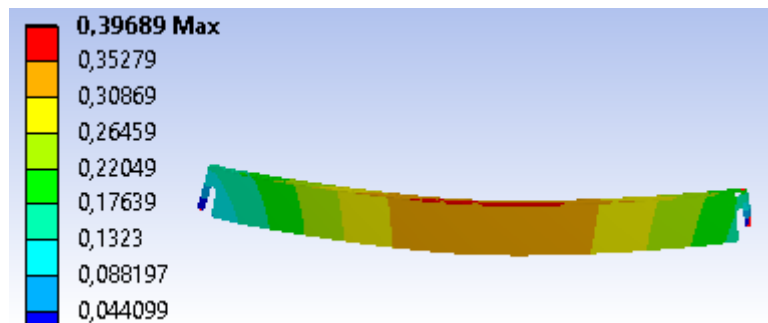
Εικόνες 4-10: Ένταση πετάσματος χάλυβα ποιότητας S355 με πάχος νεύρωσης 3.5mm



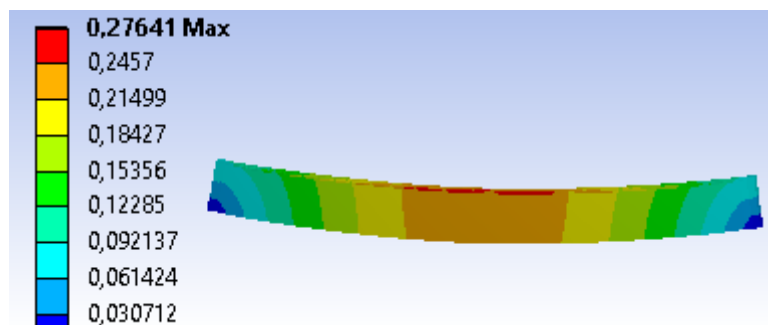
Εικόνες 4-11: Ένταση πετάσματος χάλυβα ποιότητας S355 με πάχος νεύρωσης 5mm



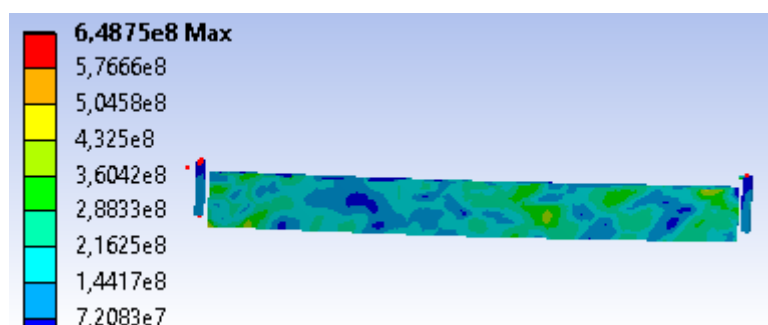
Εικόνες 4-12: Μέγιστο βέλος πετάσματος από χάλυβα ποιότητας S235 με πάχος νεύρωσης 2mm



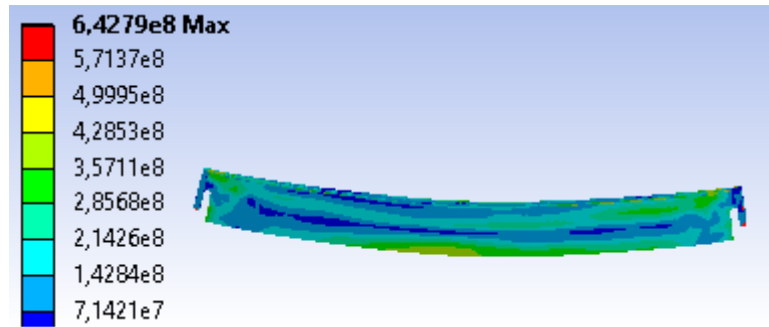
Εικόνες 4-13: Μέγιστο βέλος πετάσματος από χάλυβα ποιότητας S235 με πάχος νεύρωσης 5mm



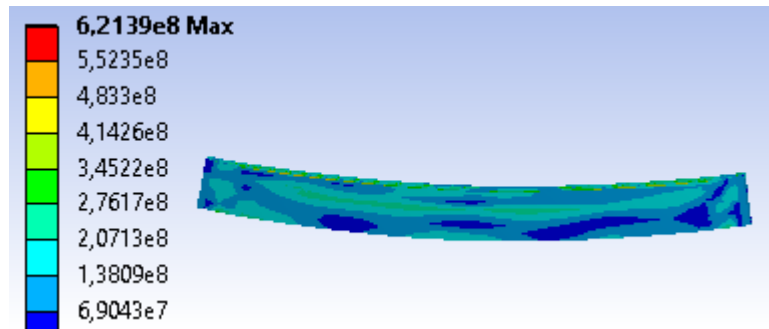
Εικόνες 4-14: Μέγιστο βέλος πετάσματος από χάλυβα ποιότητας S235 με πάχος νεύρωσης 6mm



Εικόνες 4-15: Ένταση πετάσματος από χάλυβα ποιότητας S235 με πάχος νεύρωσης 2mm, 5mm και 6mm



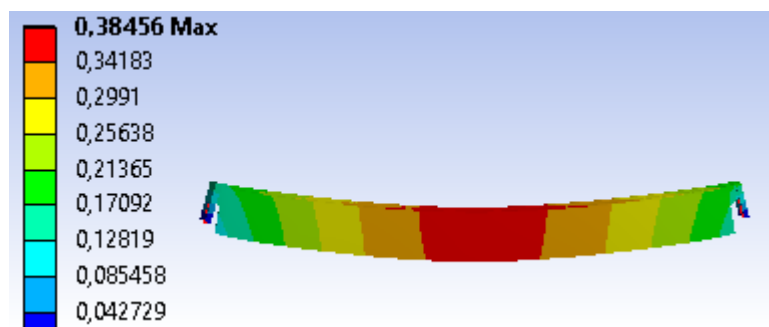
Εικόνες 4-16: Ένταση πετάσματος από χάλυβα ποιότητας S235 με πάχος νεύρωσης 5mm



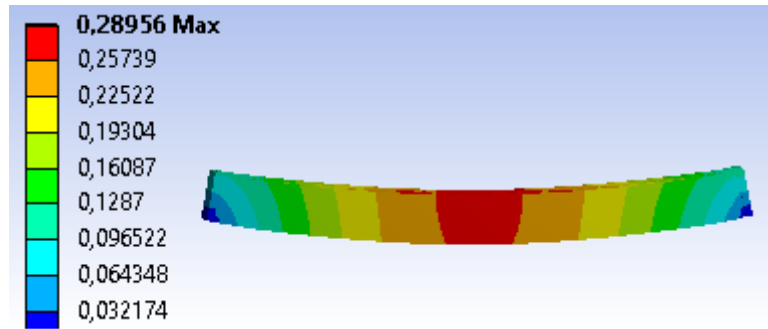
Εικόνες 4-17: Ένταση πετάσματος από χάλυβα ποιότητας S235 με πάχος νεύρωσης 6mm



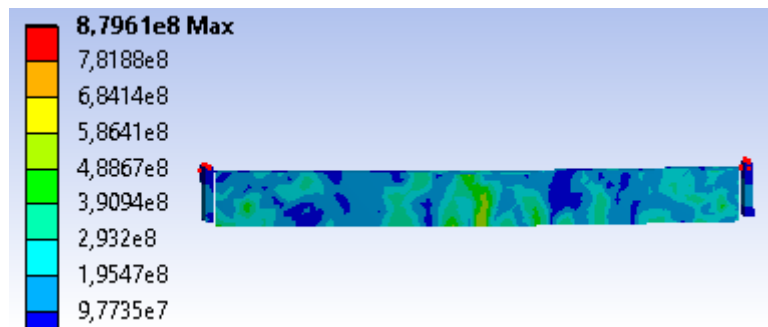
Εικόνες 4-18: Μέγιστο βέλος πετάσματος από χάλυβα ποιότητας S275 με πάχος νεύρωσης 2mm



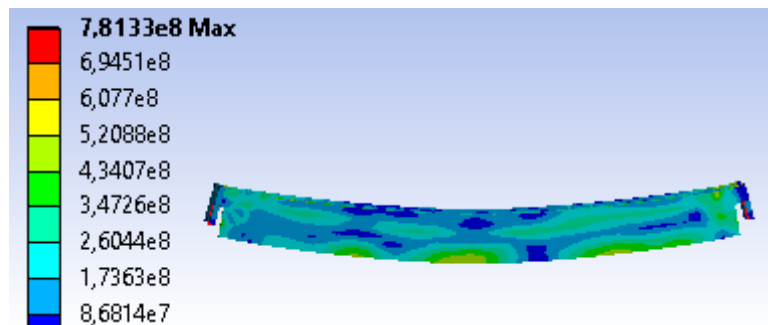
Εικόνες 4-19: Μέγιστο βέλος πετάσματος από χάλυβα ποιότητας S275 με πάχος νεύρωσης 4.5mm



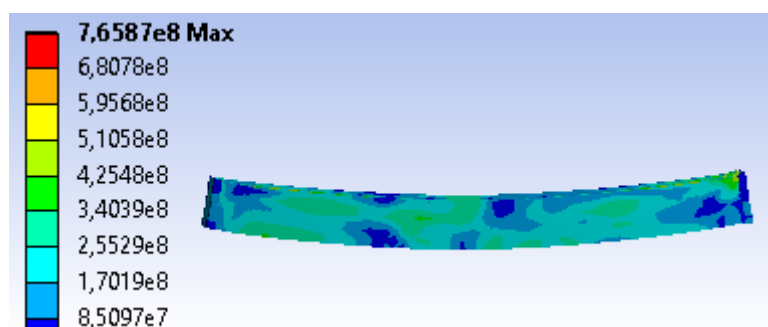
Εικόνες 4-20: Μέγιστο βέλος πετάσματος από χάλυβα ποιότητας S275 με πάχος νεύρωσης 5mm



Εικόνες 4-21: Έντασης πετάσματος από χάλυβα ποιότητας S275 με πάχος νεύρωσης 2mm



Εικόνες 4-22: Έντασης πετάσματος από χάλυβα ποιότητας S275 με πάχος νεύρωσης 4.5mm



Εικόνες 4-23: Έντασης πετάσματος από χάλυβα ποιότητας S275 με πάχος νεύρωσης 5mm

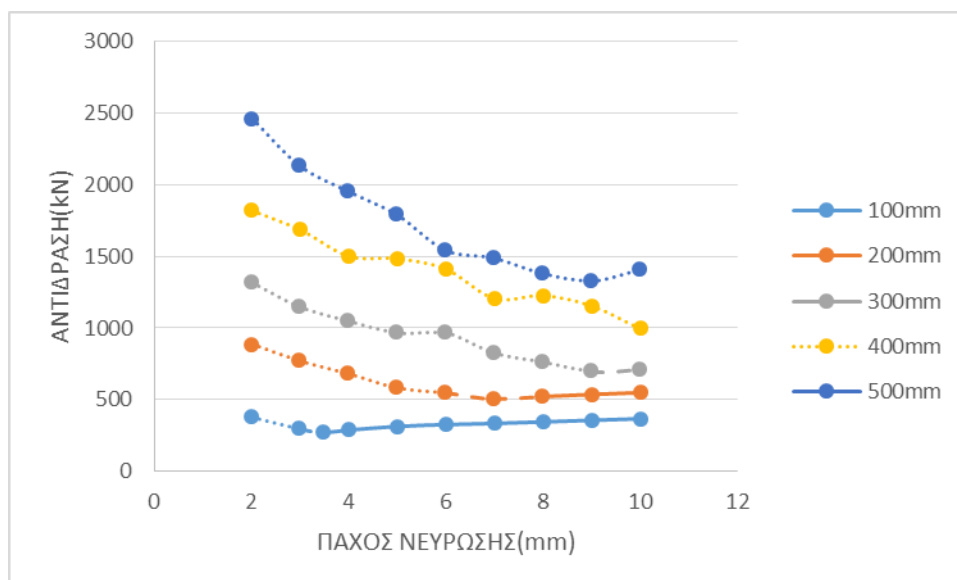
Παρατηρήσεις

Όσον αφορά το χάλυβα ως μεταβλητή παρατηρούμε ότι η επιλογή χάλυβα χαμηλότερης ποιότητας αποτελεί ορθή λύση. Αν και ίσως να αναμενόταν ο χάλυβας υψηλότερης ποιότητας λόγω μεγαλύτερης αντοχής πιο σωστή επιλογή, η φύση του φαινομένου με τον υψηλό ρυθμό παραμόρφωσης αναιρεί αυτό το συλλογισμό. Το πέτασμα που σχεδιάζεται επιθυμείται να απορροφά την περισσότερη δυνατή ενέργεια από το εκρηκτικό φαινόμενο και να το μετατρέπει σε πλαστικές παραμορφώσεις. Σε ένα φαινόμενο που ασκείται μεγάλο φορτίο, ένας χάλυβας χαμηλότερης ποιότητας εισέρχεται πιο γρήγορα στο μετελαστικό κλάδο και έτσι το υλικό αξιοποιείται σε μεγαλύτερο βαθμό. Εκτός από την πλαστική συμπεριφορά του, στο χάλυβα χαμηλής ποιότητας παρατηρούνται και μικρότερες τιμές αντίδρασης, γεγονός που επίσης τον καθιστά πιο κατάλληλο.

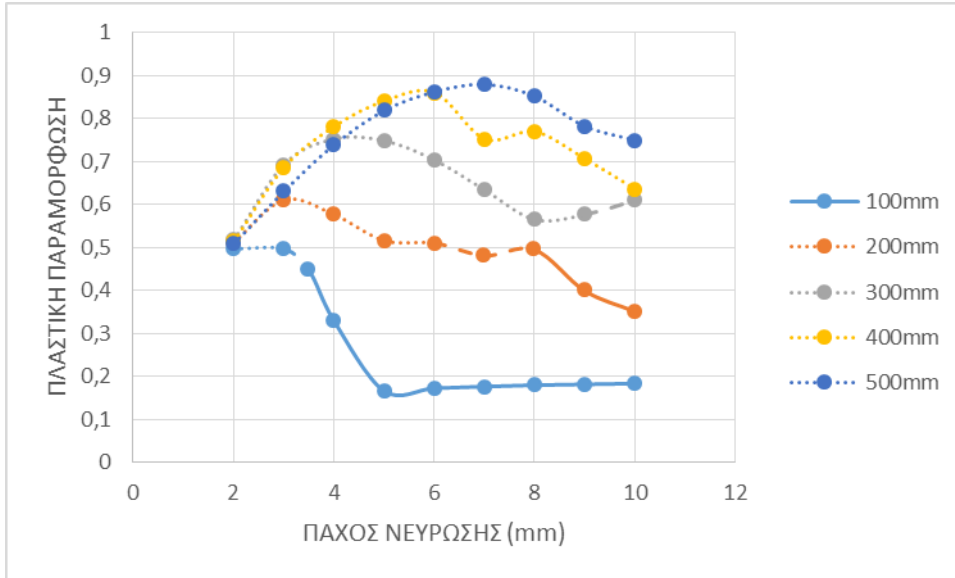
Αναφορικά με το ιδανικό πάχος νεύρωσης, αυτό συναντάται στο όριο του δεύτερου με το τρίτο στάδιο, δηλαδή ακριβώς στο σημείο όπου αυξάνοντας το πάχος της νεύρωσης, αυτή δεν αποκολλάται στην ένωση της με την πλάκα, αλλά το σύστημα λειτουργεί ιδανικά. Σε αυτό το σημείο παρατηρείται μέγιστη πλαστική παραμόρφωση κάτω από το όριο του 0,5 αλλά και ελάχιστη αντίδραση.

4.2.2 Επιρροή απόστασης μεταξύ των νευρώσεων

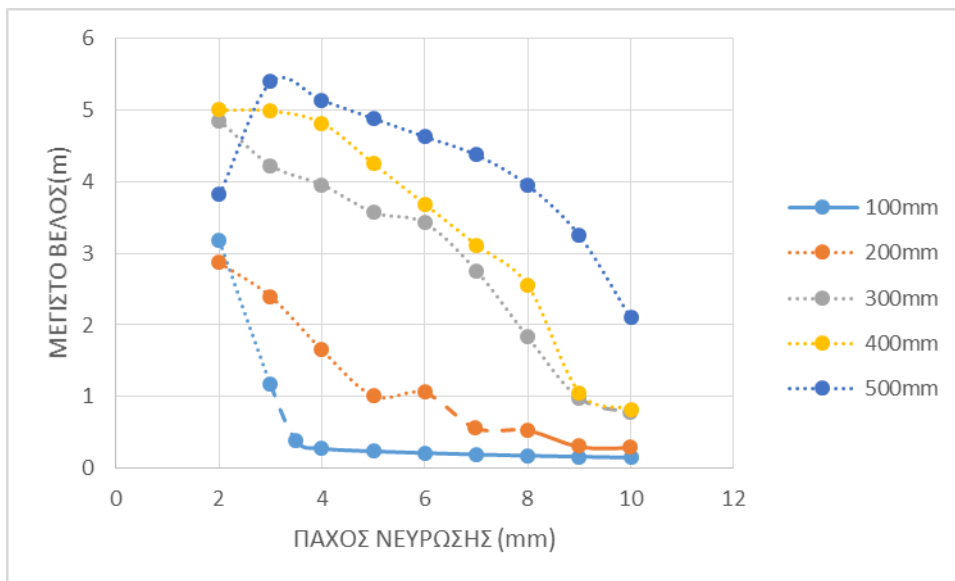
Αλλάζοντας το πάχος της πλάκας που μελετάται αυτόματα μεταβάλλεται και η σταθερή απόσταση μεταξύ των ελασμάτων νεύρωσης καθώς θεωρούμε το μοντέλο συνεχές σύστημα. Σε επιλεγμένο παράδειγμα με χάλυβα ποιότητας S355, μήκος πλάκας 1m, πάχος πλάκας 2mm με αυξανόμενο το πάχος της νεύρωσης και κυμαινόμενο το πλάτος της πλάκας από 0,1m μέχρι 0,5m παρουσιάζονται εικόνες τάσης και παραμόρφωσης και διαγράμματα αντίδρασης, πλαστικής παραμόρφωσης και μέγιστου βέλους σε σχέση με το πάχος της νεύρωσης.



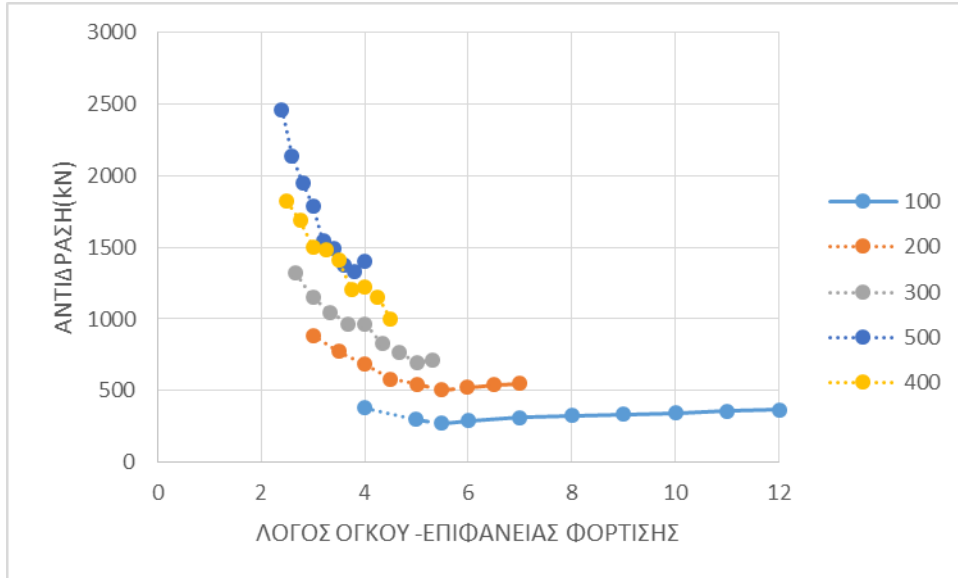
Διάγραμμα 4-9: Αντίδραση-πάχος νεύρωσης για διάφορες αποστάσεις μεταξύ των νευρώσεων



Διάγραμμα 4-10: Πλαστική παραμόρφωση-πάχος νευρώσης για διάφορες αποστάσεις μεταξύ των νευρώσεων



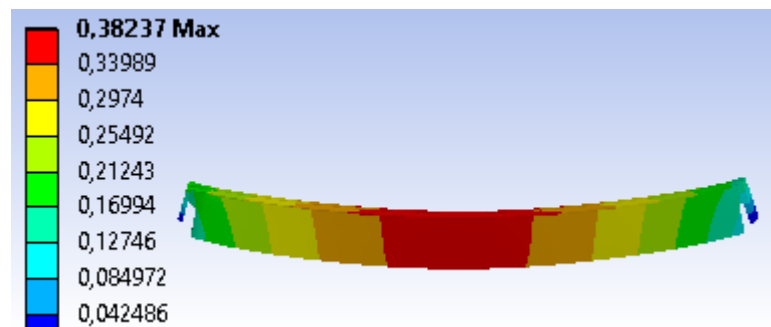
Διάγραμμα 4-11: Μέγιστο βέλος-πάχος νευρώσης για διάφορες αποστάσεις μεταξύ των νευρώσεων



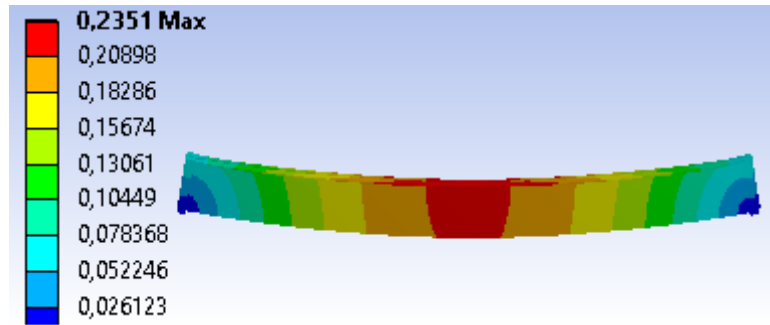
Διάγραμμα 4-12: Λόγος όγκου πετάσματος-επιφάνεια φόρτισης για διάφορες αποστάσεις μεταξύ των νευρώσεων



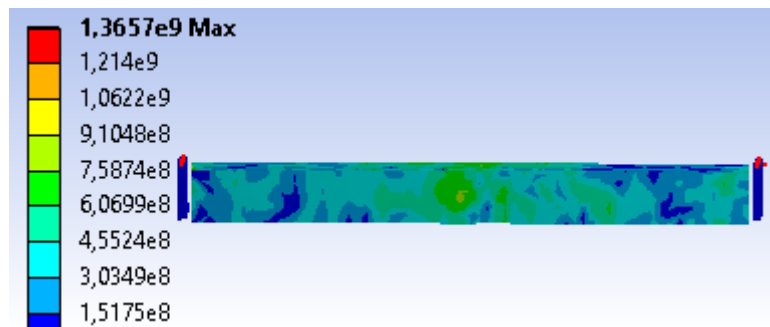
Εικόνες 4-24: Μέγιστο βέλος πετάσματος με απόσταση νευρώσεων 100mm με πάχος νεύρωσης 2mm



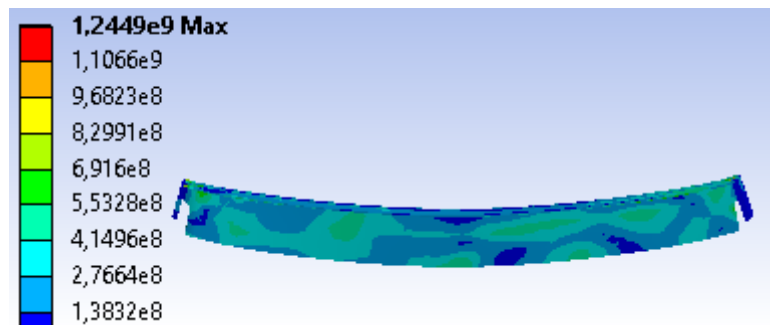
Εικόνες 4-25: Μέγιστο βέλος πετάσματος με απόσταση νευρώσεων 100mm με πάχος νεύρωσης 3.5 mm



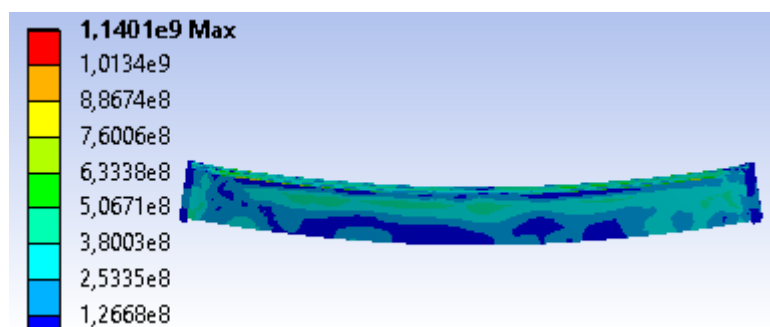
Εικόνες 4-26: Μέγιστο βέλος πετάσματος με απόσταση νευρώσεων 100mm με πάχος νεύρωσης 5mm



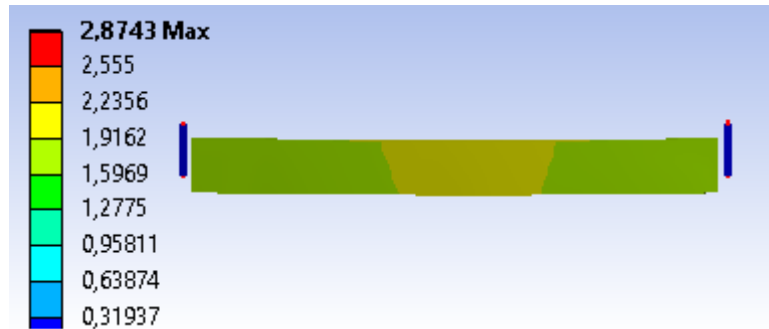
Εικόνες 4-27: Ένταση πετάσματος με απόσταση νευρώσεων 100mm με πάχος νεύρωσης 2mm



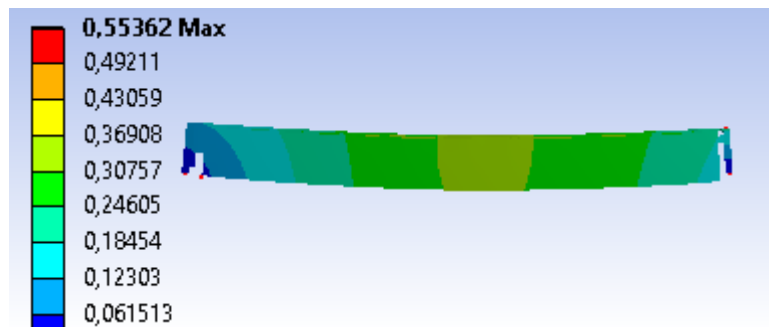
Εικόνες 4-28: Ένταση πετάσματος με απόσταση νευρώσεων 100mm με πάχος νεύρωσης 3.5mm



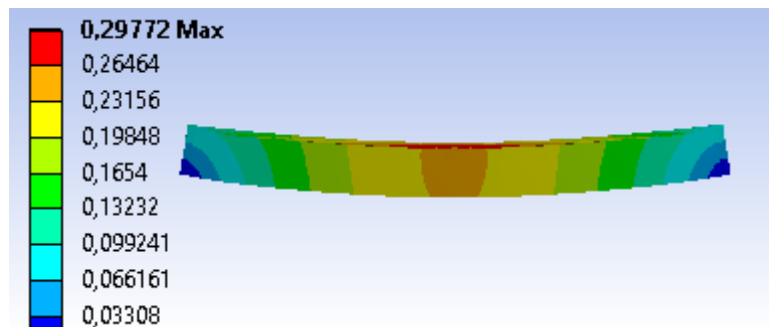
Εικόνες 4-29: Ένταση πετάσματος με απόσταση νευρώσεων 100mm με πάχος νεύρωσης 5mm



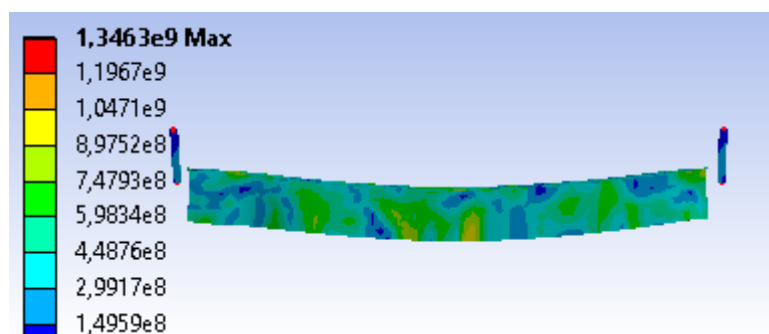
Εικόνες 4-30: Μέγιστο βέλος πετάσματος με απόσταση νευρώσεων 200mm με πάχος νευρώσης 2mm



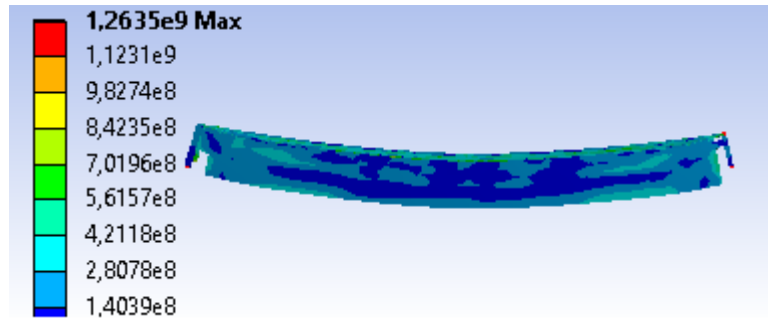
Εικόνες 4-31: Μέγιστο βέλος πετάσματος με απόσταση νευρώσεων 200mm με πάχος νευρώσης 7 mm



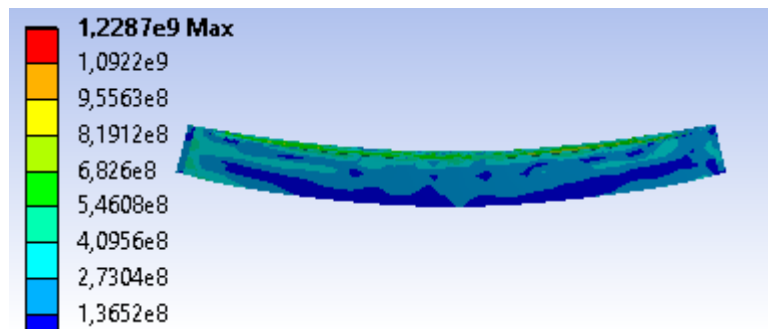
Εικόνες 4-32: Μέγιστο βέλος πετάσματος με απόσταση νευρώσεων 200mm με πάχος νευρώσης 9mm



Εικόνες 4-33: Ένταση πετάσματος με απόσταση νευρώσεων 200mm με πάχος νευρώσης 2mm



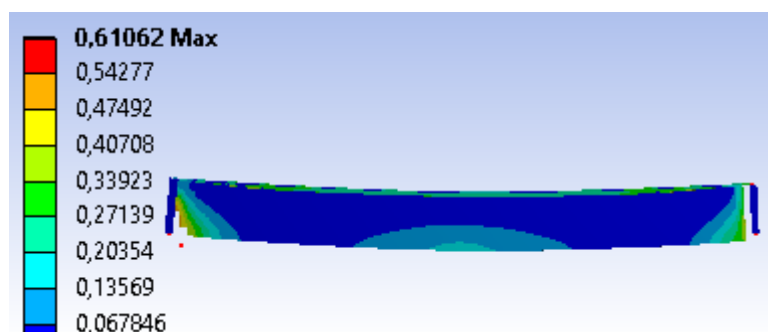
Εικόνες 4-34: Ένταση πετάσματος με απόσταση νευρώσεων 200mm με πάχος νεύρωσης 7 mm



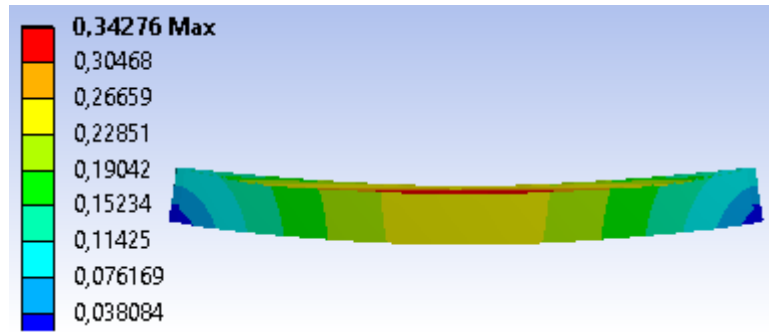
Εικόνες 4-35: Ένταση πετάσματος με απόσταση νευρώσεων 200mm με πάχος νεύρωσης 9mm



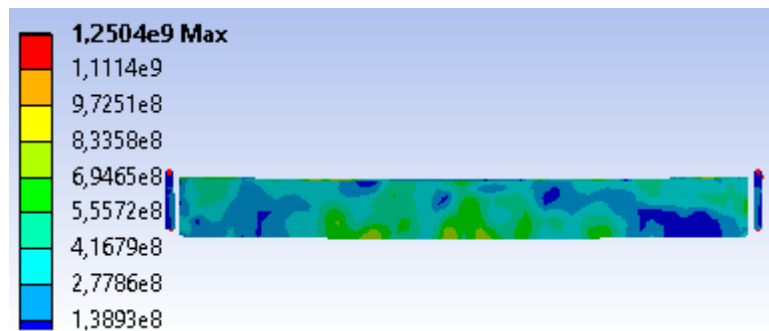
Εικόνες 4-36: Μέγιστο βέλος πετάσματος με απόσταση νευρώσεων 300mm με πάχος νεύρωσης 3mm



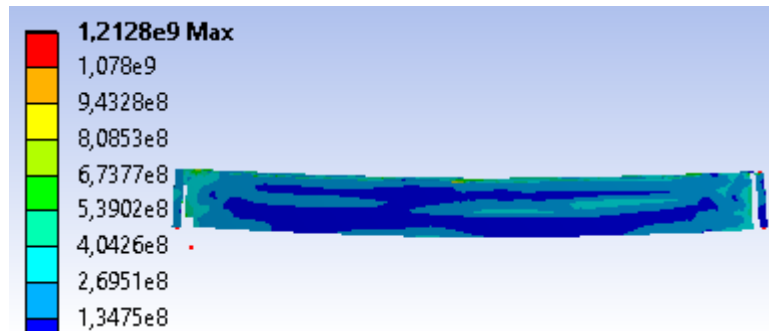
Εικόνες 4-37: Μέγιστο βέλος πετάσματος με απόσταση νευρώσεων 300mm με πάχος νεύρωσης 10mm



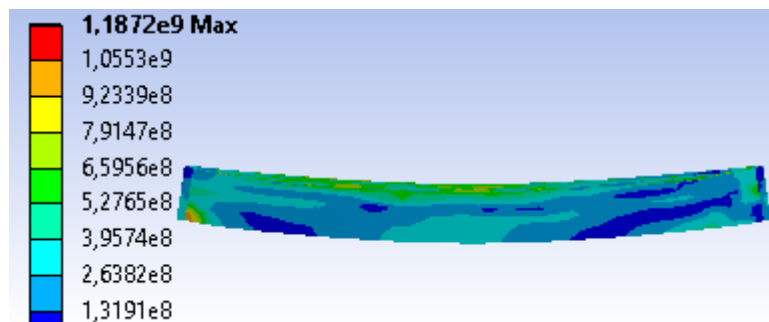
Εικόνες 4-38: Μέγιστο βέλος πετάσματος με απόσταση νευρώσεων 300mm με πάχος νεύρωσης 13mm



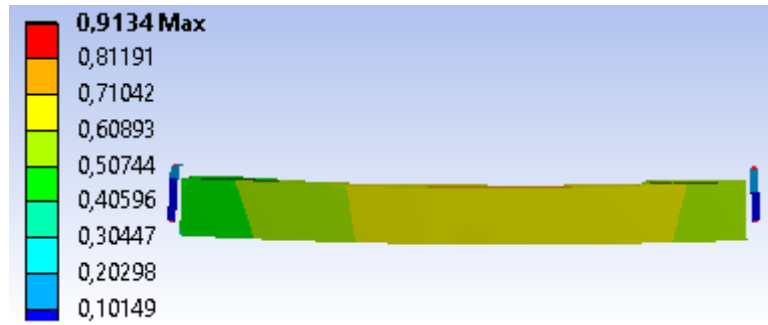
Εικόνες 4-39: Ένταση πετάσματος με απόσταση νευρώσεων 300mm με πάχος νεύρωσης 3mm



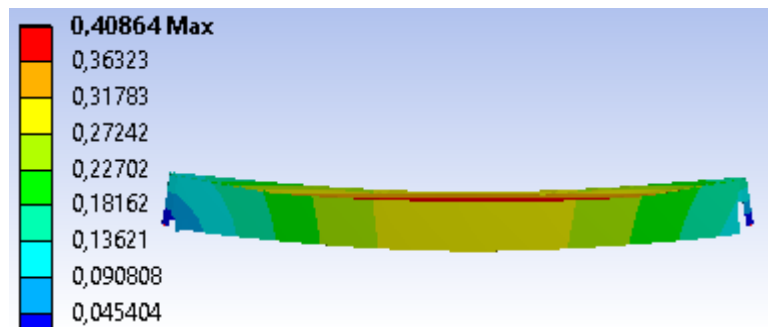
Εικόνες 4-40: Ένταση πετάσματος με απόσταση νευρώσεων 300mm με πάχος νεύρωσης 10mm



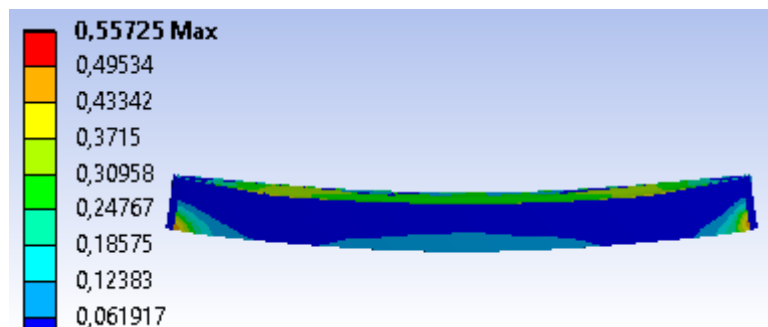
Εικόνες 4-41: Ένταση πετάσματος με απόσταση νευρώσεων 300mm με πάχος νεύρωσης 13mm



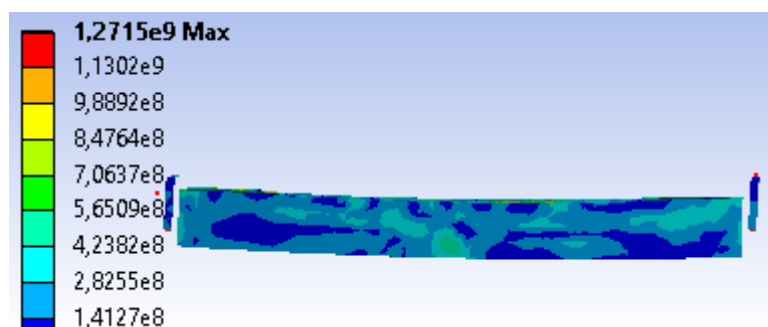
Εικόνες 4-42: Μέγιστο βέλος πετάσματος με απόσταση νευρώσεων 400mm με πάχος νεύρωσης 9mm



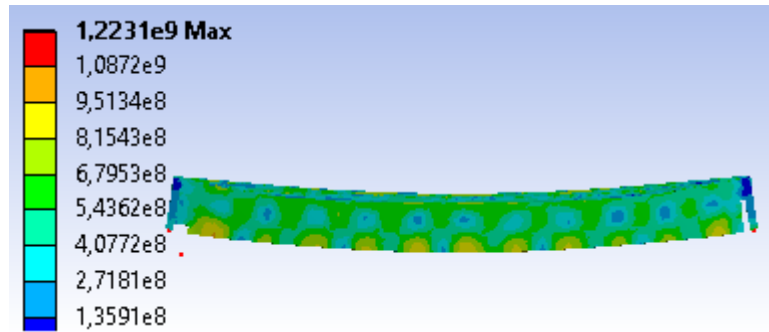
Εικόνες 4-43: Μέγιστο βέλος πετάσματος με απόσταση νευρώσεων 400mm με πάχος νεύρωσης 15mm



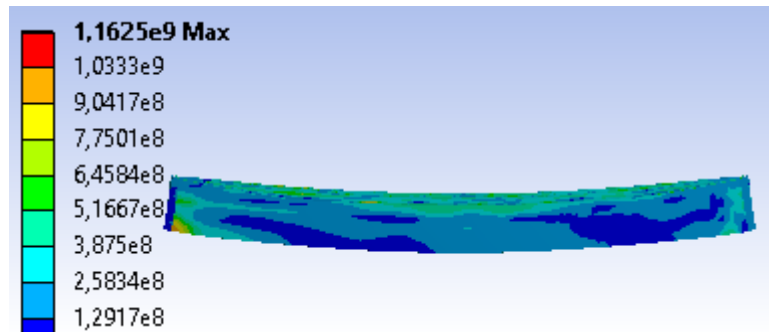
Εικόνες 4-44: Μέγιστο βέλος πετάσματος με απόσταση νευρώσεων 400mm με πάχος νεύρωσης 18mm



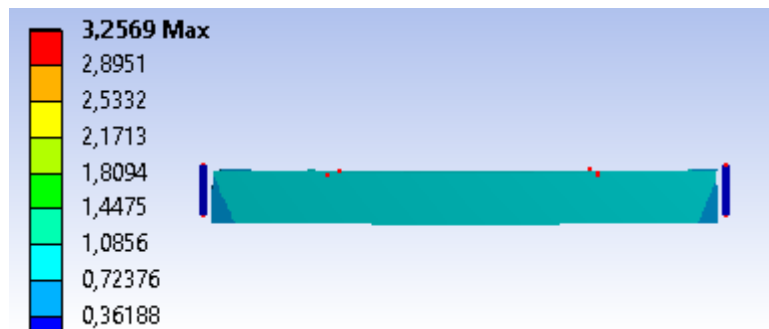
Εικόνες 4-45: Ένταση πετάσματος με απόσταση νευρώσεων 400mm με πάχος νεύρωσης 9mm



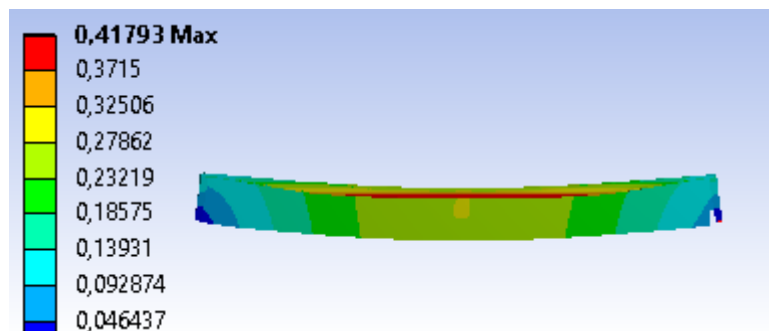
Εικόνες 4-46: Ένταση πετάσματος με απόσταση νευρώσεων 400mm με πάχος νεύρωσης 15mm



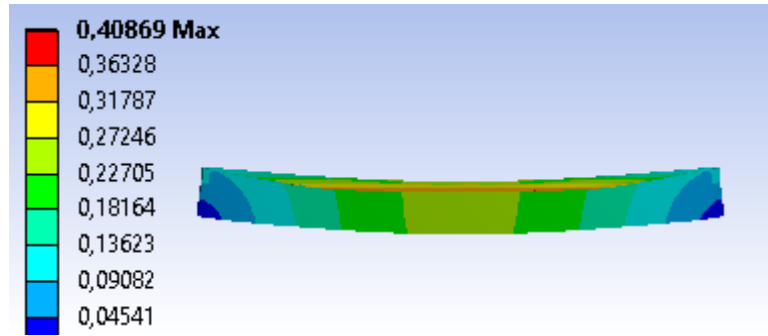
Εικόνες 4-47: Ένταση πετάσματος με απόσταση νευρώσεων 400mm με πάχος νεύρωσης 18mm



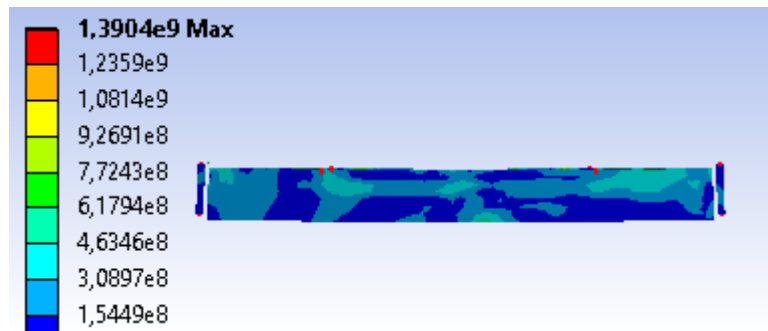
Εικόνες 4-48: Μέγιστο βέλος πετάσματος με απόσταση νευρώσεων 500mm με πάχος νεύρωσης 9mm



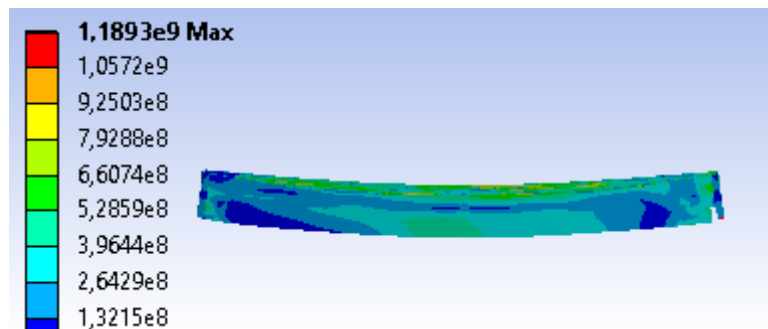
Εικόνες 4-49: Μέγιστο βέλος πετάσματος με απόσταση νευρώσεων 500mm με πάχος νεύρωσης 20mm



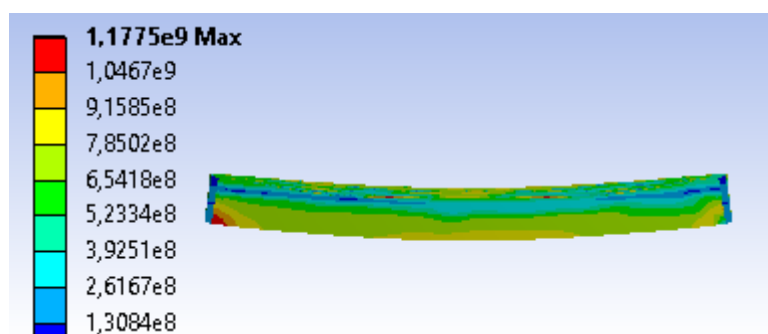
Εικόνες 4-50: Μέγιστο βέλος πετάσματος με απόσταση νευρώσεων 500mm με πάχος νεύρωσης 21mm



Εικόνες 4-51: Ένταση πετάσματος με απόσταση νευρώσεων 500mm με πάχος νεύρωσης 9mm



Εικόνες 4-52: Ένταση πετάσματος με απόσταση νευρώσεων 500mm με πάχος νεύρωσης 20mm



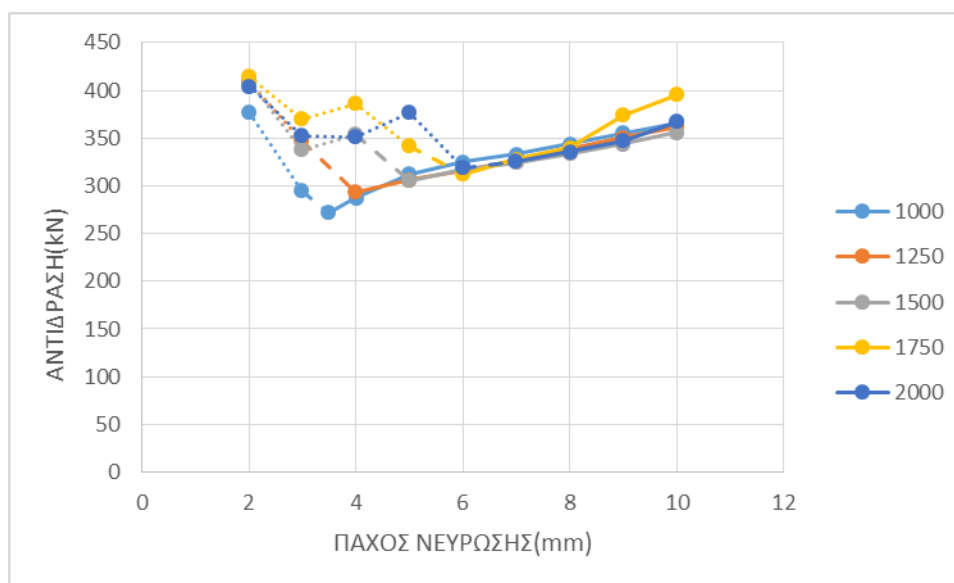
Εικόνες 4-53: Ένταση πετάσματος με απόσταση νευρώσεων 500mm με πάχος νεύρωσης 21mm

Παρατηρήσεις

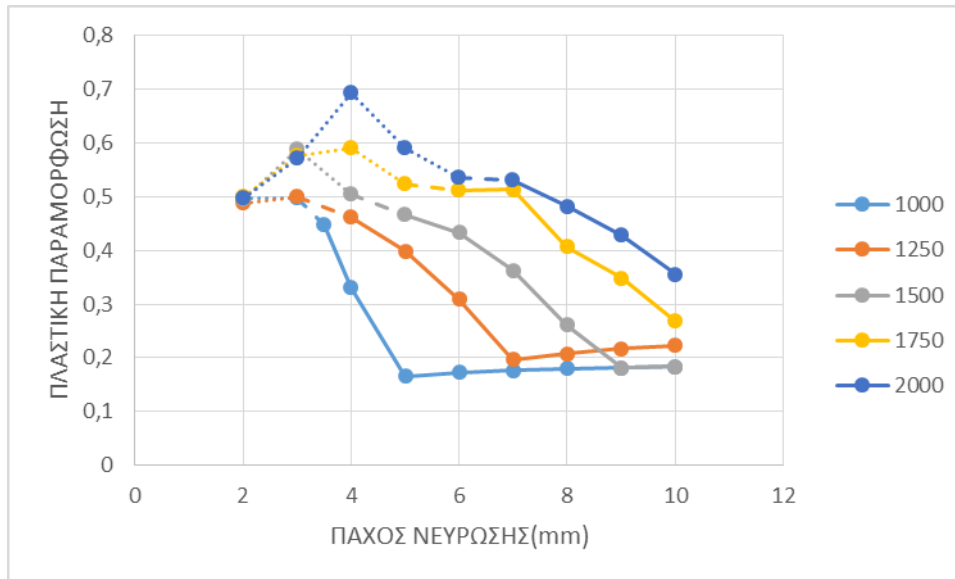
Με σταθερές τις υπόλοιπες μεταβλητές, όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών νευρώσεων, τόσο αυξάνεται και η επιφάνεια φόρτισης που επηρεάζει το σύστημα που μελετάται. Ως αποτέλεσμα, η αντίδραση, η πλαστική παραμόρφωση αλλά και το πλάτος είναι ανάλογα μεγέθη της απόστασης μεταξύ των νευρώσεων. Παρ' όλα αυτά, ένα μικρό πλάτος, όπως 100mm, παρατηρείται ότι δεν εκμεταλλεύεται πλήρως τις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα και παρατηρούνται μικρές πλαστικές παραμορφώσεις. Επιπροσθέτως, ένα τέτοιο πλάτος, ίσως να μην είναι και λειτουργικό στην κατασκευή λόγω των πολλών συγκολλήσεων. Τα μεγαλύτερα πλάτη σε σχέση με τα μικρότερα, αστοχούν σε πολύ μεγαλύτερο πάχος νεύρωσης γεγονός που δεν τα καθιστά οικονομικά. Ιδανικό πλάτος θεωρούμε κάποιο με ενδιάμεση τιμή όπως 200mm, καθώς και είναι λειτουργικό καθώς και παρουσιάζει πλαστικές παραμορφώσεις στο όριο του 0,5 και χαμηλές αντιδράσεις.

4.2.3 Επιρροή μήκους πλάκας

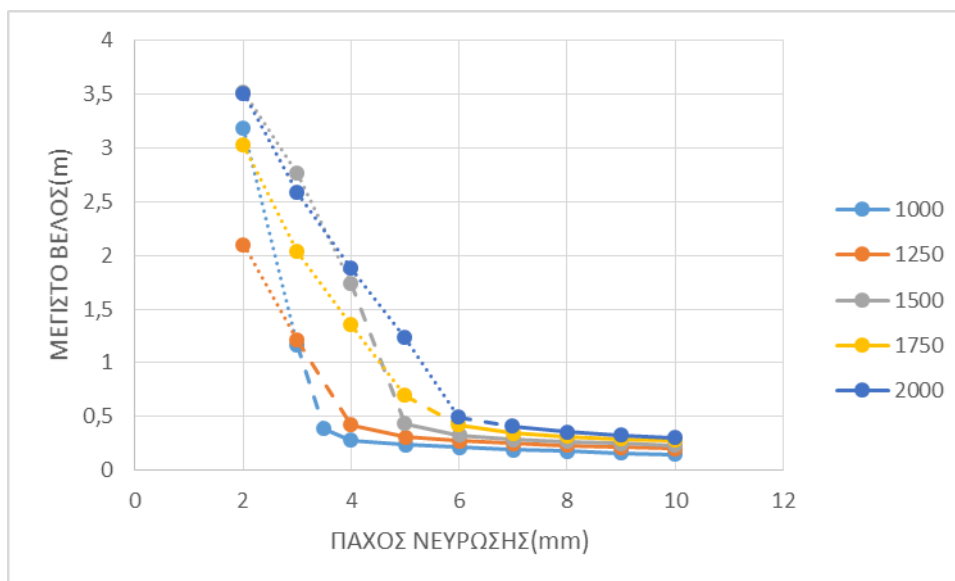
Αλλάζοντας το μήκος της πλάκας που μελετάται αυτόματα μεταβάλλεται και το μήκος της νεύρωσης. Σε επιλεγμένο παράδειγμα με χάλυβα ποιότητας S355, πλάτος πλάκας 100mm, πάχος πλάκας 2mm με αυξανόμενο το πάχος της νεύρωσης και κυμαινόμενο το μήκος της πλάκας από 1m μέχρι 2m με βήμα 0,25m, παρουσιάζονται εικόνες τάσης και παραμόρφωσης και διαγράμματα αντίδρασης, πλαστικής παραμόρφωσης και μέγιστου βέλους σε σχέση με το πάχος της νεύρωσης.



Διάγραμμα 4-12: Αντίδραση-πάχος νεύρωσης για διάφορα μήκη πλάκας



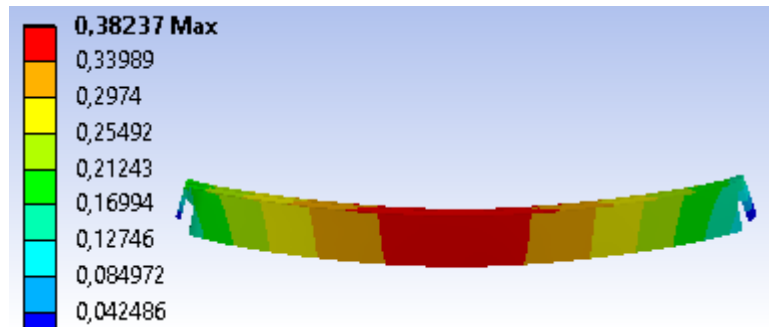
Διάγραμμα 4-13: Πλαστική παραμόρφωση-πάχος νευρώσης για διάφορα μήκη πλάκας



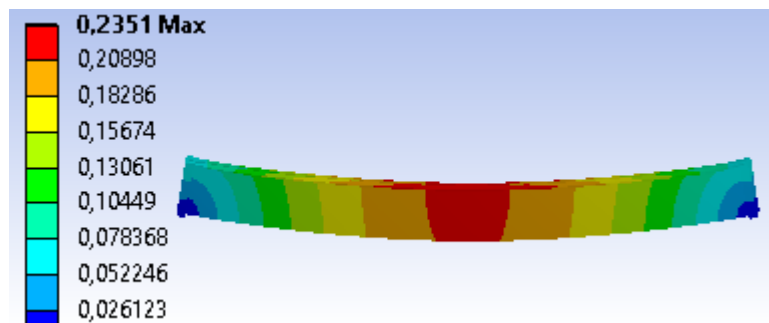
Διάγραμμα 4-14: Μέγιστο βέλος-πάχος νευρώσης για διάφορα μήκη πλάκας



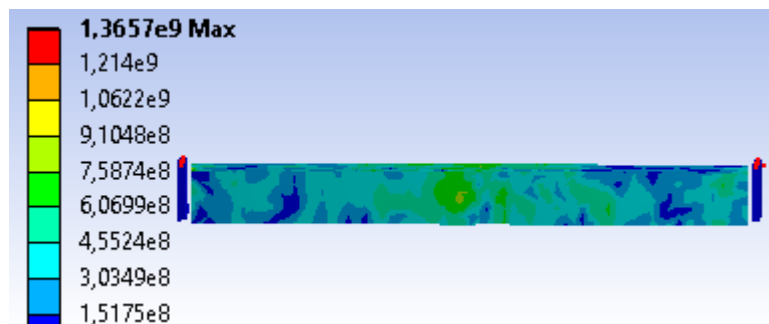
Εικόνες 4-54: Μέγιστο βέλος πετάσματος μήκους 1000mm με πάχος νεύρωσης 2mm



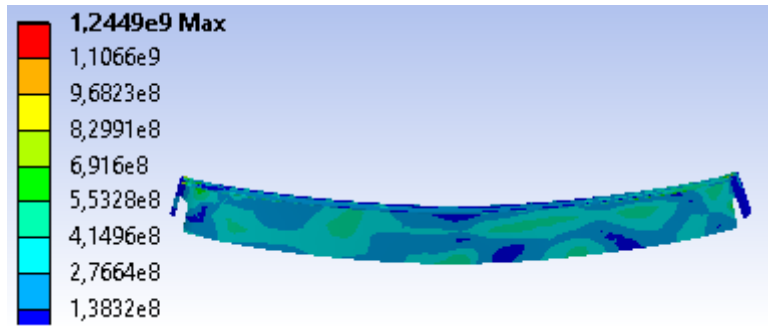
Εικόνες 4-55: Μέγιστο βέλος πετάσματος μήκους 1000mm με πάχος νεύρωσης 3.5 mm



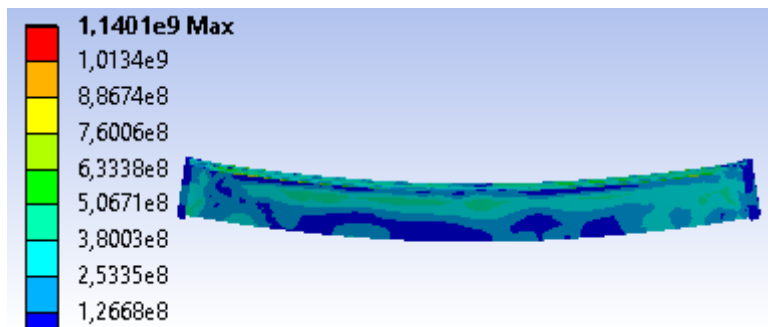
Εικόνες 4-56: Μέγιστο βέλος πετάσματος μήκους 1000mm με πάχος νεύρωσης 5mm



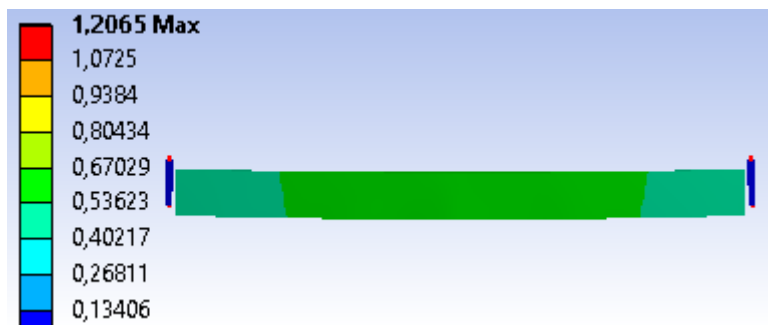
Εικόνες 4-57: Ένταση πετάσματος μήκους 1000mm με πάχος νεύρωσης 2mm



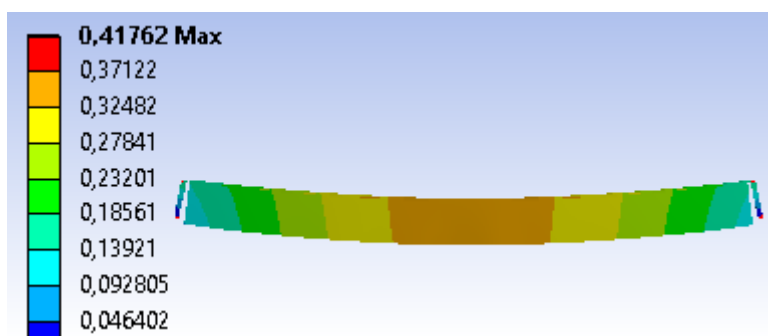
Εικόνες 4-58: Ένταση πετάσματος μήκους 1000mm με πάχος νεύρωσης 3.5mm



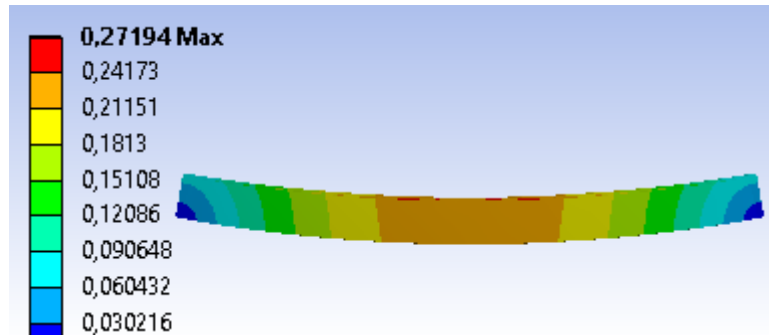
Εικόνες 4-59: Ένταση πετάσματος μήκους 1000mm με πάχος νεύρωσης 5mm



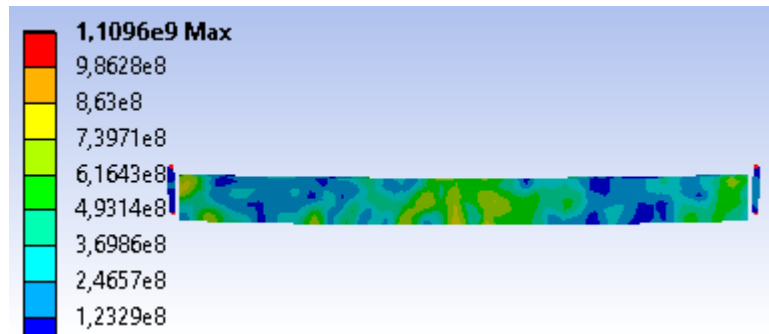
Εικόνες 4-60: Μέγιστο βέλος πετάσματος μήκους 1250mm με πάχος νεύρωσης 3mm



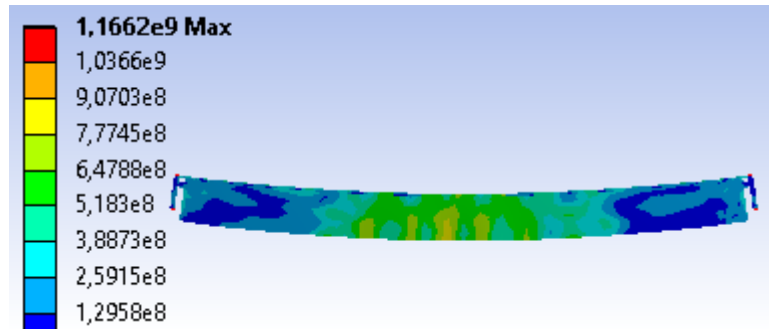
Εικόνες 4-61: Μέγιστο βέλος πετάσματος μήκους 1250mm με πάχος νεύρωσης 4mm



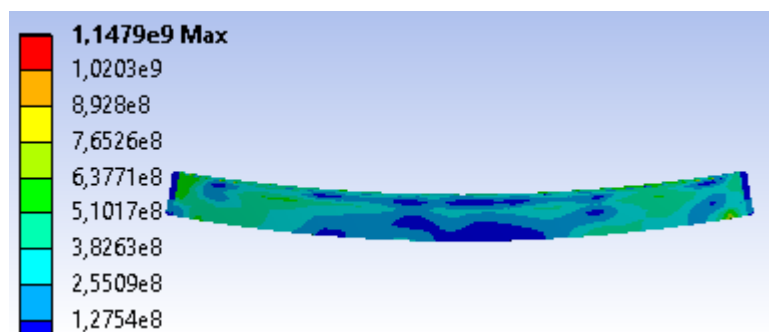
Εικόνες 4-62: Μέγιστο βέλος πετάσματος μήκους 1250mm με πάχος νεύρωσης 6mm



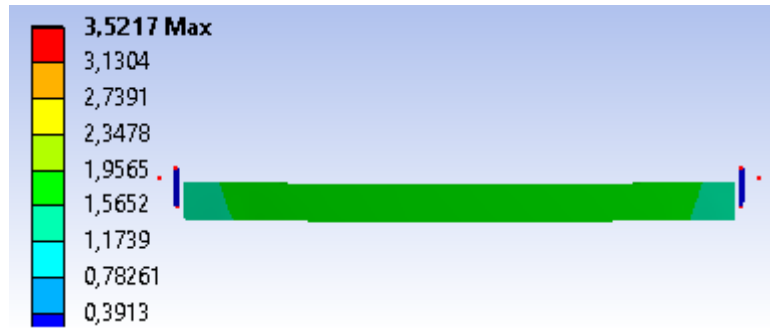
Εικόνες 4-63: Ένταση πετάσματος μήκους 1250mm με πάχος νεύρωσης 3mm



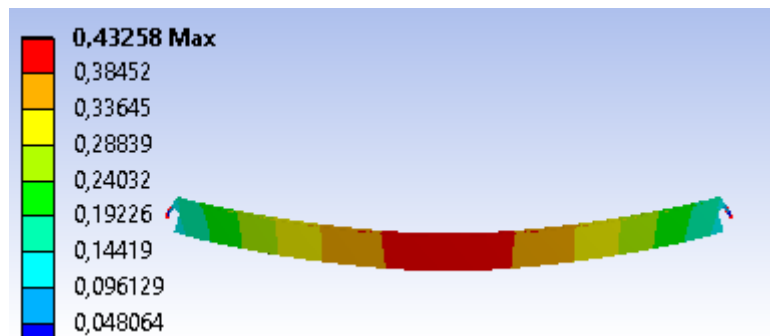
Εικόνες 4-64: Ένταση πετάσματος μήκους 1250mm με πάχος νεύρωσης 4mm



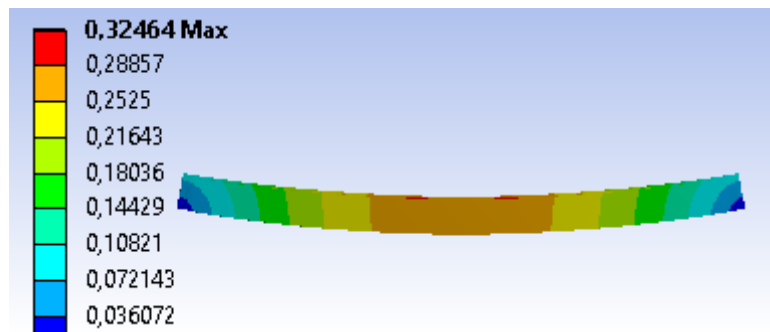
Εικόνες 4-65: Ένταση πετάσματος μήκους 1250mm με πάχος νεύρωσης 6mm



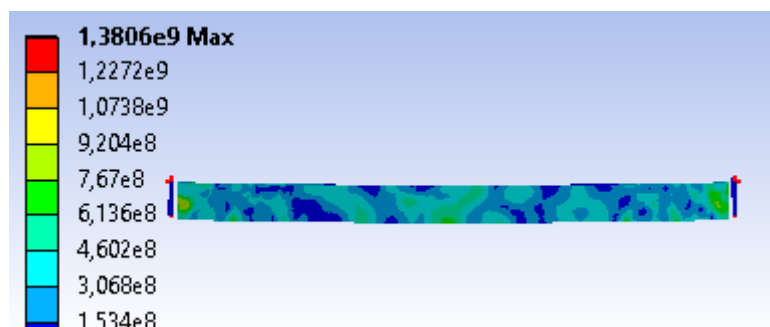
Εικόνες 4-66: Μέγιστο βέλος πετάσματος μήκους 1500mm με πάχος νεύρωσης 2mm



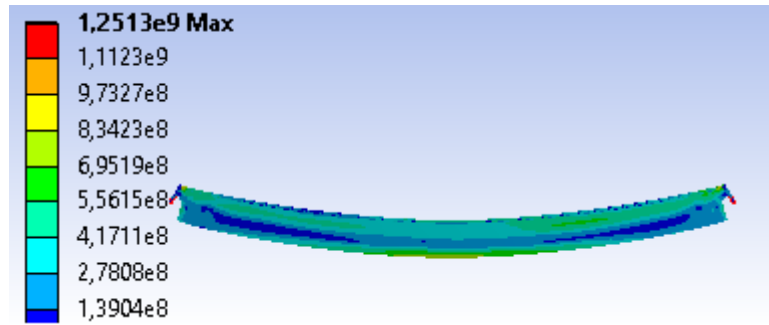
Εικόνες 4-67: Μέγιστο βέλος πετάσματος μήκους 1500mm με πάχος νεύρωσης 5mm



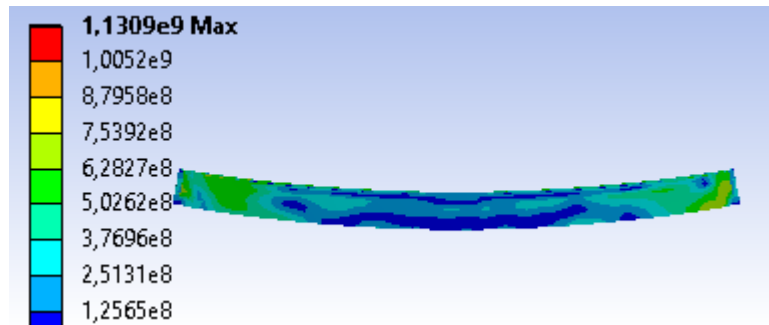
Εικόνες 4-68: Μέγιστο βέλος πετάσματος μήκους 1500mm με πάχος νεύρωσης 6mm



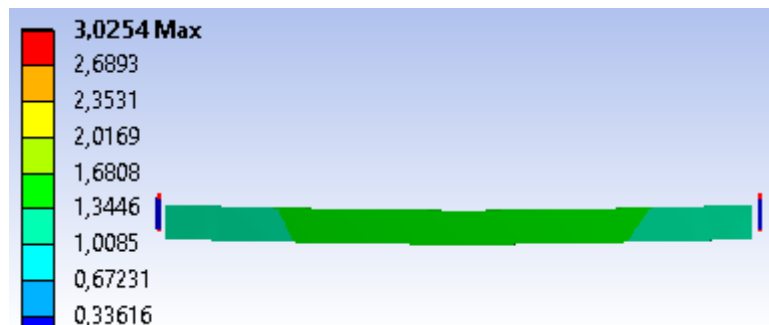
Εικόνες 4-69: Ένταση πετάσματος μήκους 1500mm με πάχος νεύρωσης 2mm



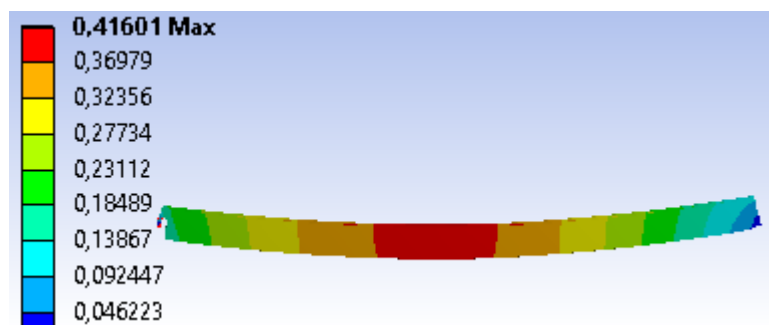
Εικόνες 4-70: Ένταση πετάσματος μήκους 1500mm με πάχος νεύρωσης 5mm



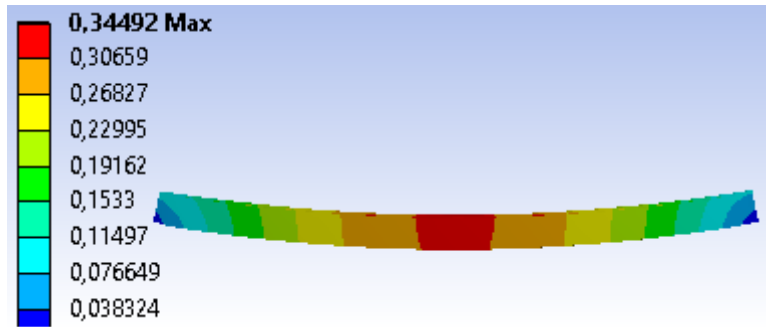
Εικόνες 4-71: Ένταση πετάσματος μήκους 1500mm με πάχος νεύρωσης 6mm



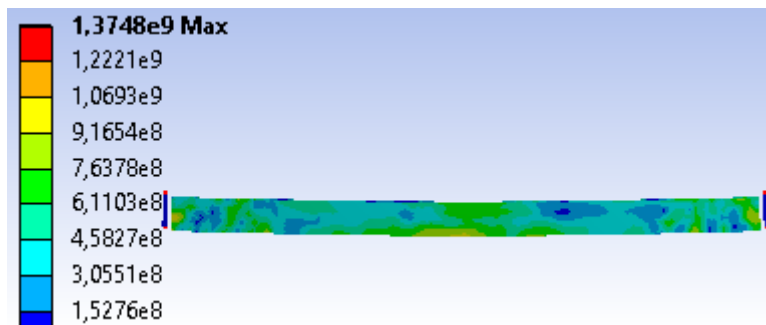
Εικόνες 4-72: Μέγιστο βέλος πετάσματος μήκους 1750mm με πάχος νεύρωσης 2mm



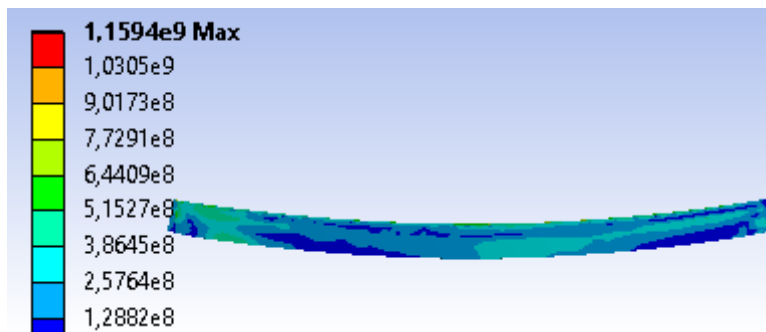
Εικόνες 4-73: Μέγιστο βέλος πετάσματος μήκους 1750mm με πάχος νεύρωσης 6mm



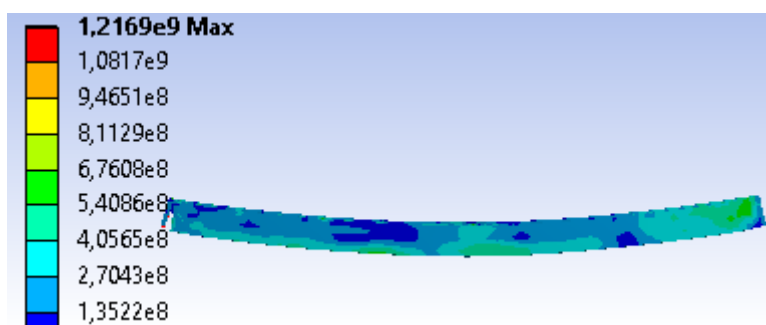
Εικόνες 4-74: Μέγιστο βέλος πετάσματος μήκους 1750mm με πάχος νεύρωσης 7mm



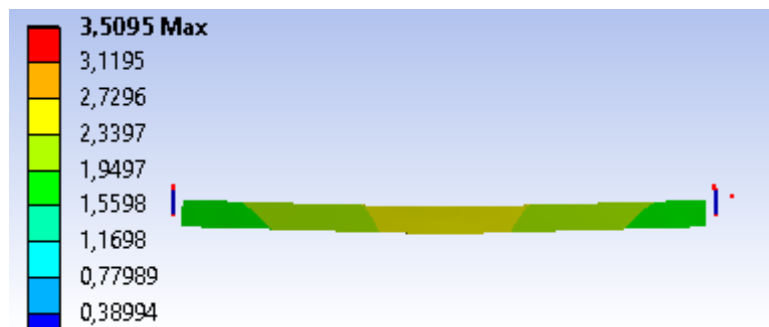
Εικόνες 4-75: Ένταση πετάσματος μήκους 1750mm με πάχος νεύρωσης 2mm



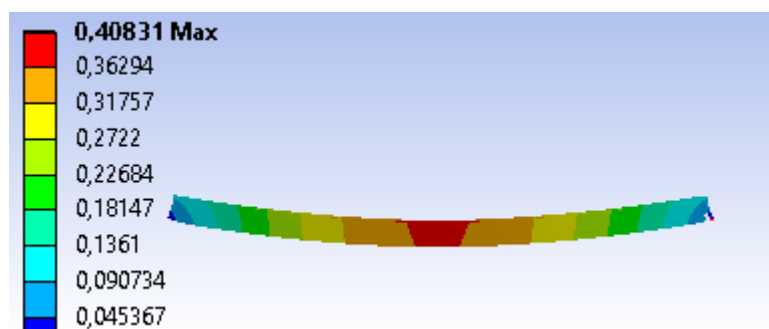
Εικόνες 4-76: Ένταση πετάσματος μήκους 1750mm με πάχος νεύρωσης 6mm



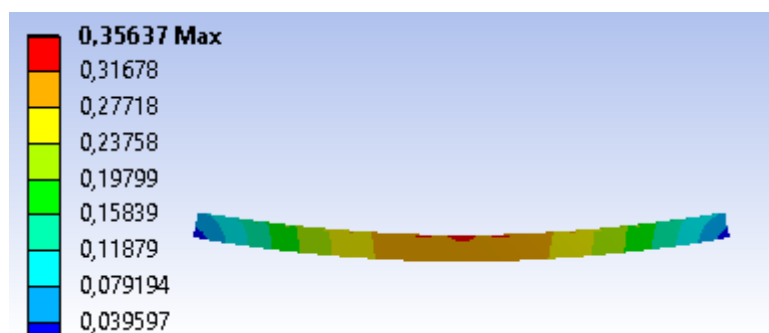
Εικόνες 4-77: Ένταση πετάσματος μήκους 1750mm με πάχος νεύρωσης 7mm



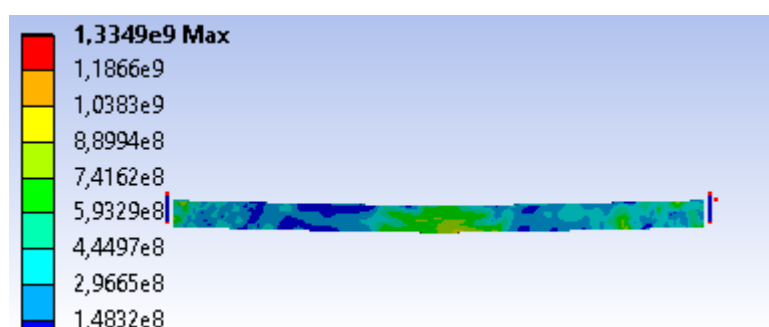
Εικόνες 4-78: Μέγιστο βέλος πετάσματος μήκους 2000mm με πάχος νεύρωσης 2mm



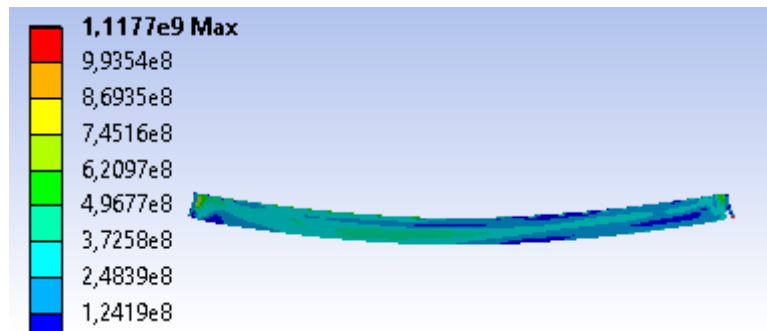
Εικόνες 4-79: Μέγιστο βέλος πετάσματος μήκους 2000mm με πάχος νεύρωσης 7mm



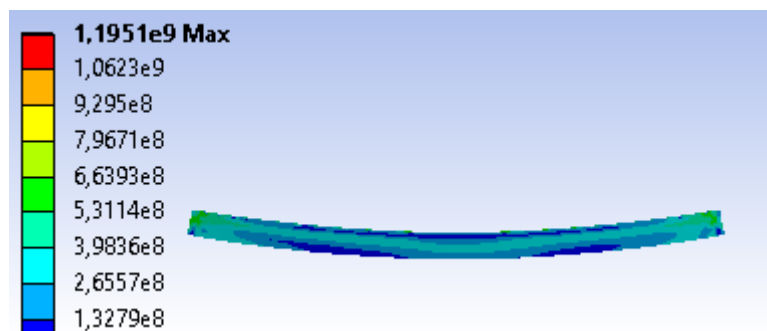
Εικόνες 4-80: Μέγιστο βέλος πετάσματος μήκους 2000mm με πάχος νεύρωσης 8mm



Εικόνες 4-81: Ένταση πετάσματος μήκους 2000mm με πάχος νεύρωσης 2mm



Εικόνες 4-82: Ένταση πετάσματος μήκους 2000mm με πάχος νεύρωσης 7mm



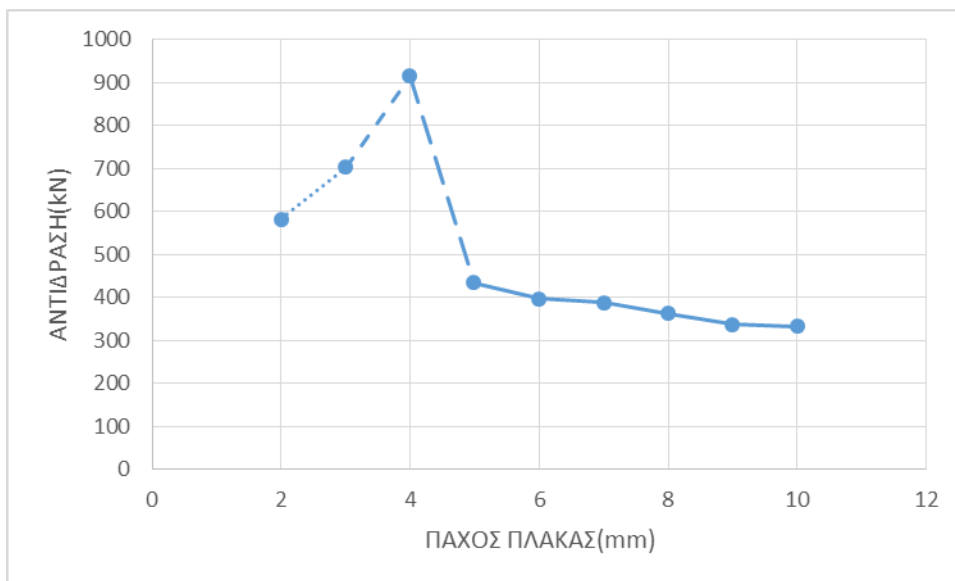
Εικόνες 4-83: Ένταση πετάσματος μήκους 2000mm με πάχος νεύρωσης 8mm

Παρατηρήσεις

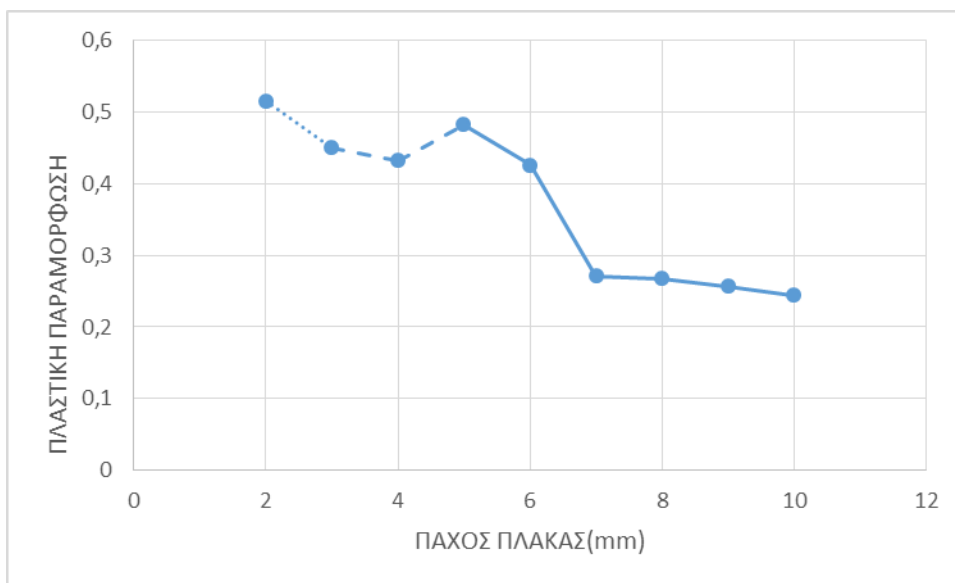
Από τις αναλύσεις και τα διαγράμματα που προκύπτουν, φαίνεται ότι το μήκος δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις αντιδράσεις και τις μέγιστες παραμορφώσεις. Οι τιμές στα διαγράμματα αντίδρασης και μέγιστου βέλους σε σχέση με το πάχος της νεύρωσης, σχεδόν ταυτίζονται για τα διάφορα μήκη του πετάσματος. Αντίθετα, όσον αφορά στη σχέση πλαστικής παραμόρφωσης-πάχους νεύρωσης, το υλικό αξιοποιείται καλύτερα σε μεγάλα μήκη, ενώ επιθυμητή λειτουργία του συστήματος γίνεται σε μικρότερα μήκη πλάκας για το ίδιο πάχος νεύρωσης. Παρατηρούνται τιμές κοντά στο όριο του 0.5 για μεγάλα μήκη ενώ πολύ μικρότερες τιμές για μικρότερα μήκη. Βέβαια πρέπει να τονιστεί ότι για μικρές τιμές του πάχους νεύρωσης, τα πετάσματα με μεγάλο μήκος αστοχούν, ενώ αυτά με μικρότερο λειτουργούν επιθυμητά και κοντά στο όριο της μέγιστης πλαστικής παραμόρφωσης. Επομένως, προτιμώνται μικρά μήκη προκειμένου το πέτασμα να λειτουργεί επιθυμητά και να είναι όσο το δυνατό πιο οικονομικό.

4.2.4 Επιρροή πάχους πλάκας

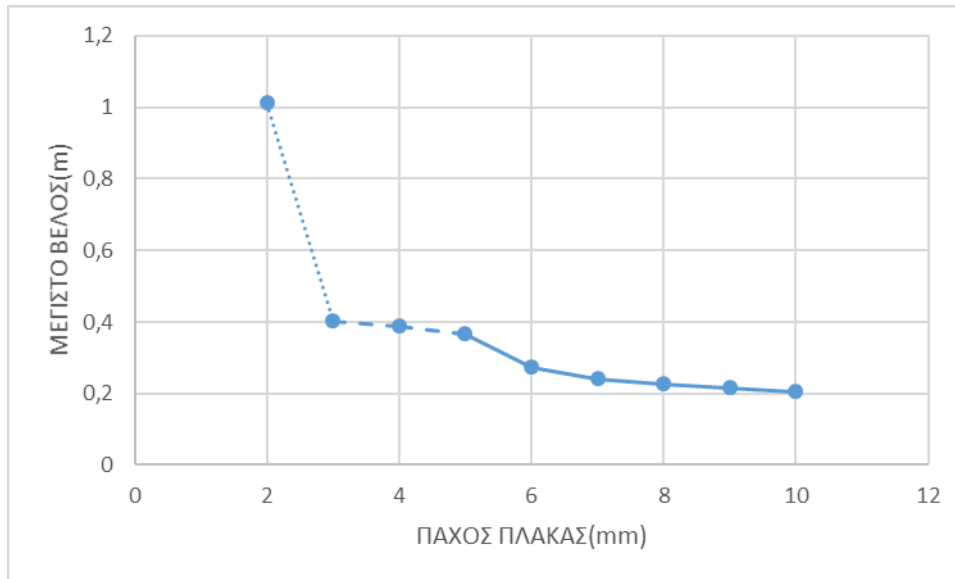
Σε επιλεγμένο παράδειγμα με χάλυβα ποιότητας S355, πλάτος πλάκας 200mm, μήκος πλάκας 1000mm, πάχος νεύρωσης 5mm και με αυξανόμενο πάχος πλάκας, παρουσιάζονται εικόνες τάσης και παραμόρφωσης και διαγράμματα αντίδρασης, πλαστικής παραμόρφωσης και μέγιστου βέλους σε σχέση με το πάχος της νεύρωσης.



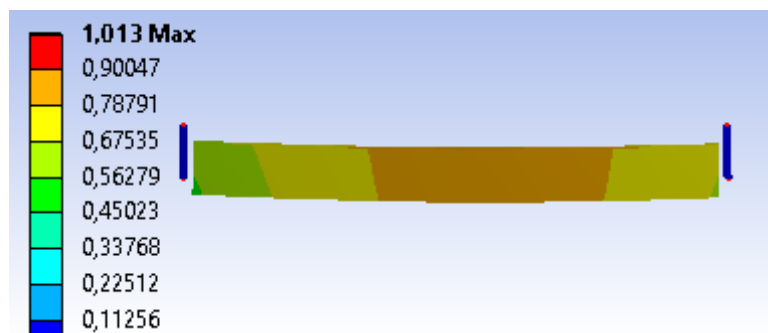
Διάγραμμα 4-15: Αντίδραση-πάχος πλάκας



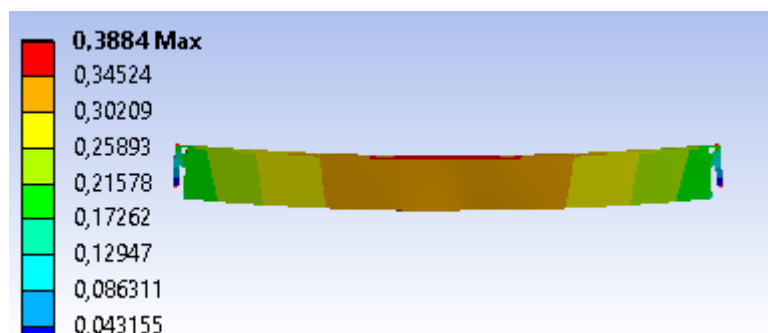
Διάγραμμα 4-16: Πλαστική παραμόρφωση-πάχος πλάκας



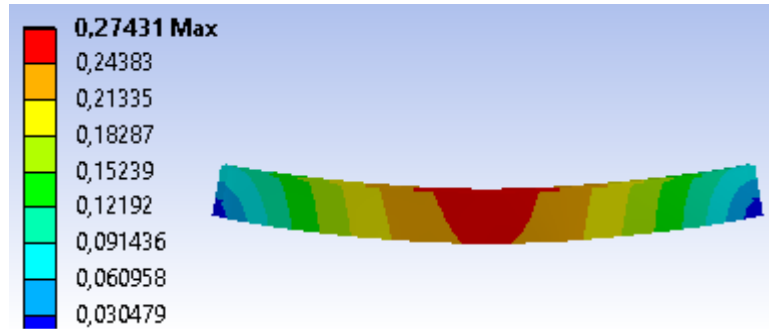
Διάγραμμα 4-17: Μέγιστο βέλος-πάχος πλάκας



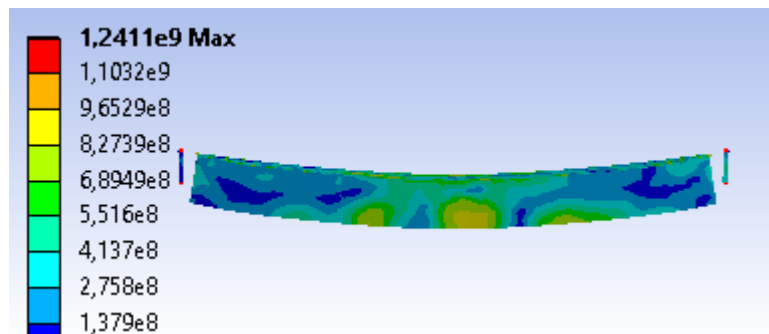
Εικόνες 4-83: Μέγιστο βέλος πετάσματος με πάχος πλάκας 2mm



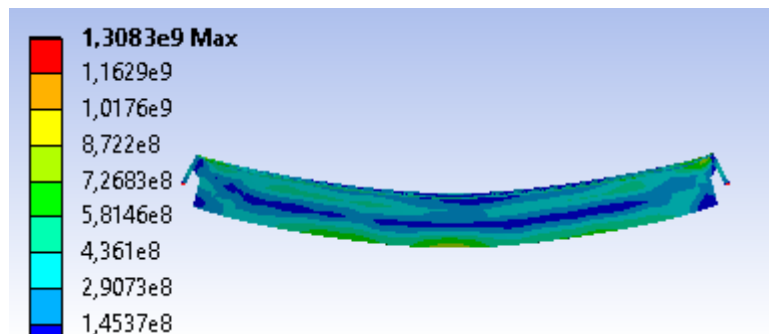
Εικόνες 4-84: Μέγιστο βέλος πετάσματος με πάχος πλάκας 4mm



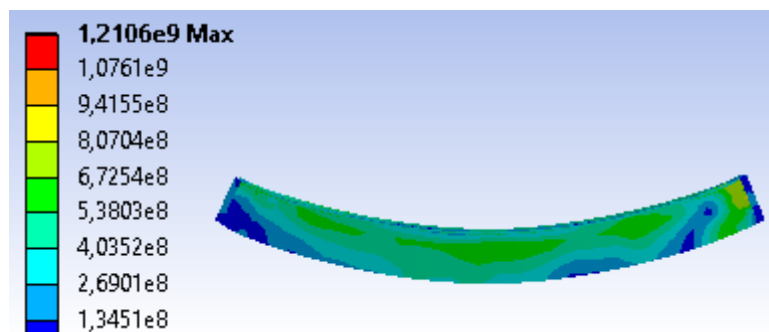
Εικόνες 4-85: Μέγιστο βέλος πετάσματος με πάχος πλάκας 6mm



Εικόνες 4-86: Ένταση πετάσματος με πάχος πλάκας 2mm



Εικόνες 4-87: Ένταση πετάσματος με πάχος πλάκας 4mm



Εικόνες 4-88: Ένταση πετάσματος με πάχος πλάκας 6mm

Παρατηρήσεις

Αυξάνοντας το πάχος της πλάκας παρατηρείται μείωση όλων των μεγεθών: αντίδρασης, πλαστικής παραμόρφωσης και μέγιστου βέλους. Για το συγκεκριμένο πάχος νεύρωσης ιδανικό πάχος πλάκας κρίνεται αυτό των 6mm καθώς το υλικό αξιοποιείται σε ικανοποιητικό βαθμό, και παρατηρείται σχετικά μικρό βέλος και αντίδραση. Για μεγαλύτερα πάχη αν και μειώνονται τα παραπάνω μεγέθη, η ποσοστιαία μεταβολή των μεγεθών είναι πολύ μικρή, το υλικό δεν αξιοποιείται στον επιθυμητό βαθμό και η μάζα του πετάσματος αυξάνεται, γεγονός που το κρίνει λιγότερο οικονομικό. Παράλληλα, να υπογραμμιστεί ότι πετάσματα με μικρά πάχη παρουσιάζουν μεμβρανική συμπεριφορά

4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Προκειμένου να γίνει σύγκριση μεταξύ των δύο τυπικών ειδών επικάλυψης, δημιουργήθηκε ένα μοντέλο της μεταλλικής πλάκας με τις ίδιες συννοριακές συνθήκες. Επιλέχθηκε να παρουσιαστεί σε αυτό το κεφάλαιο παράδειγμα με χαρακτηριστικά:

- 1000mm μήκος πλάκας
- 200mm πλάτος πλάκας και απόστασης μεταξύ των νευρώσεων
- 6mm πάχος πλάκας
- 5mm πάχος νεύρωσης
- Χάλυβας ποιότητας S355

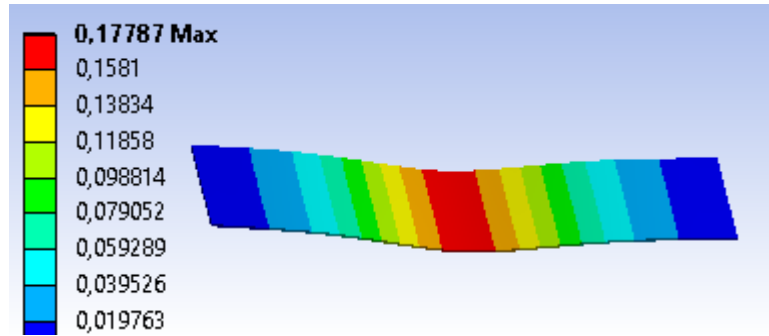
Και στα δύο μοντέλα δεσμεύτηκαν οι μετακινήσεις στην έννοια του μήκους και στροφής και οριζόντιας μετακίνησης λόγω της συνέχειας. Πραγματοποιείται κοινή διακριτοποίηση με επιφανειακά στοιχεία μεγέθους 0,015. Οι πλάκες δέχονται το ίδιο εκρηκτικό φορτίο και εφαρμόζεται ο ίδιος νόμος υλικού Cowper Symonds, για χάλυβα S235. Έχουν το ίδιο πάχος πλάκας και επιλέχθηκε ένα τέτοιο πάχος νεύρωσης ώστε να μην αστοχεί το πέτασμα και να γίνεται εκμετάλλευση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού. Παρακάτω παραθέτονται πίνακες με τα χαρακτηριστικά και τα αποτελέσματα των αναλύσεων, όπως προέκυψαν από το λογισμικό Ansys και χαρακτηριστικά στιγμιότυπα παραμορφώσεων και πλαστικών παραμορφώσεων των δύο τυπικών ειδών επικαλύψεων.

Πίνακας 4-1: Χαρακτηριστικά και αποτελέσματα ανάλυσης μεταλλικής πλάκας

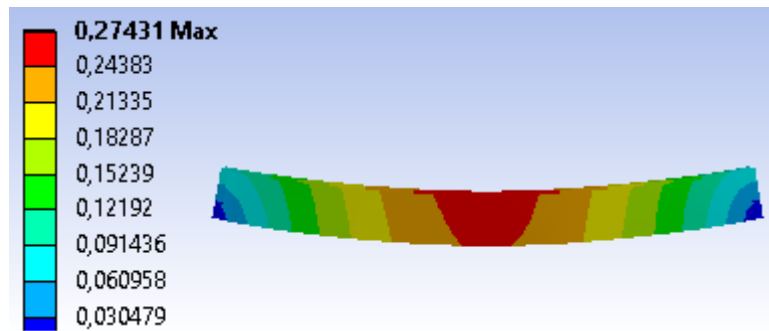
Μήκος	Πλάτος	Πάχος πλάκας	Πάχος νεύρωσης	Αντίδραση	Πλ. Παραμόρφωση	Μέγιστο βέλος
1000	200	6	-	1063,5	0,1	0,178

Πίνακας 4-2: Χαρακτηριστικά και αποτελέσματα ανάλυσης μεταλλικής πλάκας με νεύρωση

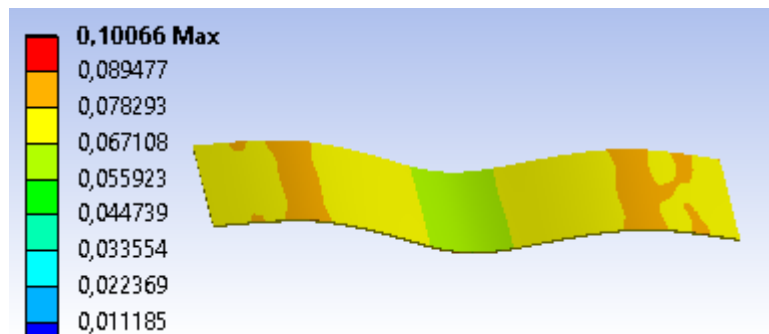
Μήκος	Πλάτος	Πάχος πλάκας	Πάχος νεύρωσης	Αντίδραση	Πλ. Παραμόρφωση	Μέγιστο βέλος
1000	200	6	5	396,14	0,426	0,274



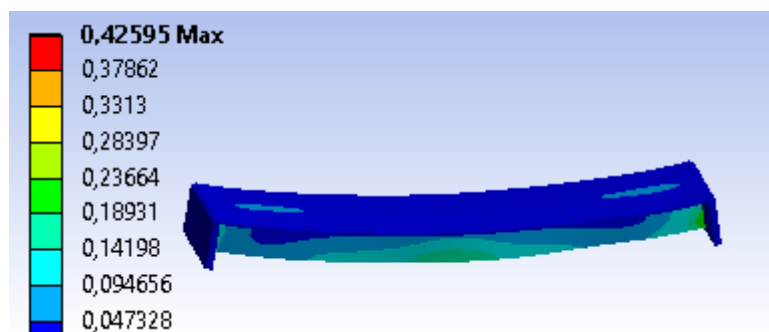
Εικόνα 4-89: Μέγιστη παραμόρφωση ανάλυσης μεταλλικής πλάκας



Εικόνα 4-90: Μέγιστη παραμόρφωση ανάλυσης μεταλλικής πλάκας με νεύρωση



Εικόνα 4-91: Πλαστική παραμόρφωση ανάλυσης μεταλλικής πλάκας



Εικόνα 4-92: Πλαστική παραμόρφωση ανάλυσης μεταλλικής πλάκας με νεύρωση

Παρατηρήσεις

Από αυτή τη σύγκριση των δύο τυπικών ειδών επικαλύψεων, προκύπτουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα καθενός. Αν και η επίπεδη μεταλλική πλάκα έχει μικρότερος βέλος σε σχέση με αυτή με την πρόσθετη νεύρωση, η δεύτερη παρουσιάζει τιμές μικρότερης έντασης και μεγαλύτερης πλαστικής παραμόρφωσης. Το πέτασμα είναι πιο ακριβό στην κατασκευή και την τοποθέτηση από την μεταλλικής πλάκα, λόγω της μεγαλύτερης μάζας αλλά και των συγκολλήσεων που απαιτείται για την κατασκευή του. Το γεγονός όμως ότι ο λόγος των αντιδράσεων των δύο ειδών επικάλυψης είναι μεγαλύτερος του 2,5 και το πέτασμα απορροφά σε μεγαλύτερο βαθμό την ενέργεια της έκρηξης, το καθιστά πιο κατάλληλη επιλογή.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Περίληψη

Λόγω της αυξανόμενης τρομοκρατικής απειλής, οι κατασκευές πλέον υπόκεινται και σε εκρηκτικά φορτία με τη μορφή των βομβιστικών επιθέσεων. Ωστόσο, αν και η συχνότητα τέτοιων επιθέσεων έχει αυξηθεί ραγδαία, δεν υπάρχει πρόβλεψη από κανονισμούς της θωράκιση μιας κατασκευής από εκρηκτικά φορτία, ακόμα και αν κρίνεται απαραίτητη. Σε αυτό το πλαίσιο, στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η φύση του εκρηκτικού φαινομένου. Πρόκειται για ένα περίπλοκο φαινόμενο με χαρακτηριστικά που χρήζουν ιδιαίτερης αντιμετώπισης. Το εκρηκτικό φορτίο ασκείται σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα με τη μορφή υποπιέσεων. Αυτό το γεγονός το καθιστά δυναμικό φαινόμενο που λόγω της φύσης του μεταβάλλει τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών.

Πιο ειδικά, συμπεραίνοντας τη σημασία της επικάλυψης στην κατασκευή καθώς αποτελεί το δομικό στοιχείο μιας κατασκευής που δέχεται το εκρηκτικό φορτίο, κρίθηκε ενδιαφέρουσα η διερεύνηση της απόκρισης της. Δεδομένου όμως ότι η επικάλυψη κατασκευάζεται με πληθώρα υλικών και τρόπων κατασκευής, μελετήθηκαν και συγκρίθηκαν τυπικά είδη επικάλυψης. Μέσω του λογισμικού Ansys, έγινε πλήθος αναλύσεων σε μοντέλα επίπεδης μεταλλικής πλάκας και επίπεδης μεταλλικής πλάκας με νευρώσεις. Υπολογίστηκε το εκρηκτικό φορτίο, οι παράμετροι των ειδικών νόμων υλικού και συμπεριλήφθηκαν μη γραμμικότητες υλικού και γεωμετρίας, έτσι ώστε να προσομοιωθεί ρεαλιστικά το φαινόμενο. Για να γίνει κατανοητή η επιρροή των παραμέτρων του προβλήματος γίνεται παραμετρική ανάλυση κατά την οποία διαφοροποιείται μόνο ένας παράγοντας όπως το μήκος, την απόσταση μεταξύ των νευρώσεων, το πάχος των ελασμάτων, το πάχος των νευρώσεων καθώς και της ποιότητας του χάλυβα, ενώ οι υπόλοιποι παραμένουν σταθεροί.

5.2 Συμπεράσματα

Η ιδιαιτερότητα αυτού του πονήματος έγκειται στο ότι πραγματοποιήθηκε μια ερευνητική διαδικασία σε άγνωστο τόπο, χωρίς κανονισμούς αναλύοντας ένα πολύπλοκο φαινόμενο. Η φύση του εκρηκτικού φαινομένου, η οποία προσομοιώνεται σύμφωνα με εμπειρικούς τύπους, αναγκάζει το μελετητή να προσεγγίσει τη μεθοδολογία σχεδιασμού του υπό ένα άλλο πρίσμα. Πόσο μάλλον όταν δεν υπάρχουν κανονισμοί να τον καθοδηγούν, ο ορισμός των κριτηρίων ενός ασφαλούς σχεδιασμού αποτελεί την πιο ουσιαστική δουλειά του. Πιο ειδικά, η πρόσθετη δυσκολία στην ερμηνεία και επίλυση του φαινομένου είναι ότι εκτός από τις συνήθεις παραμέτρους, ο μελετητής πρέπει να πιθανολογήσει τις δράσεις, οι

οποίες εξαρτώνται από τις συνθήκες μιας τρομοκρατικής ενέργειας ή οποιασδήποτε άλλης έκρηξης. Οφείλει να επιλέξει ένα συνδυασμό της μάζας εκρηκτικής ύλης και της θέσης που θα λάβει χώρα μια τρομοκρατική ενέργεια, προκειμένου να υπολογίσει το εκρηκτικό φορτίο. Ο μεγάλος ρυθμός παραμόρφωσης που επιφέρει το εκρηκτικό φαινόμενο αλλάζει τη συμπεριφορά των υλικών, ενισχύοντας τις μηχανικές τους ιδιότητες. Η αναγκαιότητα να συμπεριληφθεί μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας, αποτελεί επίσης ιδιαιτερότητα των αναλύσεων.

Σε τεχνικό επίπεδο, όπως παρουσιάστηκε, πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές μη γραμμικές αναλύσεις, με σκοπό να διερευνηθεί η απόκριση τυπικών ειδών επικαλύψεων σε φορτίο έκρηξης. Αξιολογήθηκε η επιρροή των παραμέτρων του προβλήματος, στην περίπτωση της πλάκας με νεύρωση, το μήκος της πλάκας, το πάχος της πλάκας, η απόσταση μεταξύ των νευρώσεων, το πάχος της νεύρωσης και η ποιότητα του χάλυβα. Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις, προκύπτουν τα χαρακτηριστικά ενός επιθυμητού συνδυασμού των μεταβλητών. Το πέτασμα πρέπει να χαρακτηρίζεται για μικρές τιμές αντίδρασης, μικρό μέγιστο βέλος και πλαστική παραμόρφωση με τιμή όσο πιο κοντά στο ανώτατο όριο του 0,5.

Με γνώμονα αυτούς τους περιορισμούς και έπειτα από μεγάλο πλήθος αναλύσεων προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα. Αρχικά, κυρίαρχο ρόλο παίζει η επιλογή της ποιότητας του χάλυβα. Πρώτο μέλημα του σχεδιασμού αποτελεί η μέγιστη δυνατή απορρόφηση της ενέργειας προκειμένου να μην εισέλθει το εκρηκτικό κύμα μέσα στο κτίριο. Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται με χάλυβα χαμηλότερης ποιότητας, καθώς για την απορρόφηση της ενέργειας που μεταφράζεται σε πλαστικές παραμορφώσεις πρέπει να γίνει εκμετάλλευση του μεταλαστικού κλάδου. Για ίδιο μέτρο ελαστικότητας οι χάλυβες χαμηλής ποιότητας εισέρχονται πιο γρήγορα στον κλάδο αυτό. Παράλληλα, είναι και μια πιο οικονομική επιλογή, γεγονός που πρέπει να ληφθεί υπόψη.

Όσον αφορά στα γεωμετρικά στοιχεία του προβλήματος, πάλι πρέπει να δημιουργηθεί ένας τέτοιος συνδυασμός ώστε να πληρούνται τα παραπάνω κριτήρια. Στο πρόβλημα που μελετήθηκε σε αυτή την εργασία, υπό συμβαίνει σε μικρά μήκη, όπως 1000mm, για πλάτος πλάκας και απόστασης μεταξύ των διαδοχικών νευρώσεων 200mm και ένα κατάλληλο συνδυασμό πάχους πλάκας και νεύρωσης που να βρίσκονται ακριβώς στην αλλαγή μεταξύ του δεύτερου και του τρίτου σταδίου. Δηλαδή, ο συνδυασμός να είναι ο πρώτος που βρίσκεται στην επιθυμητή λειτουργία του πετάσματος.

5.3 Προτάσεις για περαιτέρω ανάλυση

Το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας έχει να κάνει με ένα τομέα ακόμα ανεξερεύνητο, καθώς πραγματεύεται ένα φαινόμενο πολύπλοκο με πολλές παραμέτρους, αναγκαίο να μελετηθεί με σχετικά λίγες βιβλιογραφικές αναφορές. Έτσι, η μελέτη μιας έκρηξης που λαμβάνει χώρα εξωτερικά μιας κατασκευής, προσφέρεται για περαιτέρω ανάλυση με την έννοια ότι μπορεί να μελετηθεί η επίδραση άλλων παραγόντων. Κρατώντας σταθερή τη γεωμετρία της επικάλυψης και μεταβάλλοντας το εκρηκτικό φορτίο ή τις παραμέτρους που κρίνουν τη διαμόρφωση του εκρηκτικού φορτίου, μάζα εκρηκτικής ύλης και απόσταση έκρηξης από την κατασκευή, μπορεί να μελετηθεί η επίδραση της έντασης του εκρηκτικού φορτίου και πώς αυτό επηρεάζεται από τις παραμέτρους που το διαμορφώνουν. Η μελέτη άλλων τυπικών ειδών επικαλύψεων και η σύγκριση τους θα ήταν ενδιαφέρουσα καθώς οι επικαλύψεις συναντώνται με πληθώρα υλικών και τρόπων κατασκευής.

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] "Blast effects on buildings", Second edition, edited by David Cormie, Geoff Mays and Peter Smith
- [2] Rigby, S.E., Tyas, A., Bennett, T. et al. (2 more authors) (2014) The Negative Phase of the Blast Load. *International Journal of Protective Structures*
- [3] V. Karlos, D. Solomos "Influence of strain rate effects on the analysis of steel sections under blast loads".
- [4] Sohn, Jung Min, & Kim, Sang Jin. (2017). Numerical Investigation of Structural Response of Corrugated Blast Wall Depending on Blast Load Pulse Shapes. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 14(9), 1710-1722. <https://doi.org/10.1590/1679-78254060>
- [5] Edwards, Dafydd & Mcmenemy, Louise & Stapley, S.A. & Patel, H.D.L. & Clasper, Jon. (2015). 40 Years of Terrorist Bombings – A Meta-Analysis of the Casualty and Injury Profile. *Injury*. 47. 10.1016/j.injury.2015.12.021.
- [6] <https://www.un.org/disarmament/un-safeguard/kingery-bulmash/?fbclid=IwAR1VLpbmEqy42PKWiN-6o4XjhypVxcUrWRaMwogBs0LzmPlpzMyVMcJ0EuI>
- [7] http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/METAL_KATASK/me2_6t.htm
- [8] https://since911.com/explore-911/terrorism-timeline?fbclid=IwAR2PbXbwPEtqXqc46ZqCdqWRn8zz0JHGP3oeWdqTZm7RcLTdukIo-1oq9cw#jump_time_item_607
- [9] Ntaliakouras, Ioannis & Pnevmatikos, Nikos. (2018). Ανάλυση κατασκευής οπλισμένου σκυροδέματος που υπόκειται σε εκρηκτικό φορτίο Analysis of reinforced concrete structure subjected to blast load.
- [10] Ostadossein, Hassan, & Lotfi, Saeid. (2018). Performance of infill stiffened steel panel against blast loading. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 15(2), e16. Epub April 26, 2018. <https://doi.org/10.1590/1679-78254429>
- [11] C. Hernandez, A. Maranon, I.A. Ashcroft, J.P. Casas Rodriguez "A computational

determination of the Cowper–Symonds parameters from a single Taylor test”

