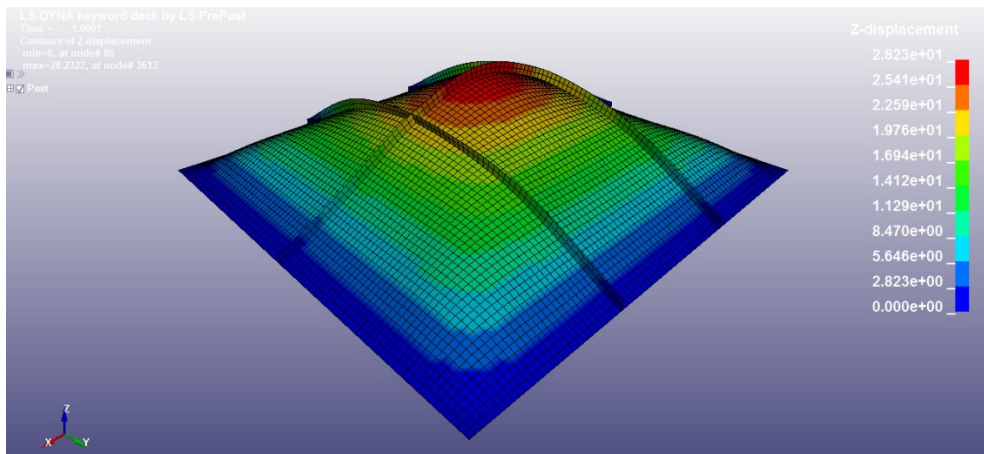




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αριθμητική προσομοίωση σφυρόκρουσης ελασμάτων



Όνοματεπώνυμο: Νικολαΐδης Νικόλαος

Επιβλέπων καθηγητής: Μανωλάκος Δημήτριος

Αθήνα 2019

Ευχαριστίες

Κατά κύριο λόγο θα ήθελα να απευθύνω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Δημήτριο Μανώλακο, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου κατά την ανάθεση και τη διεξαγωγή αυτού του ενδιαφέροντος και συνάμα περίπλοκου εγχειρήματος, για την ενασχόληση που επέδειξε και τη βοήθεια που μου παρείχε και για την άψογη συνεργασία και συνεννόηση που είχαμε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Συνεχίζοντας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Πρωτεσίλαο Κωστάζο, ο οποίος συνέβαλε σημαντικά στην αντιμετώπιση των δυσκολιών και των κωλυμάτων που προέκυψαν κατά το χειρισμό του κώδικα του *LS – DYNA* ενώ παράλληλα ήταν πρόθυμος να μου απαντήσει σε όποια άλλη απορία είχα όσον αφορά την μοντελοποίηση των ελασμάτων.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, η οποία στάθηκε δίπλα μου όλον αυτό το δύσκολο καιρό, δίνοντάς μου συμβουλές και κουράγιο για να συνεχίσω την προσπάθεια μου και να αντιμετωπίσω την κούραση και τις δυσκολίες που παρουσιάζονταν στην πορεία αυτής της χρονιάς.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την κοπέλα μου και τους φίλους μου, οι οποίοι έδειξαν από την πρώτη στιγμή ενδιαφέρον για το θέμα της διπλωματικής μου, αφιερώνοντας μου συχνά πολύτιμο χρόνο σε κάθε είδους συζητήσεις που αφορούσαν την εν λόγω εργασία. Η στήριξή τους ήταν κομβική καθώς μου παρείχε το απαραίτητο κουράγιο και δύναμη κατά τη διάρκεια αυτής της δύσκολης και απαιτητικής χρονιάς.

Πίνακας περιεχομένων

Κεφάλαιο 1	Εισαγωγή	7
1.1	Φορτίσεις πλοίου	7
1.2	Σφυρόκρουση	8
1.3	Σύντομη ιστορική αναδρομή	12
1.4	Αντικείμενο διπλωματικής	17
Κεφάλαιο 2	Μοντελοποίηση της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς του ναυπηγικού χάλυβα	19
2.1	Όλκιμα υλικά	19
2.2	Μοντελοποίηση ναυπηγικού χάλυβα	21
Κεφάλαιο 3	Μοντελοποίηση των ελασμάτων	25
3.1	Μονάδες μέτρησης	25
3.2	Επιλογή των στοιχείων του μοντέλου για επίλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων	26
Κεφάλαιο 4	Μελέτη απόκρισης τετραγωνικών ελασμάτων χωρίς ενίσχυση σε κρουστικό φορτίο	29
4.1	Πειραματικά δεδομένα	29
4.2	Μοντελοποίηση παλμού & επιλογή πλέγματος	31
4.3	Αποτελέσματα	34
4.3.1	Σύγκριση με πειραματικά δεδομένα	40
4.3.2	Επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης	43
4.3.3	Επίδραση διαφορετικού είδους παλμού	45
Κεφάλαιο 5	Μελέτη απόκρισης τετραγωνικών ελασμάτων με ενίσχυση σε κρουστικό φορτίο	51
5.1	Μοντελοποίηση ελασμάτων με ενίσχυση, παλμού και επιλογή πλέγματος	52
5.2	Αποτελέσματα και σύγκριση με πειραματικά δεδομένα	55
Κεφάλαιο 6	Μελέτη απόκρισης τετραγωνικών ελασμάτων χωρίς ενίσχυση για ναυπηγικό χάλυβα υψηλής αντοχής	89
6.1	Μοντελοποίηση της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς του χάλυβα υψηλής αντοχής	90
6.2	Μοντελοποίηση ελασμάτων, παλμού και επιλογή πλέγματος	93
6.3	Αποτελέσματα και σύγκριση με κοινό χάλυβα	93
Κεφάλαιο 7	Τελικά συμπεράσματα	99
	Βιβλιογραφία	101

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί το φαινόμενο της σφυρόκρουσης. Πιο συγκεκριμένα, όπως θα αναφερθεί και παρακάτω, παίρνοντας ως βάση το εν λόγω φαινόμενο θα επιχειρήσουμε μία *Αριθμητική Προσομοίωση Σφυρόκρουσης Ελασμάτων*.

1.1 Φορτίσεις πλοίου

Το πλοίο, κατά την υπηρεσία του, υποβάλλεται σε διάφορες φορτίσεις οι οποίες επηρεάζουν τη μεταλλική του κατασκευή προκαλώντας παραμορφώσεις, καθώς και υψηλές πιέσεις. Οι φορτίσεις αυτές είναι άμεσα συνδεδεμένες με το περίπλοκο θαλάσσιο περιβάλλον. Ο κατασκευαστής οφείλει να γνωρίζει αυτά τα είδη των φορτίσεων όσο το δυνατόν ακριβέστερα: διεύθυνση της φόρτισης, συχνότητα, μοτίβο διανομής πάνω στο πλοίο καθώς και απόκριση κατασκευής συναρτήσει του χρόνου. Παρακάτω γίνεται μία στοιχειώδης διάκριση των ειδών των φορτίσεων.

Οι φορτίσεις διακρίνονται ανάλογα με τη φύση τους – δηλαδή τη διάρκεια και τη μεταβλητότητά τους στο χρόνο – όπως και ανάλογα με την απόκριση της κατασκευής που τις παραλαμβάνει. Εξετάζοντας την απόκριση της κατασκευής, οι εξωτερικές φορτίσεις μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε στατικές (Static loading) που παραμένουν σταθερές στο χρόνο και σε δυναμικές (dynamic loading). Οι στατικές φορτίσεις επιφέρουν αλλαγές που δεν μεταβάλλονται με το χρόνο και δεν αναπτύσσουν αδρανειακές δυνάμεις στα στοιχεία της κατασκευής. *Από την άλλη, οι δυναμικές φορτίσεις προκαλούν τοπικές μορφές απόκρισης, που μεταβάλλονται στο χρόνο, καθώς επίσης και αδρανειακές δυνάμεις που καταπονούν την κατασκευή.* Ένα χαρακτηριστικό λοιπόν της δυναμικής φόρτισης είναι ότι οι παραμορφώσεις των κατασκευαστικών στοιχείων που προκύπτουν μπορεί να είναι μεγάλες και αισθητές.

Παρακάτω αναφέρονται τα σημαντικότερα είδη φορτίσεων:

Στατική Φόρτιση

- Καμπτικές ροπές σε ήρεμο νερό.
- Τέμνουσες δυνάμεις σε ήρεμο νερό.
- Διαμήκης κάμψη σε χαμηλόσυχο (ψευδοστατικό) κύμα.
- Τέμνουσες δυνάμεις σε χαμηλόσυχο (ψευδοστατικό) κύμα.
- Συγκεντρωμένες φορτίσεις σε καταστώματα.
- Υδροστατικές μέσες φορτίσεις.

Δυναμική φόρτιση

- Φορτίσεις προσάραξης.
- Φορτίσεις λόγω δυνάμεων κατά την πλεύση σε υψίσυχο κυματισμό.
- Δράση ανέμου (σε υπερκατασκευές).
- Πλεύση σε πάγο.
- Συγκρούσεις.

- Σφυρόκρουση (Slamming).
- Διαβροχή καταστρώματος (Green water loading).
- (Sloshing).
- Υποθαλάσσιες και ατμοσφαιρικές εκρήξεις.
- Φορτίσεις οφειλόμενες στα μηχανήματα πρόωσης.

Το φαινόμενο που θα μας απασχολήσει στη συνέχεια και θα περιγραφεί εκτενέστερα είναι η **Σφυρόκρουση (Slamming)** του πλοίου.

1.2 Σφυρόκρουση

Η σφυρόκρουση αποτελεί ένα τυχαίο φαινόμενο υδροδυναμικής συμπεριφοράς του πλοίου σε θαλάσσιους κυματισμούς (seakeeping event) που δεν είναι συνεχής συνάρτηση του χρόνου.

Πιο συγκεκριμένα: Η σφυρόκρουση είναι αποτέλεσμα της κρούσης της προωράιας περιοχής του πυθμένα στην επιφάνεια της θάλασσας και προκύπτει εφόσον η σχετική ταχύτητα της πλώρης του σκάφους ως προς την επιφάνεια της θάλασσας υπερβαίνει ένα ελάχιστο όριο.

Θα πρέπει να ισχύουν ταυτόχρονα δύο υπερβάσεις όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.2.1:

1. Ο πυθμένας του πλοίου να βρίσκεται έξω από το νερό (και ακολούθως να βυθίζεται «βίαια»)
2. Η θετική σχετική ταχύτητα του πυθμένα ως προς το νερό να υπερβαίνει ένα όριο που ονομάζεται σχετική ταχύτητα σφυρόκρουσης U_{th} (Threshold Velocity).

Η σχετική ταχύτητα σφυρόκρουσης δίνεται από τους Ochi & Motter (1974) συναρτήσει του μήκους του πλοίου από τις σχέσεις:

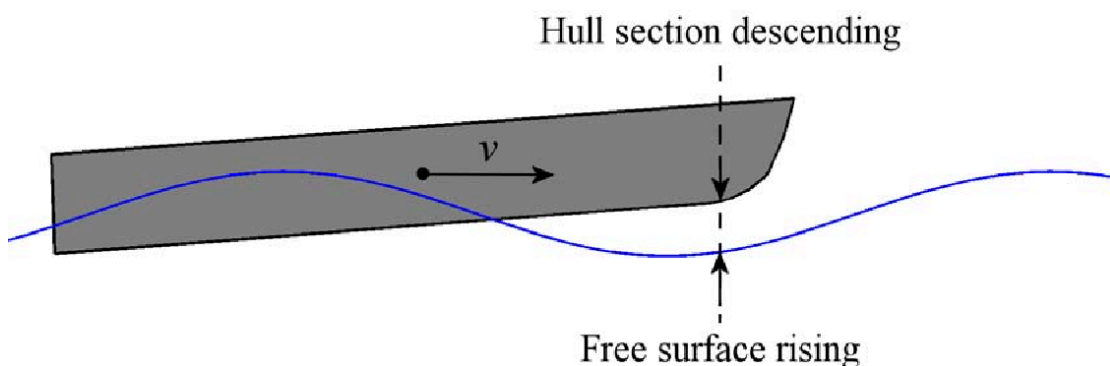
$$U_{th} = 0.093\sqrt{gL} \quad \text{ή} \quad U_{th} = 3.66 * \frac{L_{bp}}{158.5} \text{ σε } m/s$$

Όπου:

g : είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας

L : το μήκος του πλοίου

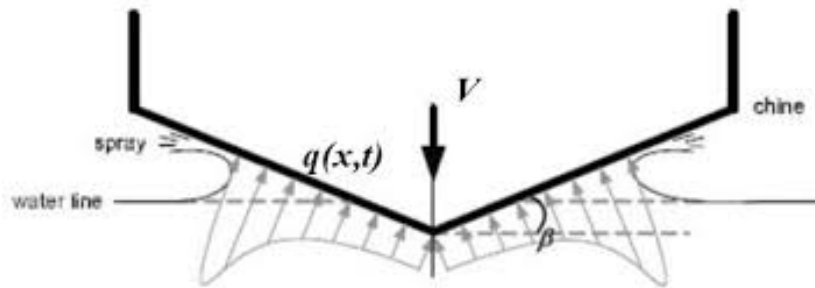
L_{bp} : το μήκος μεταξύ των καθέτων του πλοίου



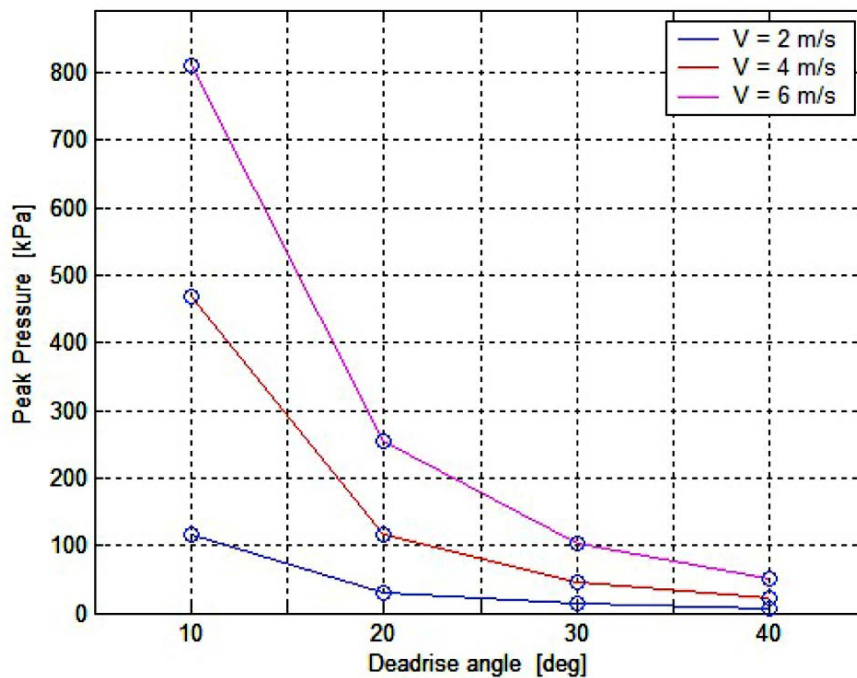
Εικόνα 1.2.1: Ανάδυση πυθμένα και σχετική ταχύτητα

- Γωνία ανύψωσης πυθμένα

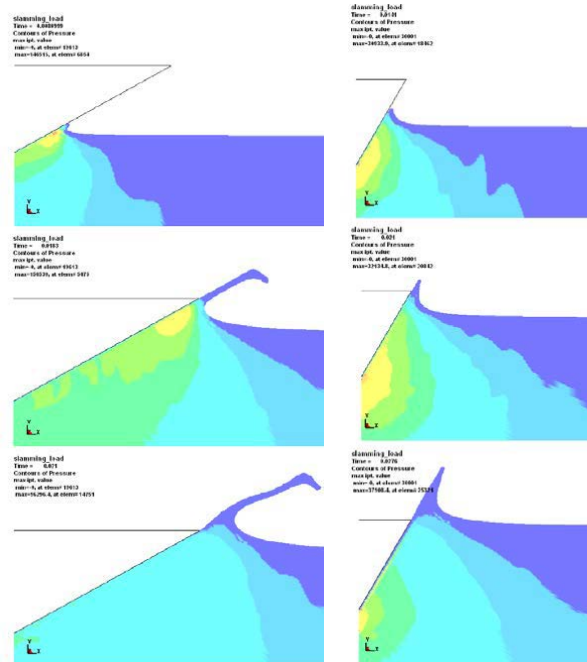
Το φαινόμενο επηρεάζεται έντονα και από τη γωνία ανύψωσης του πυθμένα σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο τη λεγόμενη *Deadrise Angle*. Γενικά όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η γωνία, τόσο μικρότερη είναι η δύναμη σφυρόκρουσης (Εικόνα 1.2.3 και Εικόνα 1.2.4). Δηλαδή, αν υποθέσουμε ότι ο πυθμένας του πλοίου είναι σε σχήμα V (Εικόνα 1.2.2), όσο πιο απότομη/«αιχμηρή» είναι η μορφή αυτή τόσο μικρότερη αντίσταση συναντάει το πλοίο κατά τη διάρκεια του φαινομένου.



Εικόνα 1.2.2: Διανομή πίεσης

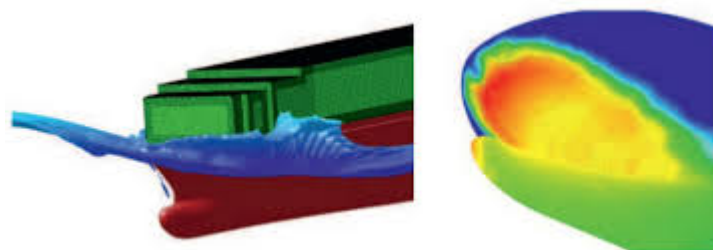


Εικόνα 1.2.3: Επίδραση γωνίας ανύψωσης πυθμένα



Εικόνα 1.2.4: Διανομή πίεσης με γωνίες ανώψωσης πυθμένα στις 30° αριστερά και στις 60° δεξιά (μέγιστη πίεση 1.58×10^5 στα αριστερά και 3.24×10^4 στα δεξιά) [11]

Το φαινόμενο της σφυρόκρουσης χαρακτηρίζεται από υψηλές δυνάμεις για πολύ μικρά χρονικά διαστήματα. Τα φορτία που αναπτύσσονται πάνω στα ελάσματα του πυθμένα (Εικόνα 1.2.5) είναι της τάξης μερικών MPa και είναι πολύ μεγαλύτερα από αυτά που προκύπτουν από τους συνηθισμένους κυματισμούς. Ένα «χτύπημα» δημιουργεί μεγάλες καμπτικές τάσεις στις δοκούς του κύτους, παραμορφώσεις στις πλάκες και στα χωρίσματα/διάτοχα του πυθμένα, ζημιά στο φορτίο και απώλεια ή βλάβη στον εξοπλισμό του πλοίου.



Εικόνα 1.2.5: Διανομή πίεσης στον πυθμένα

- **Ατυχήματα**

Στο παρελθόν πολλά πλοία υπέστησαν τοπικές ζημιές που οφείλονται στα φορτία σφυρόκρουσης, ενώ άλλα αποδείχτηκαν μοιραία. Παράδειγμα αποτελεί η τραγωδία του MV Estonia [1] στη Βαλτική θάλασσα στις 28 Σεπτεμβρίου 1994, μία από τις πιο θανατηφόρες θαλάσσιες καταστροφές του 20^{ου} αιώνα, όπου καταστράφηκε η υδατοστεγής μπροστινή πόρτα (Εικόνα 1.2.6) με αποτέλεσμα τη βύθιση του πλοίου σε μικρό χρονικό διάστημα και την απώλεια μεγάλου αριθμού επιβατών και προσωπικού.



Εικόνα 1.2.6: Ατύχημα του MV Estonia

Ένα ακόμα ατύχημα, το οποίο δεν απεδείχθει μοιραίο, ήταν αυτό του πλοίου MSC Napoli [2] στις 18 Ιανουαρίου 2007 στο κανάλι της Αγγλίας (Μάγχη), όπου το πλοίο συνάντησε άσχημα καιρικά φαινόμενα με άγρια θάλασσα με αποτέλεσμα να αστοχήσει η γάστρα του κοντά στο σημείο που εδραζόταν η κύρια μηχανή του και την επακόλουθη βύθισή του χωρίς ανθρώπινες απώλειες (Εικόνα 1.2.7).



Εικόνα 1.2.7: Ατύχημα του MSC Napoli

Έντονος είναι ο κίνδυνος και σε πλοία μεγάλου μήκους στα οποία πολλές φορές ο κρότος λόγω της σφυρόκρουσης δεν γίνεται αντιληπτός στη γέφυρα και δεν λαμβάνονται μέτρα αποφυγής του φαινομένου. Σε μια τέτοια περίπτωση, η σφυρόκρουση γίνεται αντιληπτή λόγω της μεγάλης απώλειας ταχύτητας ή εξαιτίας των υψηλών τάσεων στη γάστρα, εφόσον είναι εγκατεστημένο το αντίστοιχο μετρητικό όργανο. Ένας τρόπος αποφυγής/αντιμετώπισης του φαινομένου είναι η μείωση ταχύτητας πορείας ή/και η αλλαγή κατεύθυνσης του πλοίου.

Από τις θεωρητικές και πειραματικές μελέτες καθώς και από στατιστικά δεδομένα από πλοία σε υπηρεσία, έχουν εξαχθεί ορισμένα βασικά συμπεράσματα για τους παράγοντες που ευνοούν το φαινόμενο και τα οποία εν συντομία είναι τα εξής:

- Οι ζημιές είναι πιο συχνό φαινόμενο σε πλοία με μικρό λόγο μήκους/πλάτους και συμβαίνουν συχνότερα σε καταστάσεις μικρού βυθίσματος.
- Το μήκος του πλοίου σε σχέση με το μήκος των κυμάτων και η μορφή των νομέων επιδρούν σημαντικά.
- Πλοία που έχουν την τάση να δείχνουν μεγάλο εύρος προνευτασμού στα κύματα είναι επιρρεπή στη σφυρόκρουση.
- Η περιοχή της κατασκευής όπου γίνονται γενικά ζημιές είναι κοντά στο τέλος του πρωραίου τμήματος (περίπου $0,1L$ πίσω από την πρωραία κάθετο) για πλοία με «γεμάτη μορφή» (δηλαδή υψηλό συντελεστή γάστρας C_B και πρισματικό συντελεστή γάστρας C_P), ενώ η περιοχή αυτή μετατοπίζεται πρυμναία και παρουσιάζει μικρότερη ζημιά καθώς αυξάνεται η «λεπτότητα» της γάστρας (με τη μείωση δηλαδή του C_B και C_P).
- Οι ζημιές παρουσιάζονται συνήθως σε καταστάσεις μικρού βυθίσματος (περίπου σε αυτό που αντιστοιχεί στο $1/3$ της πλήρους φόρτωσης) ενώ πάνω από ένα οριακό βύθισμα η σφυρόκρουση δεν υφίσταται.

Τα παραπάνω ισχύουν κυρίως σε μονόαστρα σκάφη.

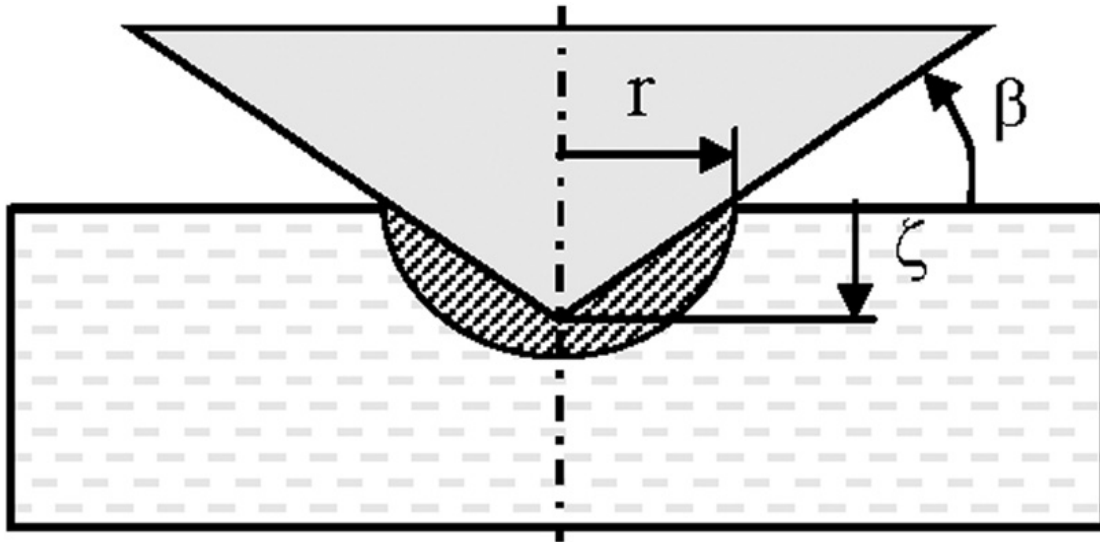
Οι φορτίσεις λόγω σφυρόκρουσης έχουν έντονα δυναμικά χαρακτηριστικά, καθώς έχουν πολύ μικρή διάρκεια, συνήθως 10-20 msec με την κορύφωση να συμβαίνει συντομότερα και ταχύτατα, μπορούμε να πούμε ακαριαία. Πιο συγκεκριμένα το φορτίο λόγω σφυρόκρουσης περιγράφεται από τα εξής χαρακτηριστικά:

- Χρόνος μέχρι την κορυφή (t_0).
- Μέγιστη τιμή του φορτίου (P_0).
- Η διάρκεια και η μορφή (γενικά λογαριθμική) της μείωσης της τάσης μετά την κορυφή.
- Η συνολική διάρκεια της φόρτισης (t_{tot}).

1.3 Σύντομη ιστορική αναδρομή

Η μελέτη της σφυρόκρουσης αποτελεί ένα θέμα που απασχολεί την ανθρωπότητα για δεκαετίες και έχει προσεγγισθεί με διάφορες μεθόδους: αναλυτικές, πειραματικές και αριθμητικές.

Πρωτοπόρος στη μελέτη της σύγκρουσης ενός σώματος με το νερό ήταν ο von Kármán (1929) [3], που ανέπτυξε μια ασυμπτωτική θεωρία για το εξιδανικευμένο πρόβλημα μιας δισδιάστατης «σφήνας» η οποία προσκρούει σε μια ήρεμη επιφάνεια νερού (Εικόνα 1.3.1), με σκοπό να μελετήσει την πίεση που αναπτύσσεται στους πλωτήρες των υδροπλάνων κατά τη διάρκεια της προσθαλάσσωσής τους. Ωστόσο, αυτή η εξιδανικευμένη θεωρία που βασίζεται στη διατήρηση της ορμής, υποτιμά το φορτίο πρόσκρουσης για «σφήνες» με μικρή γωνία ανύψωσης πυθμένα (deadrise angle), το οποίο τήνει να απειρίζεται καθώς η γωνία πλησιάζει τις 0° .



Εικόνα 1.3.1: Θεωρία διατήρησης της ορμής του von Kármán. Βάθος διείσδυσης ζ , γωνία ανύψωσης β και βρεχόμενη επιφάνεια r .

Θεωρώντας μία αρχική ταχύτητα της σφήνας, κατά την επαφή με την επιφάνεια του νερού, ίση με V_0 και αμελώντας παράλληλα τις δυνάμεις πλευστότητας και βαρύτητας, κατέληξε σε μία σχέση διατήρησης της ορμής όπως η παρακάτω:

$$MV_0 = (M + m)\dot{\zeta}$$

Άρα

$$\dot{\zeta} = \frac{MV_0}{M + m}$$

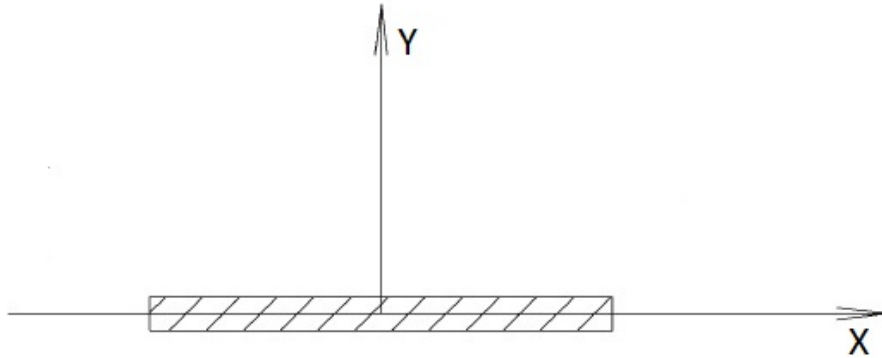
Όπου M η συνολική μάζα της «σφήνας», m η προστιθέμενη μάζα κατά τη διάρκεια του φαινομένου.

Η παραπάνω εξίσωση εκφράζει τη διατήρηση γραμμικής ορμής σε όλη τη διαδικασία εισόδου του νερού και αναφέρεται από πολλούς ερευνητές

Με βάση το έργο του, ο Wagner (1932) [4] ανέπτυξε μία λεπτομερέστερη θεωρία στην ανάλυση της οριζόντιας επιφάνειας του νερού και της επίδρασης της κρούσης του σώματος πάνω στην επιφάνεια αυτή. Η θεωρία του Wagner εισήγαγε την έννοια της "ρίζα ψεκασμού" και του "παράγοντα διαβροχής". Ο Wagner σημείωσε ότι οι υψηλές τιμές πίεσης εμφανίζονται κοντά στη ρίζα ψεκασμού. Θεώρησε ότι το ρευστό:

- Δεν είχε ιξώδες και ήταν ασυμπίεστο
- Η επιτάχυνση του ρευστού είναι πολύ μεγαλύτερη της επιτάχυνσης της βαρύτητας, οπότε η τελευταία αμελείται
- Το βύθισμα της σφήνας είναι κατά πολύ μικρότερο από τη βρεχόμενη επιφάνεια αυτής.

Βάσει του τελευταίου η θεωρία του Wagner έγινε γνωστή και ως «θεωρία επεκτεινόμενης πλάκας» (Εικόνα 1.3.2).



Εικόνα 1.3.2: Απλοποιημένη μορφή της θεωρίας του Wagner κατά την είσοδο της σφήνας στο νερό

Η λύση του χωρίστηκε σε διαφορετικές ζώνες, στον εξωτερικό τομέα - στην κύρια περιοχή, όπου η επιφάνεια του νερού αλληλεπιδρά με την επιφάνεια της σφήνας, στη ρίζα εκτόξευσης, την περιοχή δηλαδή μεταξύ της επιφάνειας και της ρίζας ψεκασμού και στην εκτόξευση, την περιοχή του πίδακα της ροής. Για τη θεωρία του, η πίεση είναι μοναδική στην άκρη της επεκτεινόμενης πλάκας όταν η γωνία ανύψωσης πυθμένα είναι μικρή.

Η δουλειά και η διατριβή των προηγούμενων δύο αποτέλεσε έναυσμα για τη διεξαγωγή δεκάδων ερευνών πάνω στο φαινόμενο της σφυρόκρουσης, με σκοπό την κατανόηση του σε πρώτο στάδιο και έπειτα την προσπάθεια εύρεσης κάποιας λύσης για την αντιμετώπισή του.

Πιο επιγραμματικά αναφέρονται παρακάτω κάποιες από τις σημαντικότερες διατριβές πάνω στο εν λόγω φαινόμενο.

- **Αναλυτικές μέθοδοι**

Γενικά, οι αναλυτικές μέθοδοι παρέχουν την ακριβή λύση για ένα απλοποιημένο πρόβλημα πρόσκρουσης. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιούνται ως εργαλεία αναφοράς για προσεγγιστικές μεθόδους καθώς και για μεθόδους υπολογιστικής δυναμικής ρευστού (CFD).

Ο Dobronol'skaya [5] το 1969 παρουσίασε μία βελτιωμένη εκδοχή της λύσης του Wagner γνωστή και ως λύση ομοιότητας (similarity solution). Πιο συγκεκριμένα μεταβίβασε το πρόβλημα δυναμικής ροής για τη σταθερή είσοδο στο νερό μιας σφήνας, σε ένα πρόβλημα ίδιας ροής σε σύνθετο επίπεδο, το οποίο εκμεταλλεύτηκε την απλότητα της γεωμετρίας του σώματος και ταυτόχρονα ισχύει για κάθε γωνία ανύψωσης πυθμένα.

Οι Armand και Cointe (1987) [6] εισήγαγαν την επίδραση της μη γραμμικής τζετ ροής στην περιοχή τομής μεταξύ του σώματος και της ελεύθερης επιφάνειας χρησιμοποιώντας ασυμπτωτική αντιστοίχιση.

- **Αριθμητικές μέθοδοι**

Οι μέθοδοι οριακών στοιχείων (BEM) έχουν αναπτυχθεί για δισδιάστατες αρχικά από την Greenhow & Linn (1985) [7], και αργότερα στη Νορβηγία στο νορβηγικό Πανεπιστήμιο Επιστήμης και Τεχνολογίας από τους Zhao & Faltinsen [8],[9].

Οι Zhao & Faltinsen (1993) γενίκευσαν το έργο του Wagner (1932) και παρουσίασαν μια αριθμητική μέθοδο για τη μελέτη εισόδου στο νερό ενός διδιάστατου σώματος, αυθαίρετης διατομής, η οποία είναι μία μη γραμμική μέθοδος στοιχείων με προσέγγιση ροής τζετ. Σαν συνέχεια της προηγούμενης δουλειάς τους, οι Zhao & Faltinsen (1996) ανέπτυξαν μία πλήρως μη γραμμική αριθμητική μέθοδο προσομοίωσης, η οποία περιλαμβάνει τον διαχωρισμό ροής από τις αρθρώσεις του σώματος και μια προσεγγιστική λύση η οποία δεν περιλαμβάνει τη διαίρεση ροής, για την πρόβλεψη των βαρών φορτίων σε δισδιάστατα τμήματα.

Γενικά οι μέθοδοι οριακών στοιχείων, έχουν το πλεονέκτημα μιας καλής λύσης –μέσα στις όποιες υποθέσεις έγιναν φυσικά- με ένα λογικό υπολογιστικό κόστος. Υπάρχει ωστόσο ένα θεμελιώδες αριθμητικό πρόβλημα τη στιγμή της αρχικής επαφής (μεταξύ σώματος και υγρού) λόγω της ασυνέχειας του δυναμικού της ταχύτητας, το οποίο προκαλεί «άπειρη» πίεση. Για την αντιμετώπισή του χρειάζεται να ληφθούν υπόψιν η συμπίεστικότητα του ρευστού.

Η δυσκολία είναι ακόμα μεγαλύτερη όταν πρόκειται για τρισδιάστατα προβλήματα σφυρόκρουσης. Για τον λόγο αυτό, προτιμούνται προσεγγιστικές μέθοδοι όπως αυτή που αναφέρθηκε νωρίτερα από τους Zhao & Faltinsen [9], μία μέθοδος η οποία αποτέλεσε τη βάση για την έρευνα των Kvålsvold et al. (1996) [10] πάνω στο ατύχημα του πλοίου *Estonia*.

Σημαντική είναι και η συμβολή του Shan Wang (2011) [11], ο οποίος χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων μέσω του υπολογιστικού πακέτου *LS – DYNA*, μελέτησε τα φορτία σφυρόκρουσης που αναπτύσσονταν σε διδιάστατες απαραμόρφωτες δομές. Πιο συγκεκριμένα μελέτησε τα φορτία που αναπτύσσονταν στο ρευστό, για ποικίλες γωνίες ανύψωσης πυθμένα (deadrise angle) των δομών, για διάφορες γωνίες πρόσκρουσης (roll angle) μεταξύ κατασκευής – ρευστού για διαφορετικές ταχύτητες πρόσκρουσης.

- **Στατιστικές Μέθοδοι**

Στην βιβλιογραφία υπάρχουν πιθανοθεωρητικές μελέτες που παρουσιάζουν την πιθανότητα ένα πλοίο να υποστεί σφυρόκρουση σε μια χρονική περίοδο σε σχέση και με τις διάφορες παραμέτρους (βασικά μεγέθη πλοίου, κατάσταση θάλασσας, ταχύτητα πλοίου κοκ).

Η στατιστική μέθοδος του Ochi [12][13] που προβλέπει την πιθανότητα της σφυρόκρουσης του πυθμένα ενός πλοίου, αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους. Η πιθανότητα της ανάδυσης της πλώρης του πλοίου και η υπέρβαση μία ταχύτητας επανεισόδου στο νερό (Threshold velocity), συνδυάστηκαν για για τον υπολογισμό της πιθανότητας της σφυρόκρουσης. Ο Ochi διαπίστωσε αρχικά μια αμελητέα διαφορά στην ταχύτητα επανεισόδου για πλοία σχήματος U και V, μέσω της ανάλυσης πειραματικών μοντέλων σε

κανονικούς κυματισμούς και σε ακανόνιστες θάλασσες. Αργότερα, οι Ochi & Motter [14][15] επεξεργάστηκαν την παραπάνω μέθοδο με την εισαγωγή συντελεστών σφυρόκρουσης που εξαρτώνται από το σχήμα κάτω από το 10% (του βυθίσματος) του εξεταζόμενου τμήματος.

- **Πειραματικές Μέθοδοι**

Γενικά τα πειράματα σφυρόκρουσης είναι πολύ δύσκολα στην υλοποίησή τους. Ένα από τα πιο λεπτομερή πειράματα ήταν αυτό των Lewis et al (2010) [16]. Η διάρκεια της πρόσκρουσης είναι συνήθως σύντομη, ειδικά εάν οι τοπικές ποσότητες, όπως η πίεση, παρουσιάζουν ενδιαφέρον. Αυτό σημαίνει ότι απαιτούνται υψηλοί χρόνοι δειγματοληψίας όπως 5-10 kHz. Εκτός από τις απαιτήσεις για το σύστημα μέτρησης και το σύστημα απόκτησης δεδομένων, υπάρχει το πρόβλημα του ίδιου του αισθητήρα. Στην εποχή μας, υπάρχουν πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες πίεσης με πολύ υψηλές φυσικές συχνότητες. Πρέπει να τονισθεί ότι η αναφερόμενη υψηλή συχνότητα είναι η συχνότητα στον αέρα. Η φυσική συχνότητα μέσα νερό είναι πολύ χαμηλότερη.

Τα περισσότερα πειράματα που έχουν καταγραφεί έχουν γίνει υπό κλίμακα, καθώς η διεξαγωγή ενός πειράματος σε φυσική κλίμακα καθίσταται πολύ δύσκολη. Αρχικά πρέπει να πλοίο να εξοπλισθεί με μετρητικές διατάξεις (επιμηκυσσιόμετρα, επιταχυνσιόμετρα κλπ) γεγονός που είναι πολύ δαπανηρό και αν ξεπεραστεί αυτό το εμπόδιο, θα χρειαστούν χρόνια για να αποδώσει το συγκεκριμένο πείραμα σωστά αποτελέσματα, καθώς όπως προαναφέρθηκε το φαινόμενο της σφυρόκρουσης στη φύση εξαρτάται από τους περιβαλλοντικούς παράγοντες οι οποίοι με τη σειρά τους είναι δύσκολο να καθοριστούν. Ένα τελευταίο εμπόδιο αλλά εξίσου σημαντικό είναι ο ανθρώπινος παράγοντας. Ακόμα και αν ξεπεραστούν τα όποια οικονομικά προβλήματα εξοπλισμού του πλοίου με τα κατάλληλα μετρητικά όργανα, ακόμα και αν προβλεφθούν με ακρίβεια οι απαραίτητες καιρικές συνθήκες, ο ανθρώπινος παράγοντας θα είναι πάντα ανασταλτικός, καθώς ένας καπετάνιος όταν συναντήσει δυσμενείς καιρικές συνθήκες, για την ασφάλεια του πληρώματος, του πλοίου και της δικής του τήνει να αποφύγει τις ισχυρές αναταράξεις, άρα κατ'επέκταση να αποφύγει ισχυρά φαινόμενα σφυρόκρουσης. Για αυτό είναι σχεδόν αδύνατη η διεξαγωγή πειραμάτων σε φυσική κλίμακα.

1.4 Αντικείμενο διπλωματικής

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, η εν λόγω διπλωματική εργασία έχει ως βάση της το φαινόμενο της σφυρόκρουσης των πλοίων. Σαν φαινόμενο η σφυρόκρουση αποτελεί ένα πρόβλημα αλληλεπίδρασης κατασκευής – ρευστού, η λύση του οποίου γενικά είναι ιδιαίτερα δύσκολη, λόγω των περίπλοκων εξισώσεων που το διέπουν, πόσο μάλλον στα πλαίσια μίας διπλωματικής εργασίας.

Πριν συνεχίσουμε πρέπει να αναφερθεί ότι μέχρι και την παρούσα χρονική στιγμή, δεν έχει γίνει δυνατόν να αναπτυχθεί μια πλήρως ικανοποιητική θεωρητική προσέγγιση εξαιτίας της πολυπλοκότητας του προβλήματος:

- i. Η σφυρόκρουση είναι ένα έντονα μη-γραμμικό φαινόμενο το οποίο είναι πολύ ευαίσθητο στη σχετική κίνηση και τη γωνία επαφής μεταξύ του σώματος και της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας.
- ii. Οι προβλέψεις σε φυσική κατάσταση θάλασσας είναι αναγκαστικά στοχαστικές (μη-ντετερμινιστικές) αφού η σφυρόκρουση είναι στην πραγματικότητα μια τυχαία διαδικασία.
- iii. Εφόσον η διάρκεια της φόρτισης είναι πολύ σύντομη, οι υδροελαστικές επιδράσεις είναι έντονες.
- iv. Η «παγίδευση» του αέρα κατά τη σφυρόκρουση οδηγεί πολλές φορές σε κύματα με πολύ υψηλή ταχύτητα εκεί όπου η ροή του νερού αλληλεπιδρά με τη ροή του αέρα.

Επίσης σωστό θα ήταν να αναφερθεί ότι παραλείπεται τελείως το κομμάτι της υδροδυναμικής, καθώς δεν έγκειται στα πλαίσια του τομέα Κατεργασιών στο οποίο εκπονείται η συγκεκριμένη εργασία. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πιθανοθεωρητικές μελέτες που παρουσιάζουν την πιθανότητα ένα πλοίο να υποστεί σφυρόκρουση σε μια χρονική περίοδο σε σχέση και με τις διάφορες παραμέτρους (βασικά μεγέθη πλοίου, κατάσταση θάλασσας, ταχύτητα πλοίου κκ).

Στην παρούσα εργασία ωστόσο το παραπάνω ζήτημα δε θα αποτελέσει αντικείμενο μελέτης. Το ζήτημα που θα μας απασχολήσει είναι οι συνέπειες της αναπτυσσόμενης πίεσης που καταπονούν το πλοίο λόγω της σφυρόκρουσης. Μας ενδιαφέρει δηλαδή το αποτέλεσμα του φαινομένου αυτού πάνω στη γάστρα του πλοίου και ειδικότερα στον πυθμένα του.

Πιο συγκεκριμένα, ασχολείται με δυναμικά φορτία των οποίων ο χρόνος φόρτισης είναι πολύ μικρός με αποτέλεσμα η φόρτιση να θεωρείται κρουστική. Στόχος μας είναι να εξετάσουμε την απόκριση των ελασμάτων της κατασκευής του πλοίου.

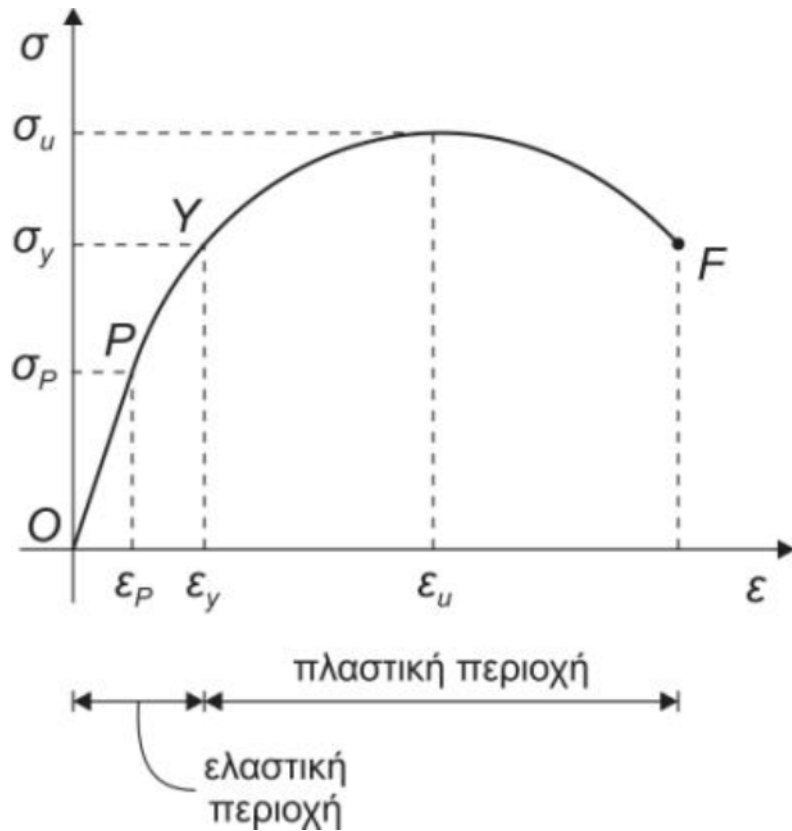
Η ανάλυση του προβλήματος γίνεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Για τους υπολογισμούς στον Ηλεκτρονικό Υπολογιστή χρησιμοποιείται το υπολογιστικό πακέτο πεπερασμένων στοιχείων *LS – DYNA* της *LSTC*. Πρόκειται για ένα ευρέως διαδομένο, για τέτοιου είδους προβλήματα, πακέτο, το οποίο επιλέχθηκε με κριτήριο τις δυνατότητες που έχει όσον αφορά την επίλυση δυναμικών προβλημάτων.

Για την επαλήθευση ή την κατάρριψη του κώδικα στο *LS – DYNA*, θα καταφύγουμε στην πορεία σε πειραματικά δεδομένα.

Κεφάλαιο 2 Μοντελοποίηση της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς του ναυπηγικού χάλυβα

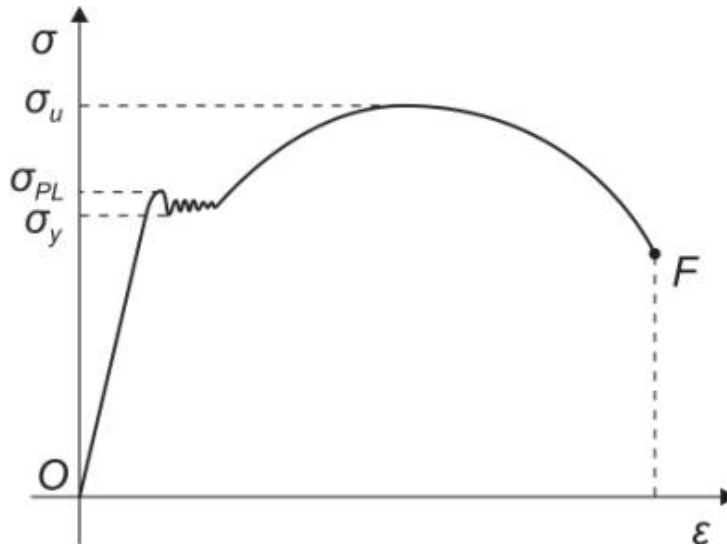
2.1 Όλκιμα υλικά

Ο ναυπηγικός χάλυβας συγκαταλέγεται στα όλκιμα υλικά. Δηλαδή σε περίπτωση φόρτισής του, έχει την ιδιότητα να παραμορφώνεται πλαστικά πριν από τη θραύση του. Για τους περισσότερους χάλυβες, μία τυπική μορφή της καμπύλης τάσεων – παραμορφώσεων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.1.1: Τυπική μορφή καμπύλης τάσεων – παραμορφώσεων ενός χάλυβα)



Σχήμα 2.1.1: Τυπική μορφή καμπύλης τάσεων – παραμορφώσεων ενός χάλυβα

Στην πραγματικότητα, αν πραγματοποιήσουμε μια δοκιμή εφελκυσμού τότε το διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης θα είναι παρόμοιο με το παρακάτω (Σχήμα 2.1.2: Κανονική μορφή διαγράμματος τάσεων – παραμορφώσεων ενός χάλυβα)



Σχήμα 2.1.2: Κανονική μορφή διαγράμματος τάσεων – παραμορφώσεων ενός χάλυβα

Στα παραπάνω διαγράμματα, μπορεί να διακρίνει κάποιος το διαχωρισμό μεταξύ ελαστικής και πλαστικής περιοχής, ο οποίος καθορίζεται από το σημείο διαρροής (σημείο Y της καμπύλης) στο οποίο αντιστοιχεί η τάση διαρροής σ_y .

Ελαστική περιοχή (OY)

- Στον κλάδο της καμπύλης, που αντιστοιχεί στην ελαστική περιοχή (τμήμα OY) εμφανίζεται ένα γραμμικό τμήμα OP, με άνω όριο το όριο αναλογίας σ_P . Σε αυτή τη γραμμική της γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς, η τάση και η παραμόρφωση συνδέονται γραμμικά μέσω της σχέσης του Hooke:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Όπου:

E: το μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο του Young, το οποίο αποτελεί και την κλίση του ευθύγραμμου κλάδου της καμπύλης.

- Ακολουθεί το μη γραμμικό τμήμα PY του κλάδου αυτού το οποίο έχει ως άνω όριο το όριο διαρροής σ_y (yielding stress). Σε αυτό το τμήμα η τάση και η παραμόρφωση συνδέονται με μη-γραμμική σχέση.

Πλαστική περιοχή

Μετά το σημείο διαρροής (Y στην καμπύλη) που αντιστοιχεί στην τάση διαρροής σ_y τελειώνει η περιοχή της ελαστικής συμπεριφοράς. Ξεκινά η περιοχή της πλαστικής παραμόρφωσης. Πλέον, αν πάψουμε να επιβάλλουμε φορτίο, το υλικό δεν θα επιστρέψει στην αρχική του κατάσταση αλλά θα έχουμε μια μόνιμη παραμένουσα παραμόρφωση.

Πιο συγκεκριμένα την παραμόρφωση ε , που αντιστοιχεί σε ένα σημείο του πλαστικού κλάδου μπορούμε να την γράψουμε σαν ένα άθροισμα της παραμένουσας παραμόρφωσης ε_P και της ελαστικής παραμόρφωσης ε_e .

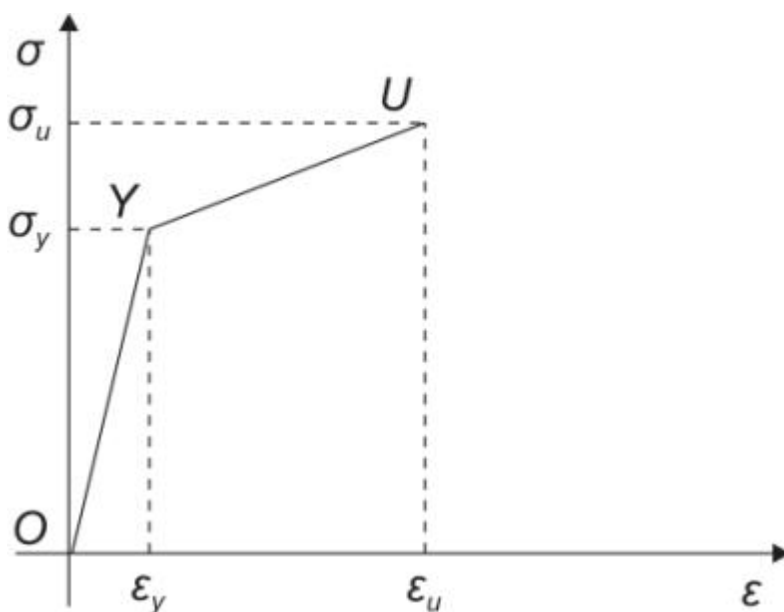
$$\varepsilon = \varepsilon_P + \varepsilon_e$$

2.2 Μοντελοποίηση ναυπηγικού χάλυβα

Κατά την μελέτη των ναυπηγικών κατασκευών γίνονται ορισμένες παραδοχές οι οποίες έχουν απλουστευτικό χαρακτήρα για λόγους εύκολης χρήσης των μεθόδων της ανάλυσης της αντοχής των κατασκευών καθώς και για ευκολότερη μοντελοποίηση. Ωστόσο, αυτές οι παραδοχές πρέπει να διατηρούν τα βασικά χαρακτηριστικά των θεωρούμενων υλικών.

- Γραμμική ελαστική – πλαστική περιοχή

Μία από τις μοντελοποιήσεις που έχουν γίνει, είναι αυτή της γραμμικοποίησης της συμπεριφοράς του υλικού μετά το σημείο διαρροής, γραμμικοποίηση της πλαστικής περιοχής δηλαδή (Σχήμα 2.2.1: Μοντέλο γραμμικού ελαστικού – πλαστικού υλικού). Ένα τέτοιο υλικό ονομάζεται και γραμμικά κρατυνόμενο.



Σχήμα 2.2.1: Μοντέλο γραμμικού ελαστικού – πλαστικού υλικού

Χρησιμοποιούμε το μοντέλο του γραμμικού ελαστικού – πλαστικού υλικού. Πιο συγκεκριμένα, μέχρι το σημείο διαρροής, κατά το πρώτο στάδιο της φόρτισης ισχύει, όπως προαναφέρθηκε, ο νόμος του Hooke, δηλαδή η παραμόρφωση ισούται με:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

Για το υλικό που επιλέχθηκε, το μέτρο ελαστικότητας ισούται με $E = 207 \text{ GPa}$ ενώ η τάση διαρροής είναι ίση με $\sigma_y = 235 \text{ MPa}$. Οι τιμές αυτές επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να συμφωνούν με αυτές του πειράματος. Παράλληλα ο συγκεκριμένος τύπος χάλυβα συγκαταλέγεται στο είδος των κοινών ναυπηγικών χαλύβων (εκτός από τον κοινό χάλυβα στην παρούσα διπλωματική εργασία θα γίνει μελέτη και για ένα ακόμα είδος ναυπηγικού χάλυβα, το χάλυβα υψηλής αντοχής, στον οποίο θα γίνει εκτενέστερη αναφορά στο Κεφάλαιο 6)

Μετά το σημείο διαρροής, η παραμόρφωση συνεχίζει να αυξάνει με την άυξηση της τάσης με κλίση που ισούται με το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας $E_h = 1 \text{ MPa}$

Στο περιβάλλον του *LS – DYN4* ένας εύχρηστος τρόπος για να ορίσουμε τα χαρακτηριστικά του υλικού μας, είναι να εισάγουμε ξεχωριστά τα στοιχεία της ελαστικής και της πλαστικής συμπεριφοράς του. Μπορούμε λοιπόν επιλέγοντας το κατάλληλο υλικό, να ορίσουμε την ελαστική του περιοχή καθορίζοντας την πυκνότητα του (7830 Kg/m^3), το λόγο Poisson ($\nu = 0.3$) και το μέτρο ελαστικότητάς του.

Για την πλαστική περιοχή, ορίζουμε την τάση διαρροής και την καμπύλη τάσης – παραμένουσας παραμόρφωσης εισάγοντας ζεύγη τιμών.

- **Μετατροπή συμβατικών τάσεων σε πραγματικές**

Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στο γεγονός ότι το *LS – DYN4* απαιτεί να εισάγουμε τις πραγματικές τιμές της τάσης και της παραμόρφωσης. Κρίνεται αναγκαίο λοιπόν να μετατρέψουμε τις συμβατικές τάσεις που λαμβάνονται από το διάγραμμα, σε πραγματικές. Για να γίνει αυτό χρησιμοποιούνται οι παρακάτω σχέσεις:

Η συμβατική παραμόρφωση εκφράζεται ως εξής:

$$\varepsilon_{nom} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - \frac{l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1$$

Όπου:

l : τελικό μήκος δοκιμίου

l_0 : αρχικό μήκος δοκιμίου

Η πραγματική παραμόρφωση ορίζεται ως εξής:

$$\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0}$$

Από τις δύο παραπάνω σχέσεις συνεπάγεται ότι:

$$\varepsilon = \ln(\varepsilon_{nom} + 1)$$

Επιρόσθετα για την τάση ισχύει:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Όπου:

F : το φορτίο που καταπονεί τη διατομή

A : το εμβαδόν της διατομής

Συμβολίζοντας με A_0 το εμβαδόν της αρχικής διατομής, με A το εμβαδόν της τελικής διατομής και θεωρώντας ότι ο όγκος του υλικού διατηρείται σταθερός, σε σχέση με τον αρχικό, μετά την πλαστική παραμόρφωση προκύπτει ότι:

$$A_0 \cdot l_0 = A \cdot l \Rightarrow A = A_0 \cdot \frac{l_0}{l}$$

Από τον ορισμό της τάσης ισχύει ότι:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} \cdot \frac{l}{l_0} = \sigma_{nom} \cdot \frac{l}{l_0} = \sigma_{nom}(1 + \varepsilon_{nom})$$

Μετά την μετατροπή αυτή μπορούμε να εισάγουμε τις τιμές κατά ζεύγη όπως προαναφέρθηκε στην ανάλυση του *LS – DYNA*.

Ο κώδικας προσφέρει πλήθος επιλογών όσον αφορά το υλικό. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής, επιλέχθηκε το υλικό `*MAT_024: *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY` [19], το οποίο μας επιτρέπει να εισάγουμε τις τιμές τάσεων – παραμενουσών παραμορφώσεων κατά ζεύγη.

- **Ρυθμός παραμόρφωσης (strain rate effect)**

Οι φορτίσεις τις οποίες εξετάζουμε στην παρούσα εργασία, χαρακτηρίζονται ως κρουστικές, δηλαδή έχουν πολύ μικρό χρόνο επιβολής. Πιο συγκεκριμένα, ο χρόνος διάδοσης των τασικών κυμάτων στο υλικό (ο οποίος σχετίζεται με το ρυθμό φόρτισης) είναι συγκρίσιμος με την ιδιοπερίοδο της κατασκευής. Την παραδοχή αυτή την ενισχύει και το γεγονός ότι η μεγάλη ταχύτητα παραμόρφωσης του υλικού μας, χαρακτηρίζει την φόρτιση ως κρουστική.

Λόγω της απόκρισης που δημιουργεί αυτό το είδος φόρτισης, η πραγματική τάση διαρροής του υλικού διαφέρει από αυτή που υπολογίζεται στο εργαστήριο όπου τα τυποποιημένα δοκίμια καταπονούνται στατικά. Γενικά η τάση διαρροής σε μία κρουστική φόρτιση αυξάνει και η τιμή της σχετίζεται με το ρυθμό παραμόρφωσης αλλά και με άλλα χαρακτηριστικά του υλικού [17].

Στην ανάλυσή μας είναι απαραίτητο να λάβουμε υπόψιν το φαινόμενο της επίδρασης του ρυθμού παραμόρφωσης καθώς όπως θα παρουσιαστεί σε επόμενο κεφάλαιο, η παράλειψη αυτού οδηγεί σε πολύ έντονες παραμορφώσεις, μεγαλύτερες από αυτές που μετρώνται πειραματικά.

Δύο σχετικά απλά μοντέλα που συνδέουν την τάση διαρροής με το ρυθμό παραμόρφωσης είναι το μοντέλο των Johnson – Cook και το μοντέλο των Cowper – Symonds. Η σχέση των Johnson – Cook [18] απαιτεί πολλές παραμέτρους οι οποίες πρέπει να καθοριστούν πειραματικά. Για τον λόγο αυτό στη συγκεκριμένη εργασία επιλέγεται η σχέση των Cowper – Symonds η οποία έχει λιγότερες παραμέτρους από το μοντέλο των Johnson – Cook. Αν και εμπειρική και παρά την απλότητά της, δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα που συμφωνούν με την πειραματική εμπειρία με αρκετά καλή ακρίβεια. Η σχέση είναι η εξής:

$$\frac{\sigma_y^*}{\sigma_y} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C}\right)^{\frac{1}{p}}$$

Όπου:

- σ_y^* : η τάση διαρροής για την εξεταζόμενη φόρτιση
- σ_y : η τάση διαρροής σε στατική φόρτιση
- $\dot{\epsilon}$: ο ρυθμός παραμόρφωσης
- C, p : σταθερές που σχετίζονται με το υλικό. Για το μαλακό χάλυβα συνήθεις τιμές είναι: $C = 40s^{-1}$, $p = 5$.

Το υλικό (*MAT_24) που επιλέχθηκε νωρίτερα, επιτρέπει την είσοδο αυτών των παραμέτρων (C και p) για το μοντέλο των Cowper – Symonds.

Κεφάλαιο 3 Μοντελοποίηση των ελασμάτων

3.1 Μονάδες μέτρησης

Πρωτού αναλυθεί το πως μοντελοποιήθηκαν τα ελάσματα στο περιβάλλον του *LS – DYNA*, θα πρέπει να αναφερθούν οι μονάδες μέτρησεις που χρησιμοποιήθηκαν. Το υπολογιστικό πακέτο διαθέτει διάφορους συνδυασμούς, όσον αφορά τις μονάδες μέτρησης, τους οποίους μπορεί να χρησιμοποιήσει ο χρήστης. Στον παρακάτω Πίνακα 3.1.1 αναφέρονται αναλυτικά:

- $1 \text{ force unit} = 1 \text{ mass unit} * 1 \text{ acceleration unit}$
- $1 \text{ acceleration unit} = 1 \text{ length unit} / (1 \text{ time unit})^2$

Πίνακας 3.1.1: Πίνακας με τις μονάδες μέτρησης

MASS	LENG	TIME	FORCE	STRESS	ENERGY	GRAVITY
kg	m	s	N	Pa	J	9.806
kg	cm	s	1.0e-02 N			9.806e+02
kg	cm	ms	1.0e+04 N			9.806e-04
kg	cm	μs	1.0e+10 N			9.806e-10
kg	mm	ms	KN	GPa	KN- mm	9.806e-03
g	cm	s	dyne	dy/cm ²	erg	9.806e+02
g	cm	μs	1.0e+07 N	Mbar	1.0e+0.7 Ncm	9.806e-10
g	mm	s	1.0e-06 N	Pa		9.806e+03
g	mm	ms	N	MPa	N-mm	9.806e-03
ton	mm	s	N	MPa	N-mm	9.806e+03
lbf/in ²	in	s	lbf	psi	lbf-in	386
slug	ft	s	lbf	psf	lbf-ft	32.17
kgfs/mm	mm	s	kgf	kgf/mm ²	kgf-mm	
kg	mm	s	mN	1.0e+03 Pa		9.806e+02
g	cm	ms		1.0e+03 Pa		

Ο συνδυασμός που επιλέχθηκε για τη δική μας ανάλυση είναι ο 9^{ος} σε σειρά (πράσινο χρώμα), όπου η μάζα είναι σε *g*, το μήκος σε *mm*, ο χρόνος σε *ms*, η δύναμη σε *N* και η τάση/πίεση σε *MPa*.

Οι μονάδες μέτρησης πρέπει να τηρούνται αυστηρά, σύμφωνα με τον παραπάνω συνδυασμό, εάν θέλουμε να έχουμε επιτυχή αποτελέσματα.

3.2 Επιλογή των στοιχείων του μοντέλου για επίλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Βασικό ζήτημα ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων με επιτυχία είναι, ακριβώς, η σωστή επιλογή των στοιχείων που θα μοντελοποιήσουν την κατασκευή. Από την πληθώρα των διδιάστατων και τρισδιάστατων στοιχείων που παρέχει το *LS - DYNA*, θα πρέπει να επιλεγθούν αυτά που ταιριάζουν στο συγκεκριμένο πρόβλημα, δηλαδή στη γεωμετρία και στα χαρακτηριστικά της κατασκευής, και να είναι παράλληλα και τα πιο «οικονομικά». Λέγοντας «οικονομικά» εννοούμε να μας εξοικονομούν πολύτιμο υπολογιστικό χρόνο. Ωστόσο, δεν θα πρέπει στο όνομα της ταχύτητας να θυσιάζουμε την ακρίβεια του αποτελέσματος.

Οι τύποι στοιχείων που διαθέτει το συγκεκριμένο υπολογιστικό πακέτο, αναφέρονται ονομαστικά παρακάτω:

- Τετράεδρα – 4 κόμβων
- Στερεά στοιχεία – 8 κόμβων
- Στοιχεία δοκού (beam) – 2 κόμβων
- Στοιχεία κελύφη (shell) – 3 ή 4 κόμβων
- Κελυφωτά στερεά στοιχεία – 8 κόμβων
- Στοιχεία μεμβρανών
- Άκαμπτα σώματα (rigid)
- Διακριτά στοιχεία (discrete)
- Στοιχεία στερέωσης (truss)

Στα πλαίσια της διπλωματικής, επιλέχθηκαν τα shell elements, καθώς τα ελάσματα καθώς και οι ενισχύσεις αυτών (όπως θα αναφερθεί παρακάτω) έχουν πολύ μικρό πάχος σε σχέση με τις άλλες διαστάσεις. Αυτό λοιπόν μας δίνει τη δυνατότητα να επιλέξουμε τα 4-κομβικά διδιάστατα στοιχεία κελύφους [19].

Πιο συγκεκριμένα, από την πληθώρα των στοιχείων κελύφους που διαθέτει το *LS - DYNA*, επιλέχθηκε το *ELFORM = 1* (Hughes-Liu), αντί του προεπιλεγμένου (default) *ELFORM = 2* (Belytschko-Tsay), καθώς αν και είναι, μερικώς, υπολογιστικά πιο δαπανηρό από το προεπιλεγμένο, αποφέρει καλύτερα αποτελέσματα σε μεγάλες παραμορφώσεις. Η διαφορά στο χρόνο περάτωσης κάθε δοκιμής, ήταν πολύ μικρή ώστε να ληφθεί υπόψιν, ενώ και τα δύο στοιχεία διαθέτουν ένα σημείο ολοκλήρωσης, γεγονός που τα καθιστά οικονομικά.

Σωστό θα ήταν να αναφερθεί ότι στο στοιχείο αυτό εισάγεται το πάχος του ελάσματος και όχι κατά τη σχεδιάσή του. Πιο συγκεκριμένα, η τιμή που δίνεται ισομοιράζεται στη μέση επιφάνεια, η οποία στην προκειμένη περίπτωση είναι το έλασμα.

Ο συγκεκριμένος τύπος στοιχείου, απαιτεί τη χρήση του ελέγχου της «κλεψύδρας» (Hourglass control). Το φαινόμενο της «κλεψύδρας», είναι ουσιαστικά μη φυσικές, μηδενικής ενέργειας μορφές παραμόρφωσης, οι οποίες παράγουν μηδενική τάση και παραμόρφωση. Εμφανίζεται μόνο σε στερεά και σε κελύφη με ένα σημείο ολοκλήρωσης.

Ένας άλλος τρόπος για την αποφυγή του φαινομένου, πολύ δαπανηρός ωστόσο, είναι η χρήση στοιχείων πλήρως ολοκληρωμένων (fully integrated), τα οποία πέρα από το μειονέκτημα του υπολογιστικού χρόνου, τήνουν να είναι ασταθή σε μεγάλες παραμορφώσεις. Εφόσον θα χρησιμοποιήσουμε το $ELFORM = 1$ (με ένα σημείο ολοκλήρωσης), θα πρέπει να εισάγουμε στον κώδικά μας και τον έλεγχο του φαινομένου της κλεψύδρας.

Νωρίτερα, αναφέρθηκε το υλικό το οποίο θα προσομοιάσει το χάλυβα μας. Το υλικό αυτό είναι το *MAT_024: *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY. Πρόκειται για ένα ελαστο-πλαστικό υλικό το οποίο, σύμφωνα με το εγχειρίδιο [19], μπορεί να προσομοιάσει τη συμπεριφορά του μετάλλου και διαθέτει χαρακτηριστικά τα οποία είναι απαραίτητα για την εργασία μας, όπως είναι ο ρυθμός παραμόρφωσης (strain rate) τον οποίο μπορούμε να καθορίσουμε μέσα στον κώδικα καθορίζοντας τις τιμές των σταθερών C και p των Cowper – Symonds όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα. Κάποιες τυπικές τιμές των δύο αυτών παραμέτρων που χρησιμοποιούνται ευρέως για το χάλυβα και έχουν χρησιμοποιηθεί και στην πειραματική διαδικασία [17] είναι:

- $C = 40s^{-1}$ και
- $p = 5$

Πέρα από τα παραπάνω χαρακτηριστικά, έχει την ιδιότητα όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, της εισαγωγής της ελαστικής περιοχής του μετάλλου μέσω του μέτρου ελαστικότητας, του λόγου Poisson και της πυκνότητας, ξεχωριστά από την πλαστική περιοχή η οποία καθορίζεται μέσα από τα ζεύγη τάσεων – παραμορφώσεων (πιο συγκεκριμένα από τα ζεύγη τάσεων – παραμενουσών παραμορφώσεων). Όπως γίνεται κατανοητό από το όνομά του και μόνο, συνδέει γραμμικά τα σημεία που δημιουργούνται από τα ζεύγη τιμών, προσομοιώνοντας έτσι την καμπύλη της πλαστικής περιοχής.

Κεφάλαιο 4 Μελέτη απόκρισης τετραγωνικών ελασμάτων χωρίς ενίσχυση σε κρουστικό φορτίο

Αρχικά, μας απασχολεί το ζήτημα της ακρίβειας της μεθόδου, των παραδοχών και των δεδομένων που χρησιμοποιούμε. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, το φαινόμενο της σφυρόκρουσης, λαμβάνει χώρα σε τόσο μικρό χρονικό διάστημα και με τέτοια ταχύτητα, που θα μπορούσε να θεωρηθεί ως κρουστικό.

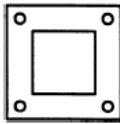
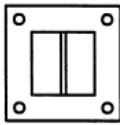
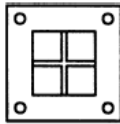
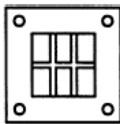
Καταφεύγοντας στη βιβλιογραφία για την εύρεση πειραματικών δεδομένων, τα οποία θα επαληθεύσουν ή θα καταρρίψουν την αριθμητική μας επίλυση, συναντάμε ένα πρόβλημα. Τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα πάνω στο φαινόμενο της σφυρόκρουσης είναι πολύ λίγα σε σχέση με τις αριθμητικές, αναλυτικές προσεγγίσεις του προβλήματος. Τα ήδη υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα, είτε αφορούν την πτώση από ύψος, πρωραίων τμημάτων πλοίου εντός του νερού, είτε την υπό κλίμακα προσομοίωση του φαινομένου σφυρόκρουσης μέσα σε δεξαμενές. Ωστόσο όλα τα αυτά τα πειραματικά δεδομένα, αναλύουν το φαινόμενο της σφυρόκρουσης στην ολότητα του (προσεγγιστικά πάντα), από την αρχή μέχρι το τέλος, λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις παραμέτρους συμπεριλαμβανομένου και το κομμάτι της υδροδυναμικής. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα στο αντικείμενο της διπλωματικής, γνωρίζοντας πως πρόκειται για ένα πολύπλοκο πρόβλημα, θα το προσεγγίσουμε με έναν διαφορετικό τρόπο.

Βασιζόμενοι λοιπόν στο γεγονός ότι η σφυρόκρουση δημιουργεί κρουστικά φορτία, αναζητούμε στη βιβλιογραφία δεδομένα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα.

4.1 Πειραματικά δεδομένα

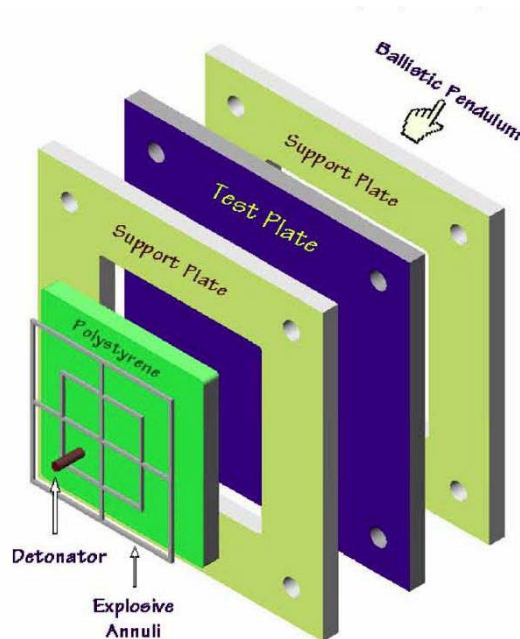
Οι S. Chung Kim Yuen και G. N. Nurick πραγματοποίησαν μια σειρά από πειράματα των οποίων τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα δημοσίευσαν το 2003 [17]. Αντικείμενα του πειράματος του πειράματος ήταν τετράγωνα ελάσματα από μαλακό χάλυβα με μήκος πλευράς 126 mm και πάχος 1,6 mm και 1,63mm. Κάποια ελάσματα είχαν ενισχυτικά, ενώ έγιναν και δύο πειράματα με απλά ελάσματα χωρίς ενίσχυση. Τα τελευταία πειράματα είναι που θα μας απασχολήσουν στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, ενώ παρακάτω θα αναφερθούμε και στα ελάσματα με ενίσχυση. Στην παρακάτω Εικόνα 4.1.1 φαίνονται τα ελάσματα με και χωρίς ενίσχυση που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία.

Αριθμητική Προσομοίωση Σφυρόκρουσης Ελασμάτων
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Name	Description	Sketch	Stiffener size (width × height) (mm ²)
Flat (unstiffened)	No stiffener within exposed square area (A)		none
Single stiffener (S)	A single stiffener machined within exposed square area dividing the plate into two equal areas ($\approx A/2$)		3 × 3 3 × 7 4 × 3 4 × 7
Cross-stiffener (C)	Two single stiffeners machined perpendicular to each other dividing the square area into four equal areas ($\approx A/4$)		3 × 3 3 × 7
Double cross-stiffener (DC)	Three stiffeners machined within the exposed square area dividing the plate into six equal areas ($\approx A/6$)		3 × 3 3 × 7

Εικόνα 4.1.1: Ελάσματα πειράματος

Η πειραματική διάταξη προέβλεπε την εφαρμογή κρουστικού φορτίου ομοιόμορφα στο έλασμα με τη χρήση πλαστικού εκρηκτικού. Η ομοιομορφία της φόρτισης επιτυγχάνεται με την κατάλληλη κατανομή του εκρηκτικού καθώς και με την παρεμβολή ενός στρώματος πολυστυρενίου ανάμεσα στο έλασμα και το εκρηκτικό. Η όλη διάταξη φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 4.1.2.



Εικόνα 4.1.2: Πειραματική διάταξη όπου διακρίνεται το υπό καταπόνηση έλασμα, οι υποστηρίξεις, το εκρηκτικό υλικό και το στρώμα πολυστυρενίου

Με τη χρήση διαφορετικής ποσότητας εκρηκτικής ύλης, ρυθμίζεται η ένταση του κρουστικού παλμού. Επίσης, η διάρκεια του παλμού σχετίζεται με το χρόνο καύσης, άρα με το είδος της εκρηκτικής ύλης. Η μέγιστη πίεση συνδέεται με την ένταση του παλμού και τη διάρκειά του με βάση τη σχέση:

$$P = \frac{I}{A \cdot \tau}$$

Όπου:

- I : η ένταση του παλμού σε $N \cdot s$
- A : η επιφάνεια του ελάσματος
- τ : η διάρκεια του παλμού

Σε κάθε πείραμα καταγράφεται η μετατόπιση του κέντρου του ελάσματος από την αρχική θέση/κατάσταση. Αυτό το στοιχείο είναι ένα μέτρο για την παραμόρφωση του. Τα στοιχεία και τα αποτελέσματα για τα δύο πειράματα φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 4.1.1.

Πίνακας 4.1.1: Πίνακας στοιχείων και αποτελεσμάτων για τα πειράματα S56 και S01

Κωδικός πειράματος	Πάχος ελάσματος (mm)	Πλάτος ενίσχυσης (mm)	Ύψος ενίσχυσης (mm)	Ένταση παλμού ($N \cdot s$)	Διάρκεια παλμού (μs)	Μετατόπιση κέντρου (mm)
S56	1.6	-	-	31.0	14.5	25.54
S01	1.63	-	-	43.4	14.5	35.46

4.2 Μοντελοποίηση παλμού & επιλογή πλέγματος

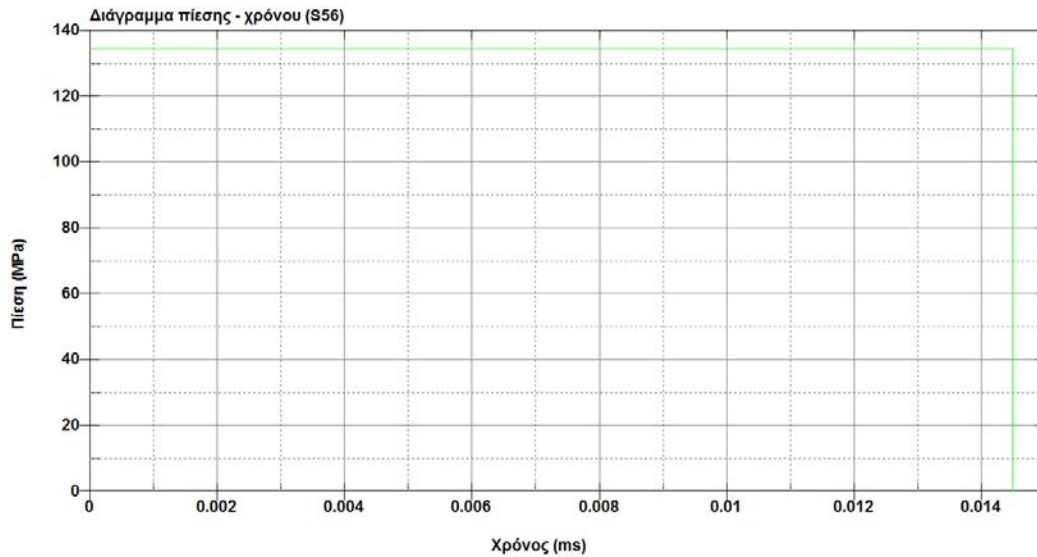
Νωρίτερα αναφερθήκαμε στο πως μοντελοποιήθηκαν τα ελάσματα όσον αφορά το υλικό τους και τον τύπο στοιχείου τους. Στην ενότητα αυτή θα αναφερθούμε στο πως μοντελοποιήσαμε τον παλμό καθώς και στο πως επιλέξαμε κατάλληλο πλέγμα.

Βάσει της παραπάνω σχέσης που αφορά τη μέγιστη πίεση που αναπτύσσεται και συσχετίζει τον παλμό, με την επιφάνεια του ελάσματος και την διάρκεια του, δημιουργούμε στο περιβάλλον του *LS – DYNA* μία προσομοίωση του παλμού αυτού.

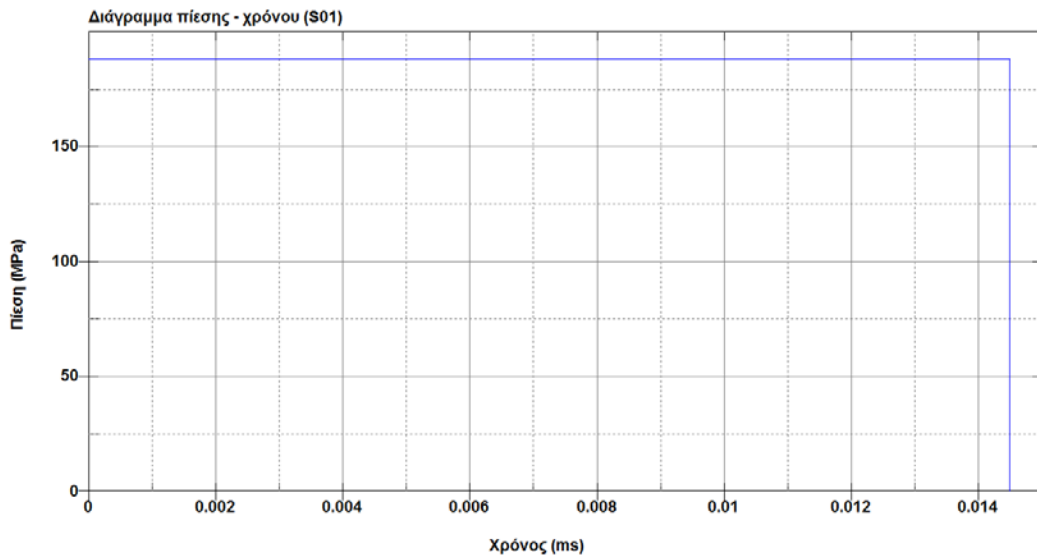
Γνωρίζοντας ότι η ένταση του παλμού είναι $31 N \cdot s$ (για το S56) και $43,4 N \cdot s$ (για το S01) με διάρκεια $14.5 \mu s$ (και στις δύο περιπτώσεις) πάνω σε μία επιφάνεια $126 \times 126 = 15876 mm^2$, υπολογίζουμε ότι οι πιέσεις που αναπτύσσονται είναι ίσες με $134.66 N/mm^2 = 134.66 MPa$ και $188.53 N/mm^2 = 188.53 MPa$.

Με την εντολή *DEFINE: *CURVE στο περιβάλλον του κώδικα, δημιουργούμε για αρχή την καμπύλη του τετραγωνικού παλμού η οποία έχει στον y -άξονα την πίεση και στον x -άξονα το χρόνο με τη χρήση του P_{max} και του τ , καθώς στη συνέχεια θα διερευνήσουμε 3 ακόμα διαφορετικούς τρόπους προσομοίωσης του παλμού (4.3.3 Επίδραση διαφορετικού είδους παλμού). Προσοχή πάντα στις μονάδες μέτρησης κατά τη μεταφορά τους μέσα στον κώδικα, σύμφωνα πάντα με τον συνδυασμό που επιλέχθηκε.

Στα διαγράμματα παρακάτω αναπαριστώνται οι τετραγωνικοί παλμοί για το πείραμα S56 (Διάγραμμα 4.2.1) και S01(Διάγραμμα 4.2.2) αντίστοιχα.



Διάγραμμα 4.2.1: Διάγραμμα πίεσης – χρόνου για το πείραμα με κωδικό S56



Διάγραμμα 4.2.2: Διάγραμμα πίεσης – χρόνου για το πείραμα με κωδικό S01

Μετά τον καθορισμό του διαγράμματος του παλμού, με τη βοήθεια της εντολής *LOAD: *SHELL_SET , εφαρμόζουμε τον παλμό αυτόν πάνω στο έλασμα ομοιόμορφα.

Για την επιλογή του κατάλληλου πλέγματος στο μοντέλο με τα Shell elements έγιναν αρκετές δοκιμές με διάφορα πλέγματα. Στην αρχή έγινε δοκιμή με πλέγματα 10x10, 20x20, 40x40 και 60x60 βάσει του πειράματος με κωδικό S56. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 4.2.1

Πίνακας 4.2.1: Πίνακας αποτελεσμάτων για τα διάφορα πλέγματα

S56							
10x10		20x20		40x40		60x60	
Μόνιμη	Μέγιστη	Μόνιμη	Μέγιστη	Μόνιμη	Μέγιστη	Μόνιμη	Μέγιστη
22.7621	23.3	26.2683	26.75	27.3647	27.8	27.4969	28.1

Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα δεν διαφέρουν μεταξύ τους σε μεγάλο βαθμό, εκτός από την 1^η περίπτωση που έχει σημαντική απόκλιση από τις υπόλοιπες. Για τον λόγο αυτό είχε επιλεγεί αρχικά το πλέγμα 20x20 ως οικονομικότερο. Ωστόσο επειδή στη συνέχεια της εργασίας έγιναν μελέτες για ελάσματα με ενισχύσεις, όπως θα αναφερθεί και παρακάτω, το εν λόγω πλέγμα δεν διευκόλυνε στην ευθυγράμμιση του πλέγματος του ελάσματος με αυτό της ενίσχυσης. Για τον λόγο αυτό, επιλέχθηκε το πλέγμα 84x84 το οποίο είναι το οικονομικότερο πλέγμα που ικανοποιεί την παραπάνω συνθήκη και στην πραγματικότητα δεν διαφέρει σε μεγάλο βαθμό ούτε σε υπολογιστικό χρόνο από το αρχικά επιλεγμένο 20x20 αλλά ούτε και στα αποτελέσματα που αποφέρει. Στον παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα του πλέγματος 84x84.

Πίνακας 4.2.2: Πίνακας αποτελεσμάτων για το πλέγμα 84x84

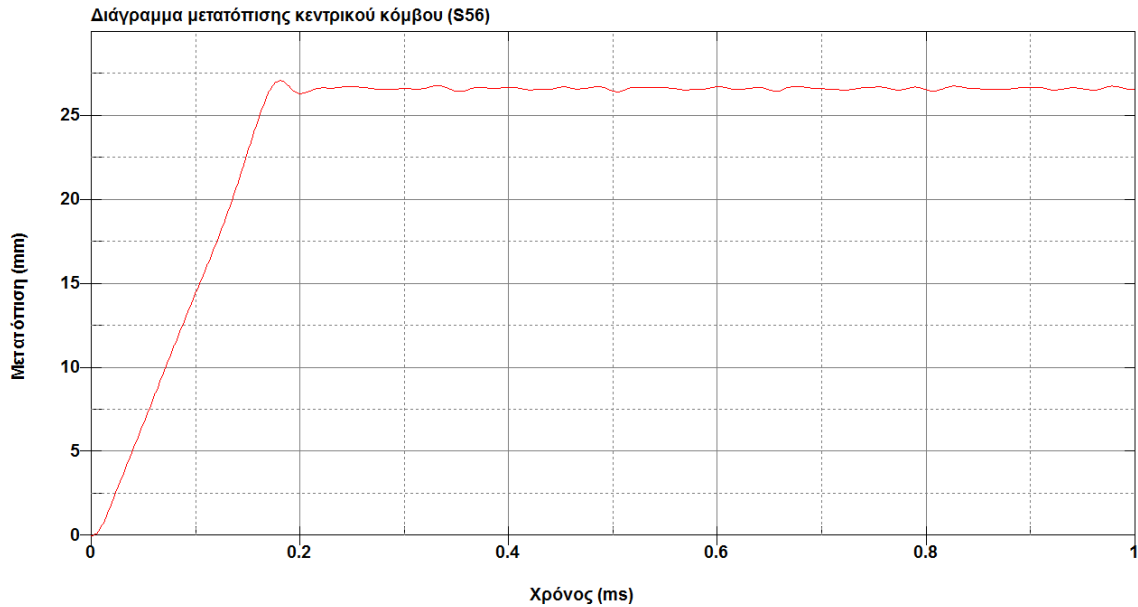
S56	
84x84	
Μόνιμη	Μέγιστη
26.58	27.11

Σαν χρονικό βήμα έχει παρθεί το 1ms δηλαδή 0.001ms το οποίο έχει εισαχθεί μέσα στον κώδικα μέσω της εντολής *DATABASE: *BINARY_D3PLOT και *DATABASE: *BINARY_D3THDT. Ο χρόνος τερματισμού ορίστηκε το 1ms μέσω της εντολής *CONTROL: *TERMINATION.

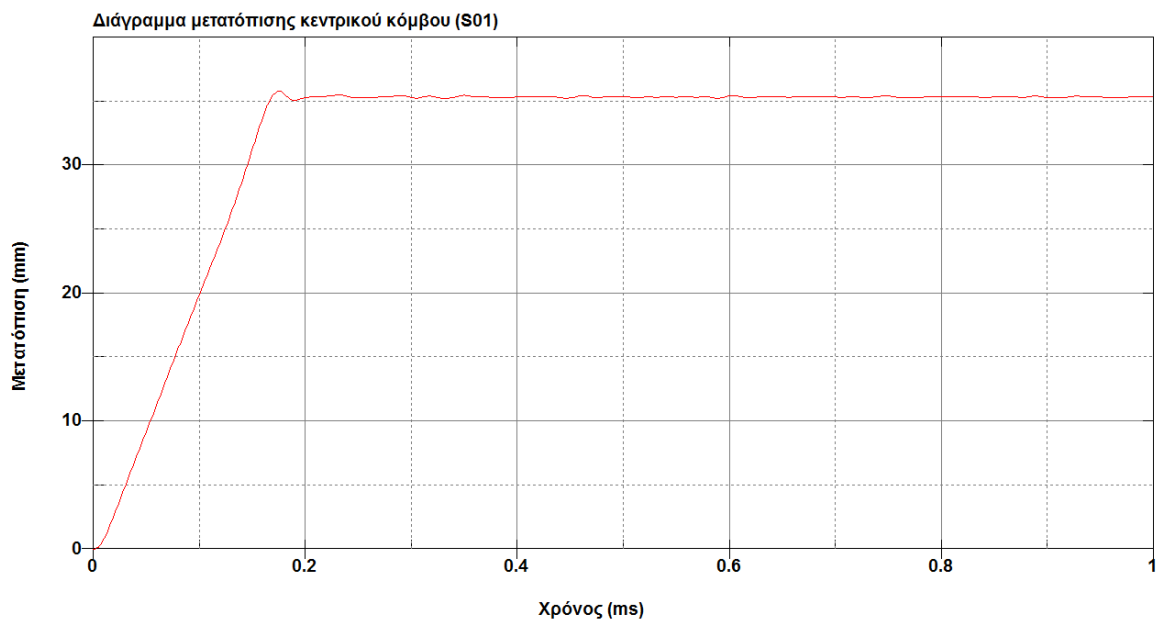
Το έλασμα που χρησιμοποιείται, λόγω της πειραματικής διάταξης, θεωρείται πακτωμένο περιμετρικά. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο, μεταβαίνουμε στην εντολή *BOUNDARY_SPC_SET, στην οποία αφού μαρκάρουμε την επιθυμητή περιοχή, περιορίζουμε όλους τους βαθμούς ελευθερίας βάζοντας την τιμή 1 στις θέσεις που απαιτείται (1 = ναι, 0 = όχι για τον περιορισμό).

4.3 Αποτελέσματα

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, σε μορφή διαγράμματος, μετατόπισης του κεντρικού κόμβου σε συνάρτηση με το χρόνο για τα δύο πειράματα S56 (Διάγραμμα 4.3.1) και S01(Διάγραμμα 4.3.2) αντίστοιχα.



Διάγραμμα 4.3.1: Διάγραμμα μετατόπισης κεντρικού κόμβου σε συνάρτηση με το χρόνο για το πείραμα με κωδικό S56

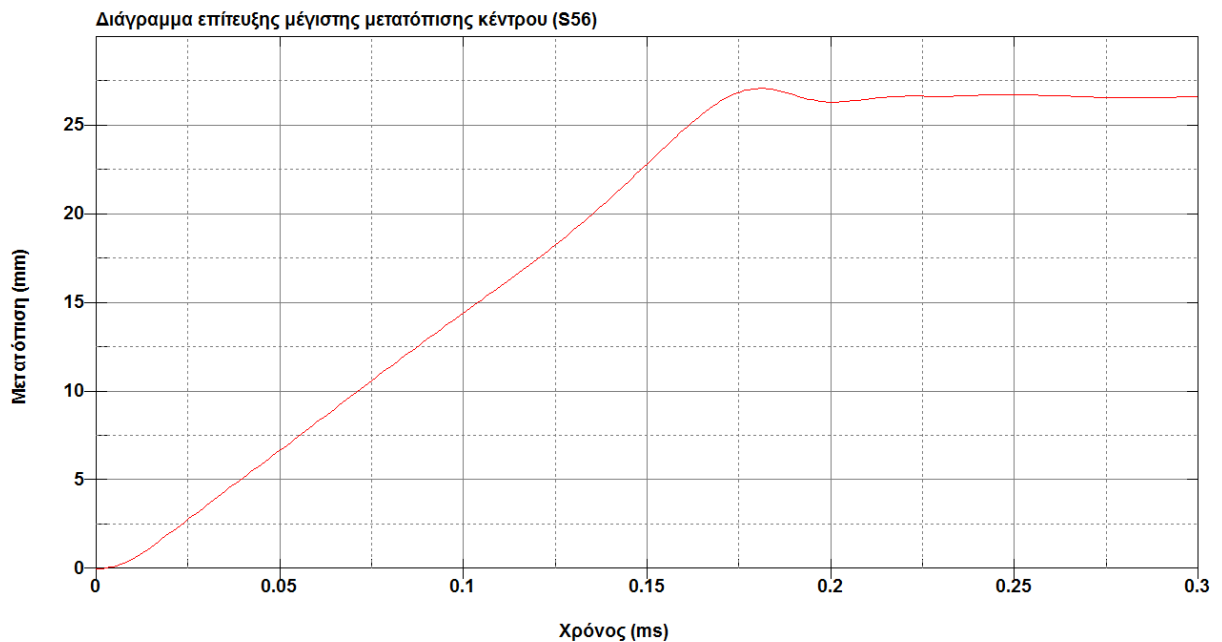


Διάγραμμα 4.3.2: Διάγραμμα μετατόπισης κεντρικού κόμβου σε συνάρτηση με το χρόνο για το πείραμα με κωδικό S01

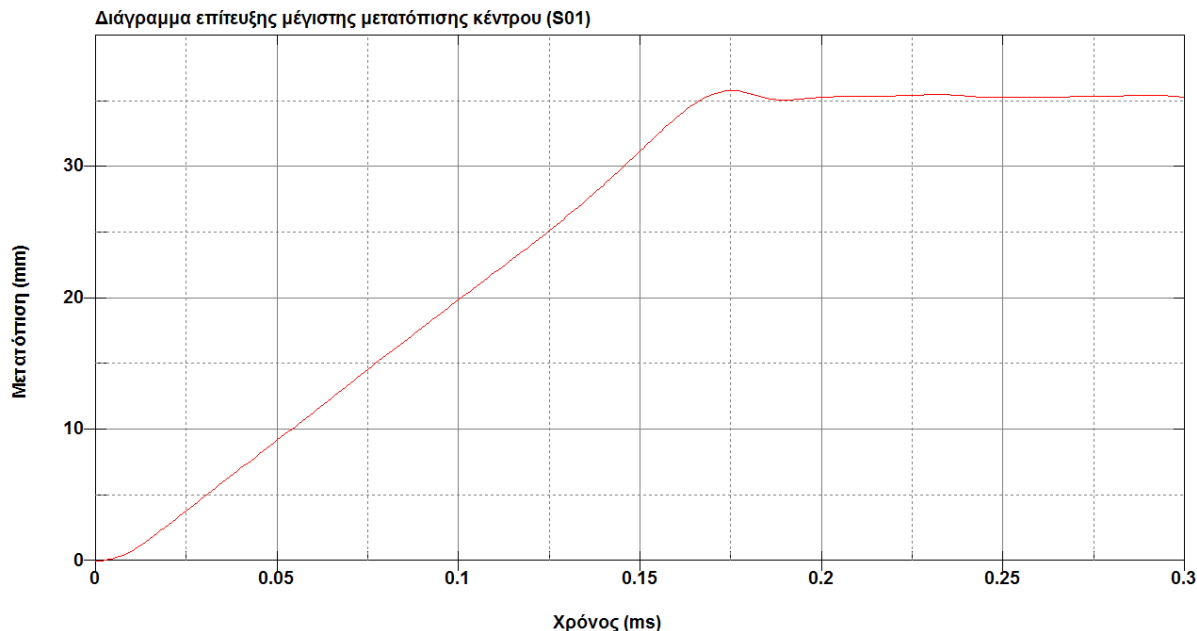
Βάσει των παραπάνω διαγραμμάτων, παρατηρούμε ότι η μέγιστη μετατόπιση δεν ταυτίζεται με την μόνιμη μετατόπιση. Για το πείραμα με κωδικό S56 η μέγιστη μετατόπιση είναι 27.11mm και η μόνιμη μετατόπιση είναι 26.58 mm, ενώ για το πείραμα με κωδικό S01 η μέγιστη μετατόπιση είναι 35.83 mm και η μόνιμη 35.42 mm.

Επίσης, ενώ το κέντρο του ελάσματος φτάνει σε μέγιστη μετατόπιση σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, περίπου στα 0,16-0,18 ms ή στα 160-180 μs, η ίδια συνεχίζει να ταλαντώνεται μέχρι την απόσβεση της ταλάντωσης η οποία συμβαίνει πολύ αργότερα σε σχέση με τον χρόνο που επιτυγχάνεται η μέγιστη μετατόπιση.

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η μετατόπιση τα πρώτα 0.3 ms δηλαδή τα πρώτα 300 μs. Παρατηρούμε ότι η μέγιστη μετατόπιση γίνεται σε ουσιαστικά όμοια χρονικά διαστήματα. Πιο συγκεκριμένα για το μοντέλο με κωδικό S56 η μέγιστη μετατόπιση επιτυγχάνεται στα 0.179 ms ή στα 179 μs (Διάγραμμα 4.3.3), ενώ για το μοντέλο με κωδικό S01 η μέγιστη μετατόπιση επιτυγχάνεται στα 0.175 ms ή στα 175 μs (Διάγραμμα 4.3.4).

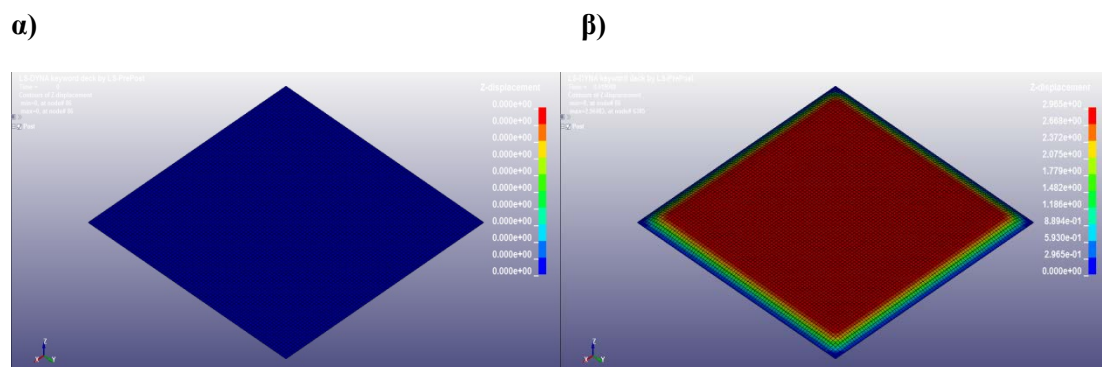


Διάγραμμα 4.3.3: Διάγραμμα επίτευξης μέγιστης μετατόπισης κεντρικού κόμβου για το πείραμα S56, με χρόνο κορυφής 0.179 ms



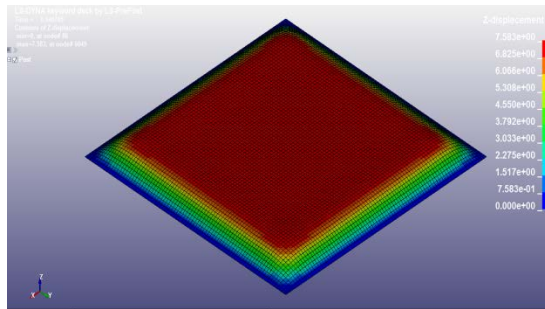
Διάγραμμα 4.3.4: Διάγραμμα επίτευξης μέγιστης μετατόπισης κεντρικού κόμβου για το πείραμα S01, με χρόνο κορυφής 0.175 ms

Στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 4.3.1: Εξέλιξη παραμόρφωσης του ελάσματος. α) για 0μs, β) για 20μs, γ) για 40μs, δ) για 60μs, ε) για 80μs, στ) για 100μs, ζ) για 120μs, η) για 140μs, θ) για 160μs, ι) για 175μs, κ) τελική μορφή για 1000μs) παρουσιάζεται η εξέλιξη της παραμόρφωσης του ελάσματος. Βλέπουμε ότι η παραμόρφωση ξεκινά από την περιοχή των πλευρών του ελάσματος και συνεχίζεται προς το κέντρο. Αυτό φαίνεται από το γεγονός ότι αρχικά όλο το έλασμα, εκτός από τις πλευρές που στηρίζονται με πάκτωση, μετατοπίζεται προς τον άξονα του πάχους (δηλ. τον κάθετο άξονα) της, ενώ στη συνέχεια μετατοπίζονται όλο και λιγότερες περιοχές του με τελευταία την κεντρική περιοχή. Οι εικόνες παρουσιάζουν τις μετατοπίσεις των κόμβων σε άξονα κάθετο (z-άξονα) στο έλασμα και προέρχονται από το μοντέλο S01.

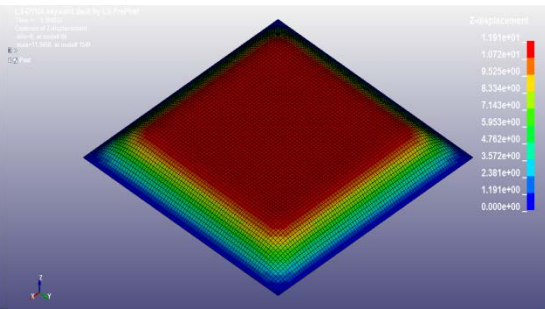


Αριθμητική Προσομοίωση Σφυρόκρουσης Ελασμάτων
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

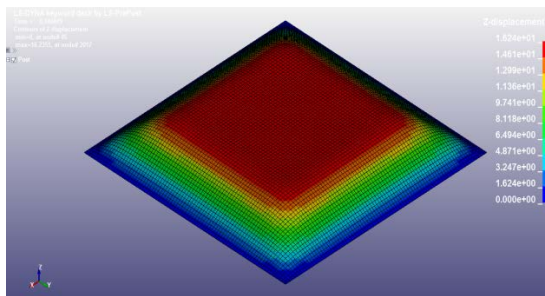
γ)



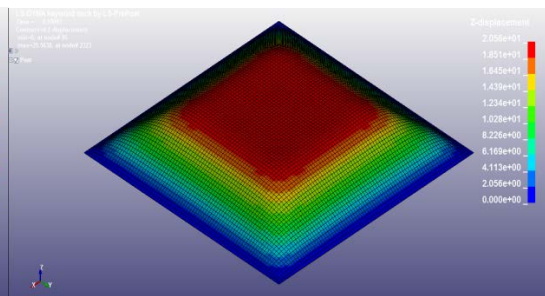
δ)



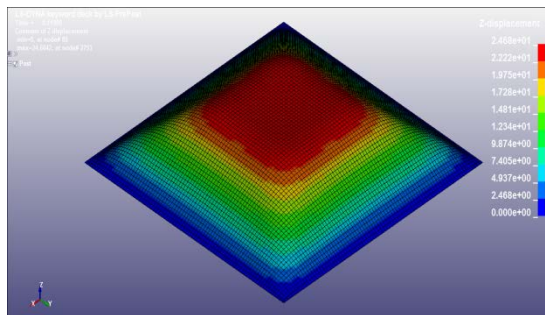
ε)



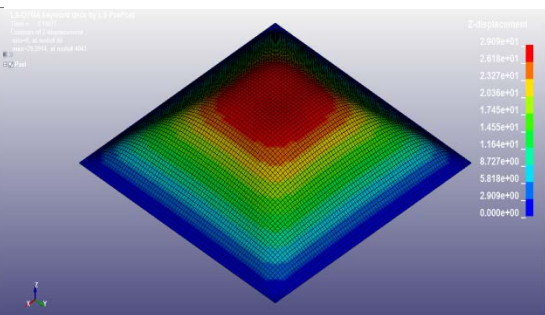
στ)



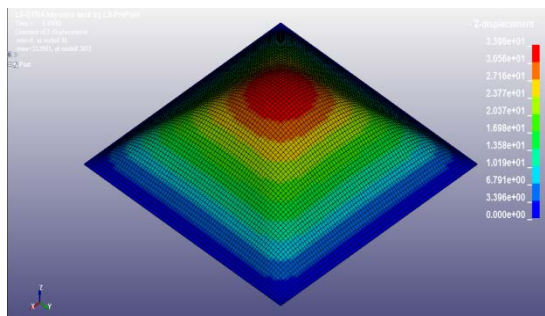
ζ)



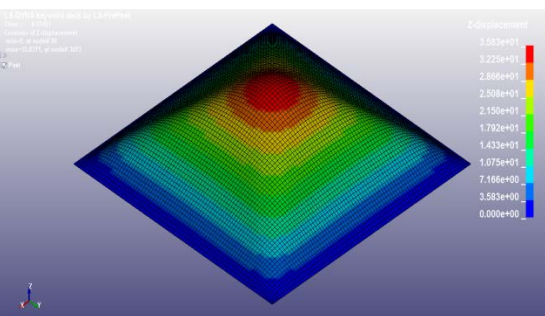
η)



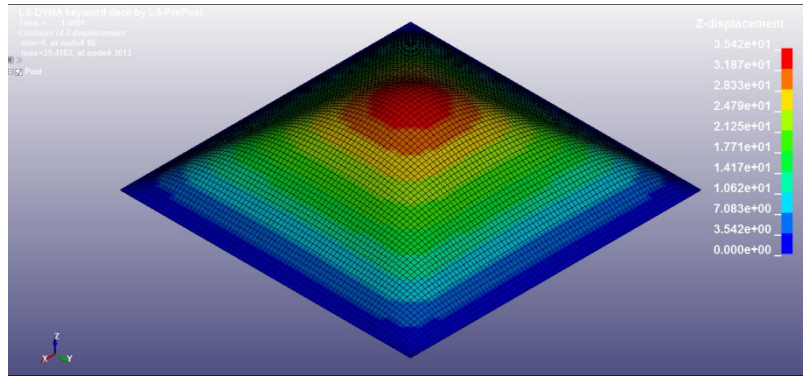
θ)



ι)



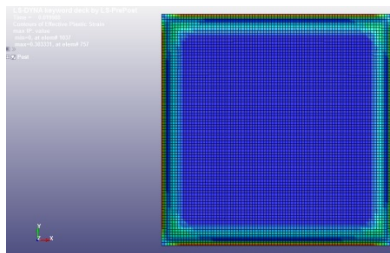
κ)



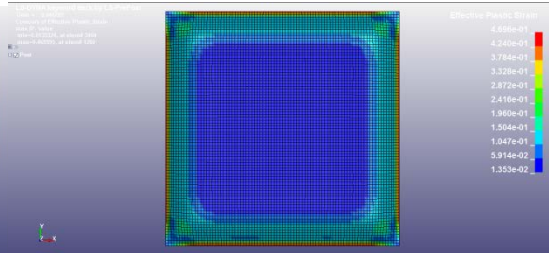
Εικόνα 4.3.1: Εξέλιξη παραμόρφωσης του ελάσματος. α) για 0μs, β) για 20μs, γ) για 40μs, δ) για 60μs, ε) για 80μs, στ) για 100μs, ζ) για 120μs, η) για 140μs, θ) για 160μs, ι) για 175μs, κ) τελική μορφή για 1000μs

Στη συνέχεια, παρατίθενται εικόνες (Εικόνα 4.3.2: Πλαστική παραμόρφωση ελάσματος για διάφορες χρονικές στιγμές α) για 20μs, β) για 40μs, γ) για 60μs, δ) για 80μs, ε) για 100μs, στ) για 120μs, ζ) για 140μs, η) για 160μs, θ) για 175μs και ι) για 1000μs) οι οποίες αποτυπώνουν την πλαστική παραμόρφωση του ελάσματος του πειράματος με κωδικό S01.

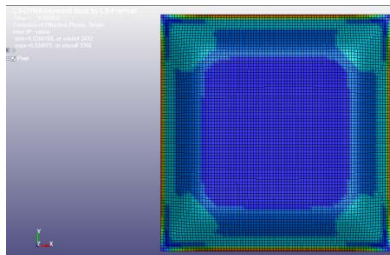
α)



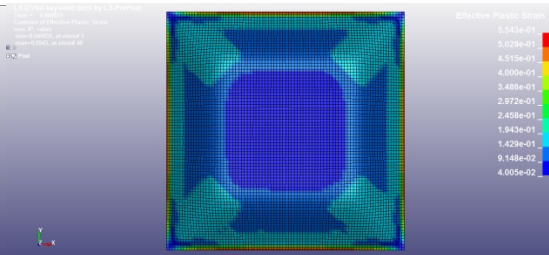
β)

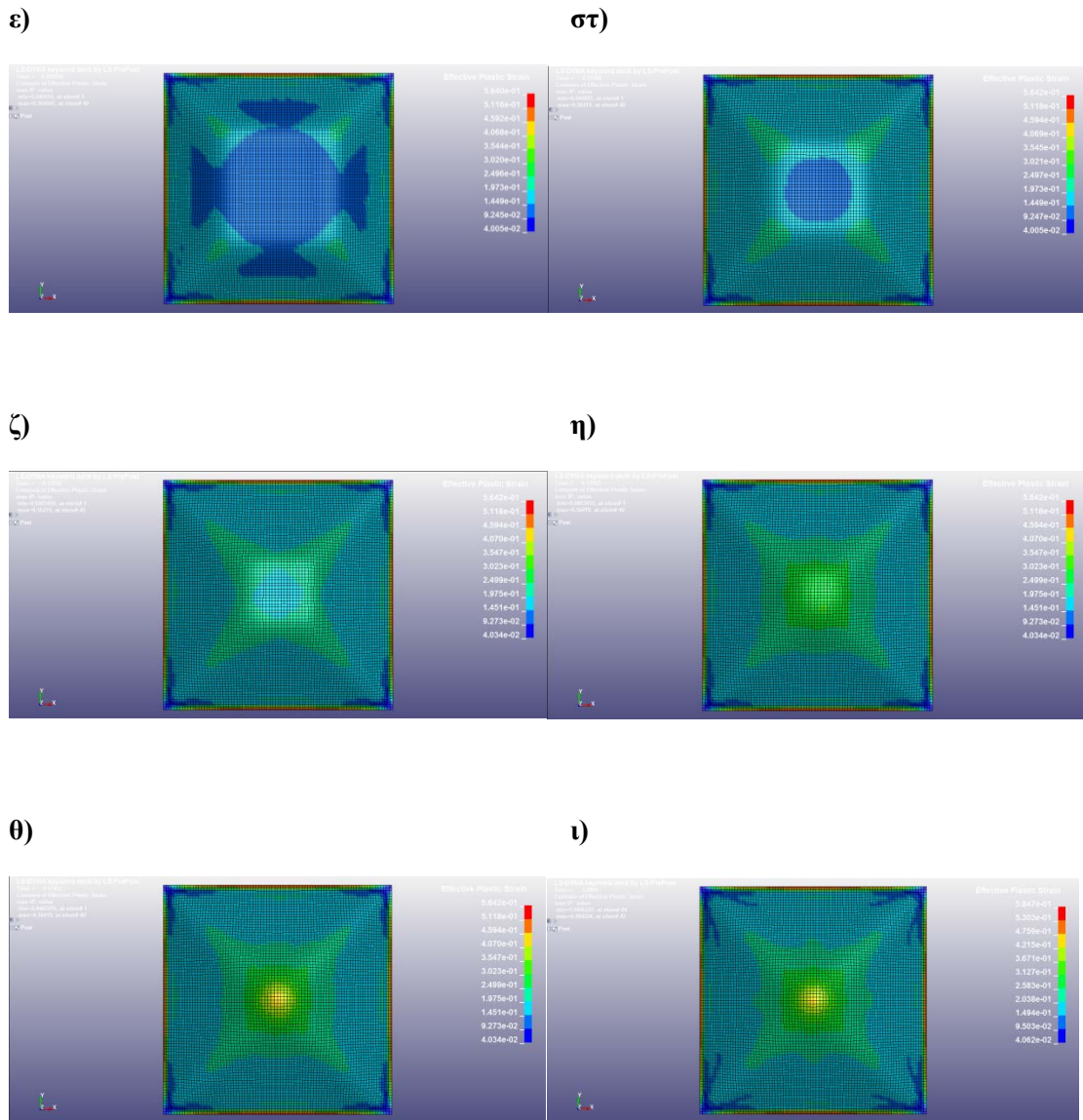


γ)



δ)





Εικόνα 4.3.2: Πλαστική παραμόρφωση ελάσματος για διάφορες χρονικές στιγμές α) για 20 μ s, β) για 40 μ s, γ) για 60 μ s, δ) για 80 μ s, ε) για 100 μ s, στ) για 120 μ s, ζ) για 140 μ s, η) για 160 μ s, θ) για 175 μ s και ι) για 1000 μ s

Εδώ παρατηρούμε ότι η μέγιστη παραμόρφωση εμφανίζεται στα μεσαία τμήματα των ελασμάτων. Συνεπώς σε υψηλότερη φόρτιση μπορούμε να οδηγηθούμε σε αστοχία του υλικού, η οποία θα ξεκινήσει από τις περιοχές αυτές.

4.3.1 Σύγκριση με πειραματικά δεδομένα

Παρατηρούμε βάσει των παρακάτω, ότι τα αποτελέσματά της αριθμητικής ανάλυσης προσεγγίζουν σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό τα πειραματικά, γεγονός που επιβεβαιώνει τις επιλογές μας κατά τον καθορισμό των παραμέτρων του μοντέλου και των δεδομένων του.

Πιο συγκεκριμένα στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής διαδικασίας σε σύγκριση με αυτά της πειραματικής για το πείραμα S56 (Πίνακας 4.3.1.1) και S01 (Πίνακας 4.3.1.2) αντίστοιχα.

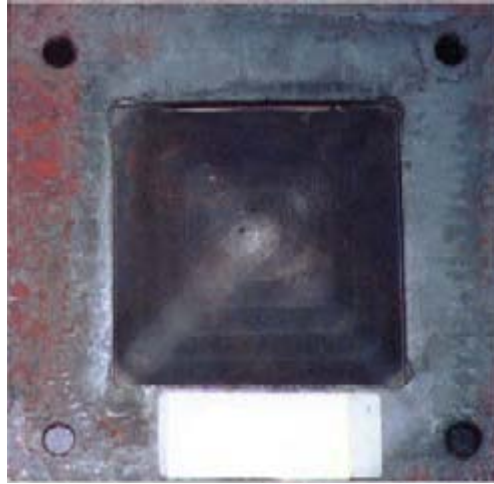
Πίνακας 4.3.1.1: Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων μεταξύ του πειράματος με κωδικό S56 και του LS-DYNA

	Σύγκριση LS-DYNA (84x84) με Πειραματικό (S56)	
	Πείραμα	LS-DYNA
Μόνιμη	25.54	26.58
Μέγιστη	-	27.11
Απόκλιση από πείραμα	-	4.07%

Πίνακας 4.3.1.2: Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων μεταξύ του πειράματος με κωδικό S01 και του LS-DYNA

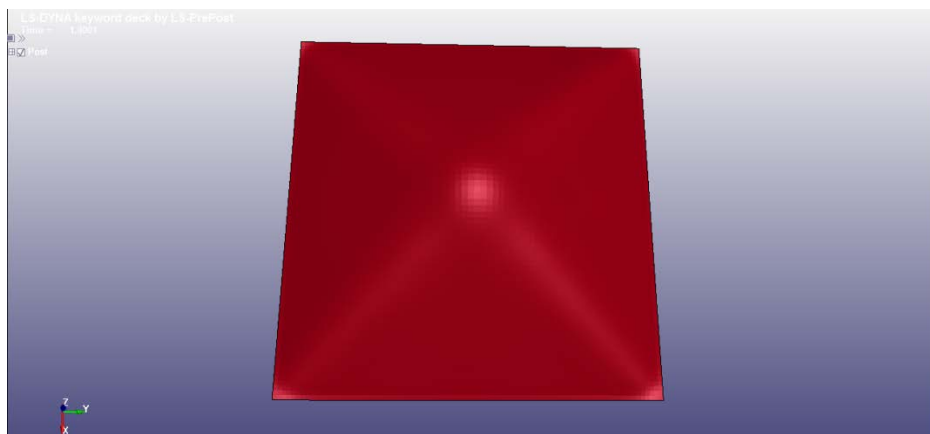
	Σύγκριση LS-DYNA (84x84) με Πειραματικό (S01)	
	Πείραμα	LS-DYNA
Μόνιμη	35.54	35.32
Μέγιστη	-	35.83
Απόκλιση από πείραμα	-	-0.34%

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η τελική μορφή του ελάσματος από τον κώδικα (Εικόνα 4.3.1.2: Αποτύπωση τελικής μορφής του ελάσματος με (γ,δ) και χωρίς πλέγμα (α,β), για διάφορες οπτικές γωνίες (S01)) για το πείραμα με κωδικό S01, σε σύγκριση με την τελική μορφή της από το πείραμα (Εικόνα 4.3.1.1: Τελική μορφή ελάσματος στο πείραμα).

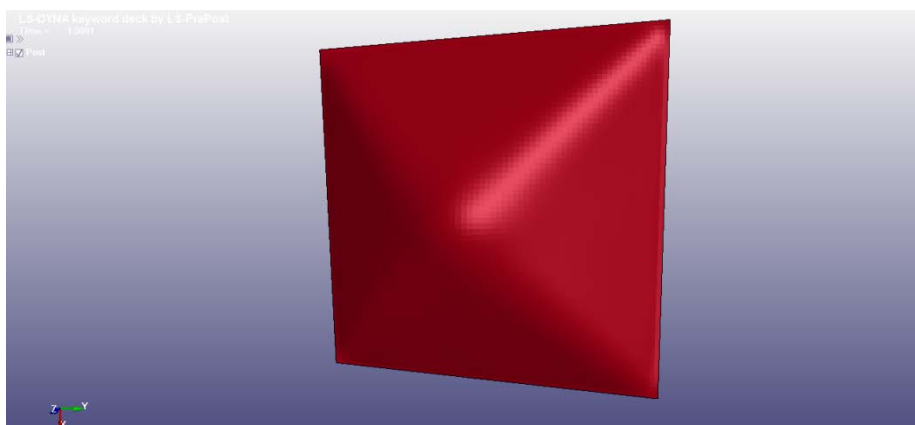


Εικόνα 4.3.1.1: Τελική μορφή ελάσματος στο πείραμα

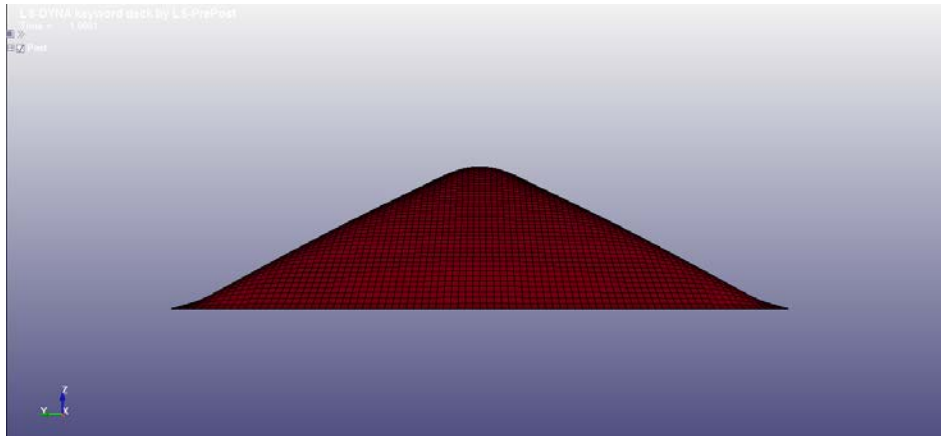
α)



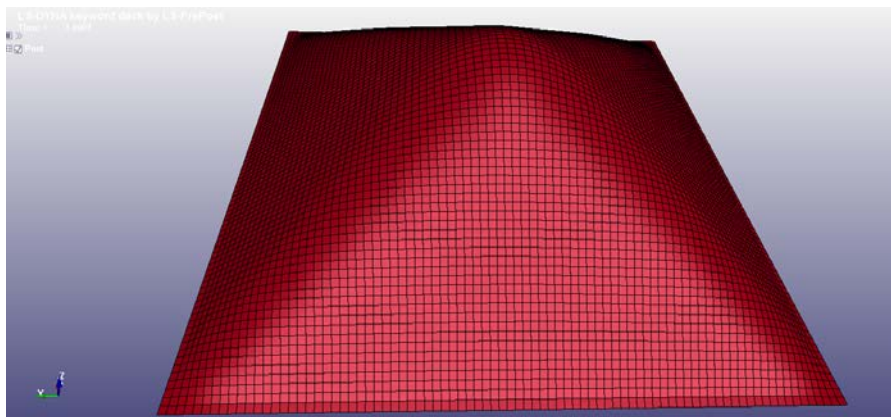
β)



γ)



δ)



Εικόνα 4.3.1.2: Αποτύπωση τελικής μορφής του ελάσματος με (γ,δ) και χωρίς πλέγμα (α,β), για διάφορες οπτικές γωνίες (S01)

Επίσης, αν κάποιος ανατρέξει στην πειραματική διαδικασία [17], θα παρατηρήσει ότι η αστοχία επέρχεται πρώτα στις περιοχές αυτές που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη υποενότητα, δηλαδή στα μεσαία τμήματα των ελασμάτων. Ωστόσο εμείς στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, δεν έχουμε εφαρμόσει τέτοιου είδους φορτία τα οποία επιφέρουν τέτοια αποτελέσματα.

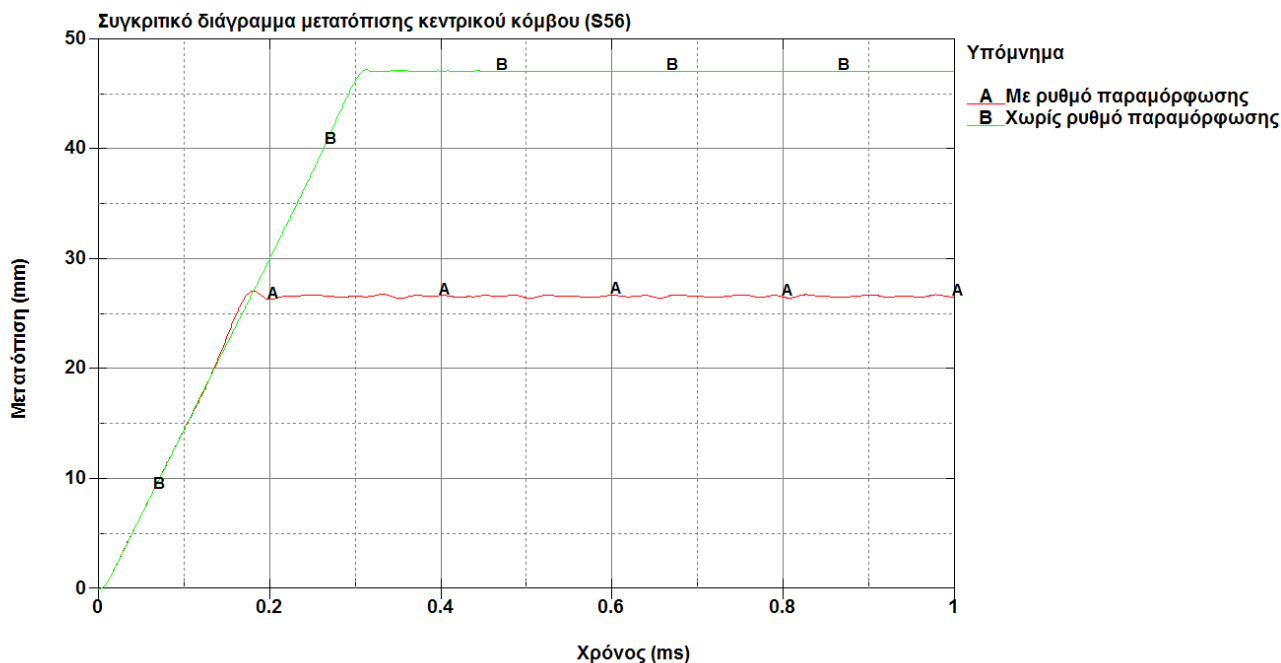
Επαναλαμβάνουμε λοιπόν, ότι η επιλογή των παραμέτρων και των δεδομένων μας ήταν επιτυχής, βάσει των αποτελεσμάτων της αριθμητικής ανάλυσης. Πάνω σε αυτή θα βασιστούμε για όποια άλλη μελέτη ακολουθήσει.

4.3.2 Επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης

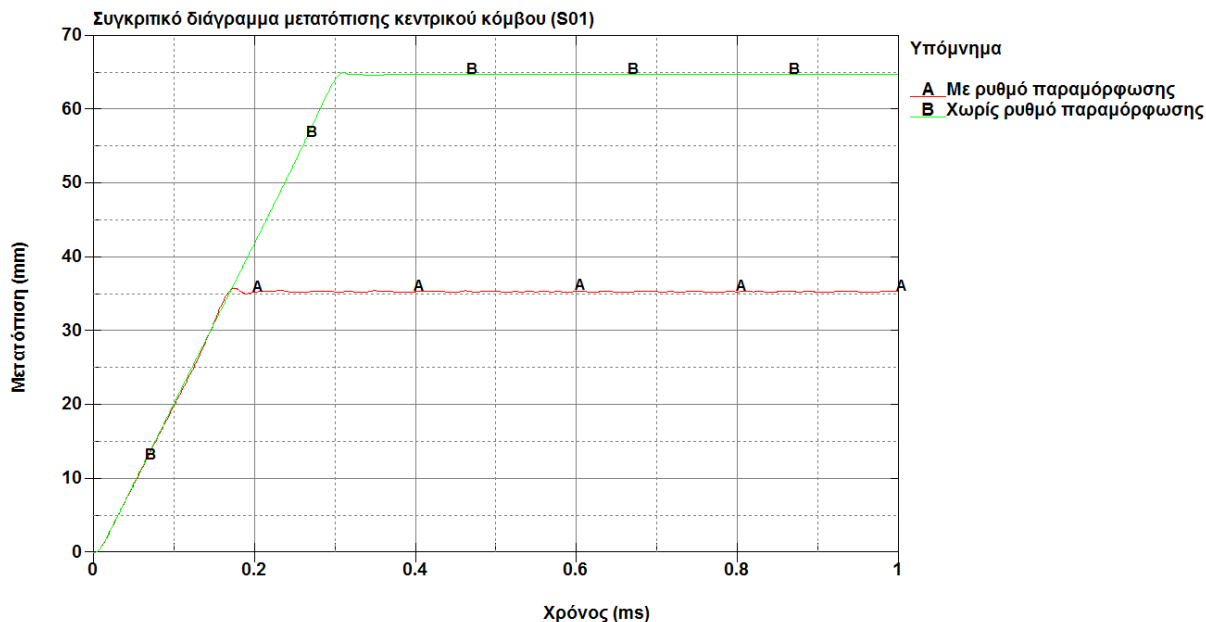
Στο σημείο αυτό, θα εξετάσουμε τη σημασία του ρυθμού παραμόρφωσης και τις διαφορές που επιφέρει στα αποτελέσματα η παράλειψη του.

Νωρίτερα στην εισαγωγή εξηγήθηκε τι είναι ο ρυθμός παραμόρφωσης και για ποιο λόγο πρέπει να ληφθεί υπόψιν. Έχοντας επιλέξει λοιπόν το συγκεκριμένο υλικό (*MAT_24) μας παρέχεται η δυνατότητα καθορισμού των παραμέτρων C και p του μοντέλου του Cowper – Symonds όπως έχει αναφερθεί νωρίτερα.

Έχοντας διατηρήσει σταθερά όλα τα άλλα χαρακτηριστικά του μετάλλου εντός του κώδικα, τα αποτελέσματα που προκύπτουν με και χωρίς την επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης (strain rate effect) παρατίθενται στα παρακάτω συγκριτικά διαγράμματα μετατόπισης κεντρικού κόμβου για το πείραμα με κωδικό S56 (Διάγραμμα 4.3.2.1) και S01 (Διάγραμμα 4.3.2.2) αντίστοιχα.



Διάγραμμα 4.3.2.1: Συγκριτικό διάγραμμα μετατόπισης κεντρικού κόμβου για το πείραμα με κωδικό S56, με κόκκινο χρώμα είναι με και με πράσινο χρώμα είναι χωρίς ρυθμό παραμόρφωσης



Διάγραμμα 4.3.2.2: Συγκριτικό διάγραμμα μετατόπισης κεντρικού κόμβου για το πείραμα με κωδικό S01, με κόκκινο χρώμα είναι με και με πράσινο χρώμα είναι χωρίς ρυθμό παραμόρφωσης

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε τις μεγάλες διαφορές που προκύπτουν αν δεν πάρουμε υπόψιν το φαινόμενο του υψηλού ρυθμού παραμόρφωσης. Σε αυτήν την περίπτωση οδηγούμαστε σε υπερβολικά μεγάλες παραμορφώσεις, πολύ πιο έντονες από αυτές που προκύπτουν από την πειραματική εμπειρία.

Παρακάτω παρατίθεται ενδεικτικοί πίνακες (Πίνακας 4.3.2.1 για το S56 και Πίνακας 4.3.2.2 για το S01) όπου συγκρίνονται οι τιμές για τις δύο περιπτώσεις. Η τιμή της απόκλισης αφορά την ποσοστιαία απόκλιση της μόνιμης παραμόρφωσης.

Πίνακας 4.3.2.1: Συγκριτικός πίνακας μετατόπισης κεντρικού κόμβου με και χωρίς ρυθμό παραμόρφωσης για το πείραμα S56

Σύγκριση Με και Χωρίς Strain Rate Effect (S56)		
	Με Strain Rate	Χωρίς Strain Rate
Μόνιμη	26.58	47.11
Μέγιστη	27.11	47.28
Απόκλιση	-	77.24%

Πίνακας 4.3.2.2: Συγκριτικός πίνακας μετατόπισης κεντρικού κόμβου με και χωρίς ρυθμό παραμόρφωσης για το πείραμα S01

Σύγκριση Με και Χωρίς Strain Rate Effect (S01)		
	Με Strain Rate	Χωρίς Strain Rate
Μόνιμη	35.42	64.79
Μέγιστη	35.83	65.07
Απόκλιση	-	82.92%

Οι τιμές διαφέρουν σε πολύ μεγάλο βαθμό. Η απόκλιση της μόνιμης μετατόπισης κεντρικού κόμβου είναι 77.24% για το πείραμα με κωδικό S56 και 82.92% για το πείραμα με κωδικό S01.

4.3.3 Επίδραση διαφορετικού είδους παλμού

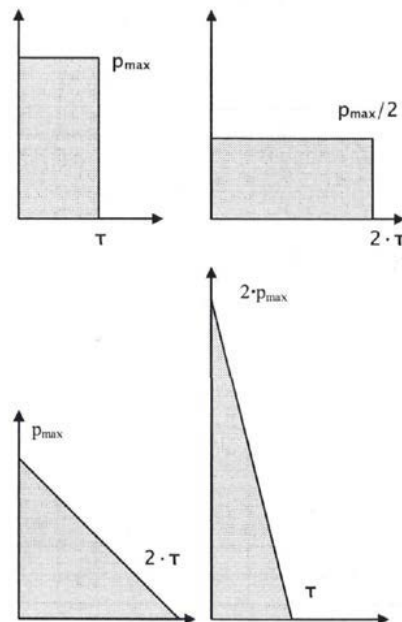
Τέλος, μας απασχολεί το ζήτημα της μοντελοποίησης της φόρτισης. Είδαμε παραπάνω ότι το μοντέλο του τετραγωνικού παλμού οδηγεί σε αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ωστόσο, όπως προαναφέρθηκε, είναι ζήτημα προς διερεύνηση το σχήμα του παλμού και κατά πόσο αυτό επιδρά. Για να το διερευνήσουμε θα εξετάσουμε τρεις εναλλακτικές μορφές του παλμού φροντίζοντας έτσι ώστε να έχουμε πάντα την ίδια τιμή του ολοκληρώματος:

$$\int_0^{\tau} P(t) dt$$

Όπου:

- $P(t)$: η ασκούμενη πίεση πάνω στο έλασμα
- τ : η συνολική διάρκεια εφαρμογής της πίεσης

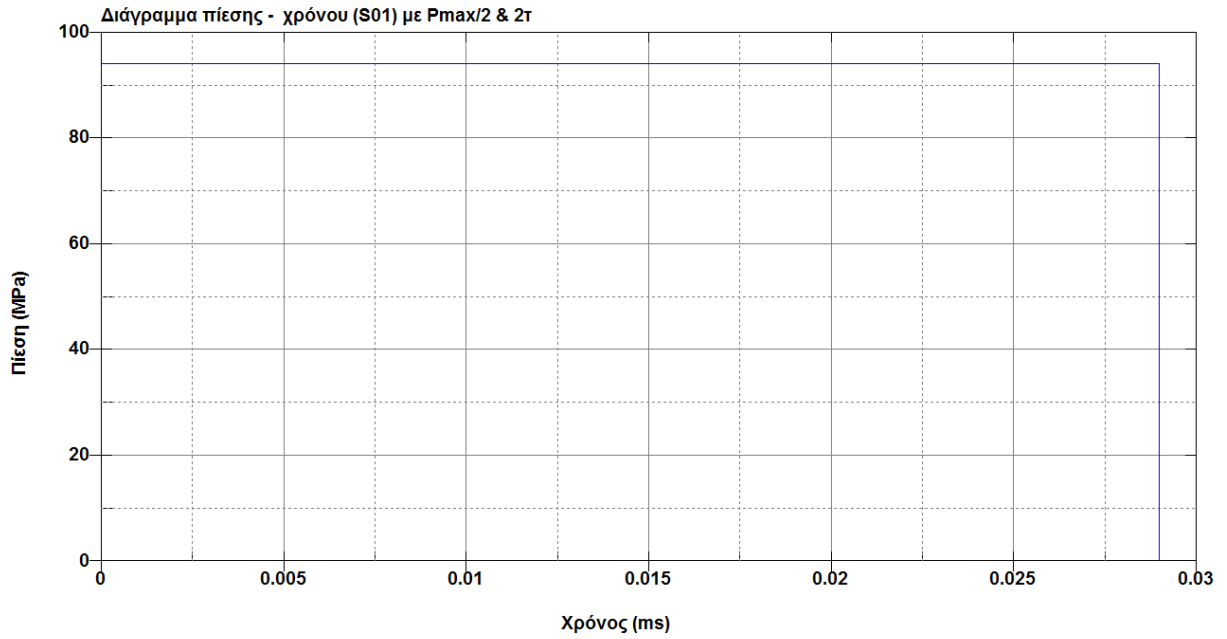
Δηλαδή, διατηρούμε σταθερό το εμβαδόν στο διάγραμμα πίεσης προς το χρόνο. Οι μορφές του παλμού που θα εξετάσουμε παρουσιάζονται στην παρακάτω Εικόνα 4.3.3.1.



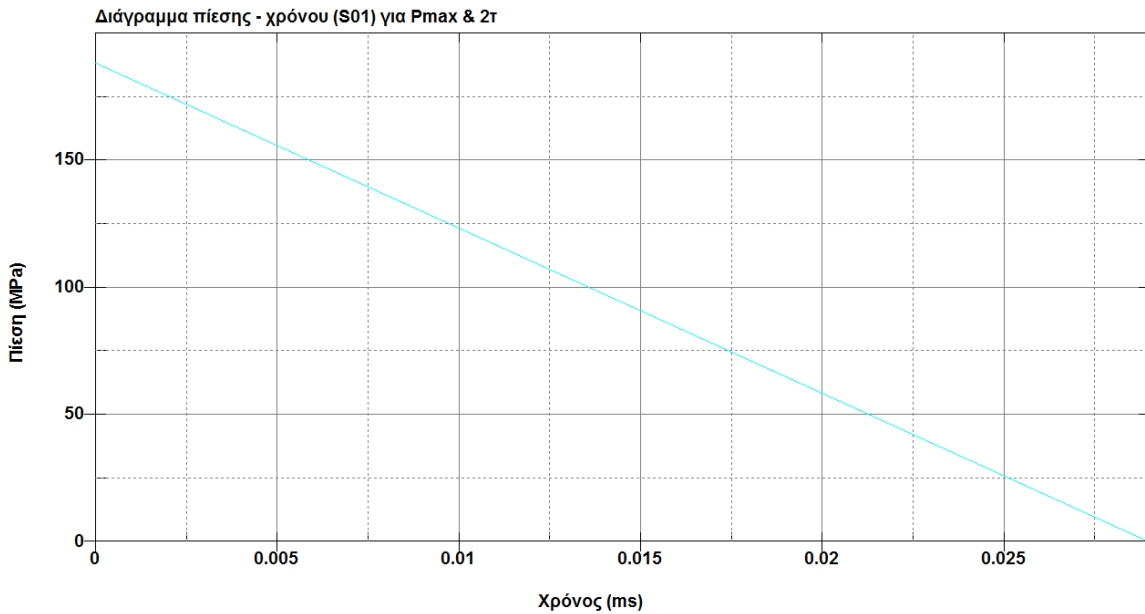
Εικόνα 4.3.3.1: Μορφές του παλμού

Έχουμε ήδη ξεκινήσει την ανάλυσή μας με την 1^η μορφή τετραγωνικού παλμού, οπότε πρέπει να διαμορφώσουμε όπως ακριβώς δείχνει η παραπάνω Εικόνα 4.3.3.1 τους υπόλοιπους παλμούς. Η συγκεκριμένη ανάλυση θα γίνει για το πείραμα με κωδικό S01.

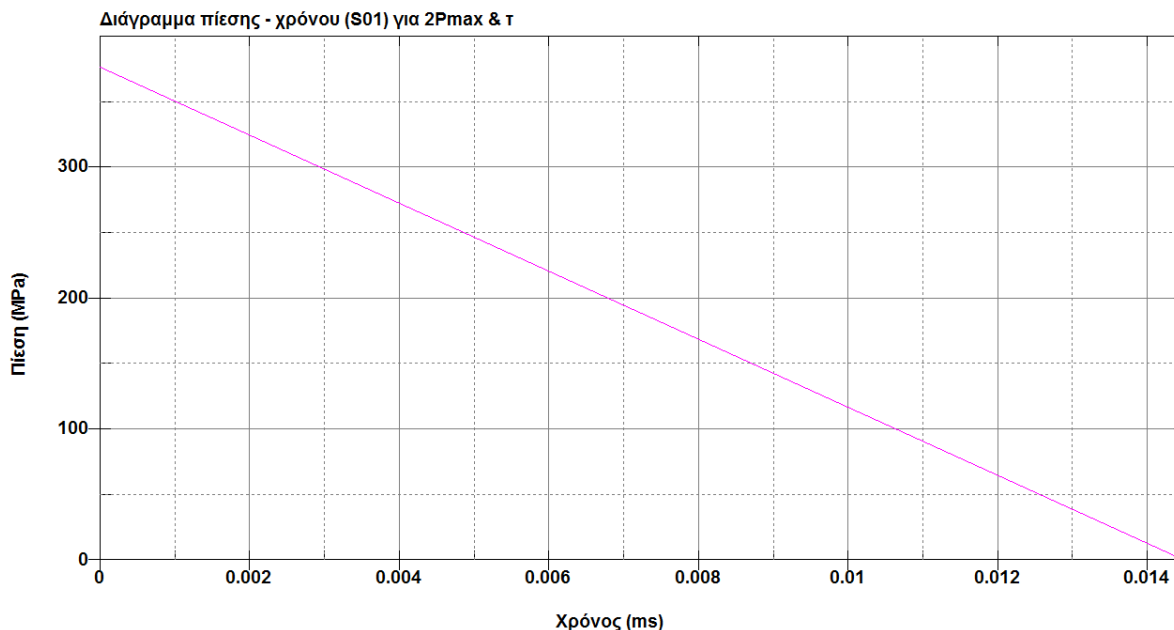
Παρακάτω φαίνονται οι 3 διαφορετικοί παλμοί εντός του κώδικα. Ο τετραγωνικός παλμός για $P_{max}/2$ και 2τ (Διάγραμμα 4.3.3.1), ο τριγωνικός παλμός για P_{max} και 2τ (Διάγραμμα 4.3.3.2) και ο τριγωνικός παλμός για $2P_{max}$ και τ (Διάγραμμα 4.3.3.3)



Διάγραμμα 4.3.3.1: Διάγραμμα πίεσης – χρόνου για το πείραμα με κωδικό S01, με $P_{max}/2$ και 2τ



Διάγραμμα 4.3.3.2: Διάγραμμα πίεσης – χρόνου για το πείραμα με κωδικό S01, με P_{max} και 2τ



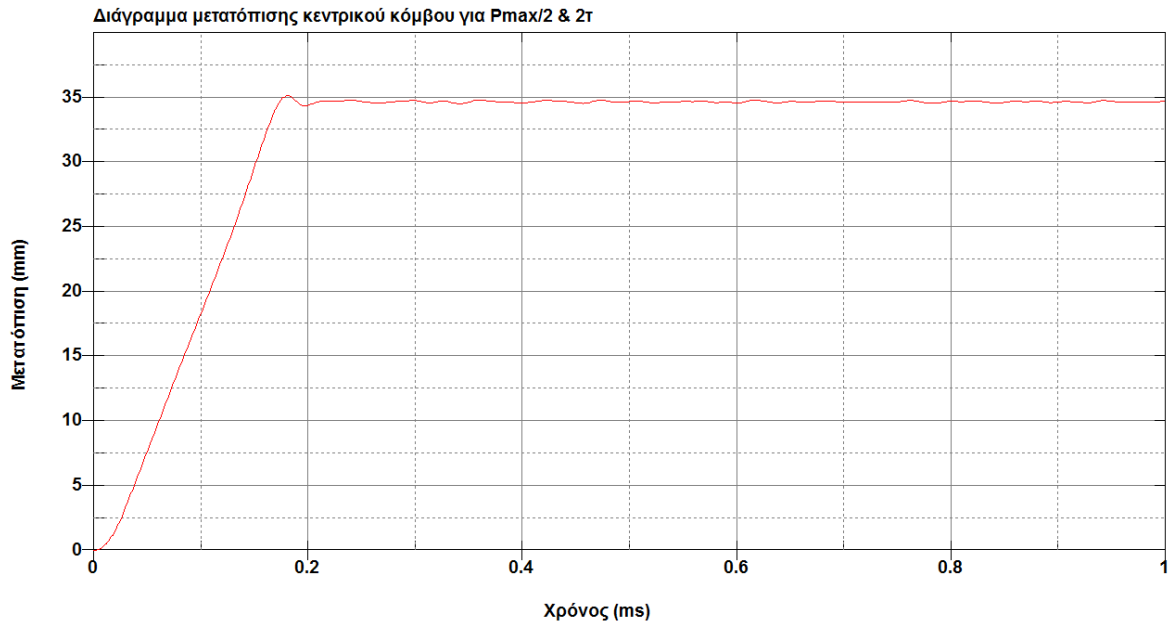
Διάγραμμα 4.3.3.3: Διάγραμμα πίεσης – χρόνου για το πείραμα με κωδικό S01, με $2P_{max}$ και τ

Στη συνέχεια, παρατίθεται ένας Πίνακας 4.3.3.1 στον οποίο συγκρίνονται τα αποτελέσματα για τους τέσσερις παλμούς και τα διαγράμματα μετατόπισης κεντρικού κόμβου όπως προκύπτουν για τον τετραγωνικό με P_{max} & τ (Διάγραμμα 4.3.3.4), για τον τετραγωνικό με $P_{max}/2$ & 2τ (Διάγραμμα 4.3.3.5), για τον τριγωνικό με P_{max} & 2τ και για τον τριγωνικό με $2P_{max}$ & τ (Διάγραμμα 4.3.3.6).

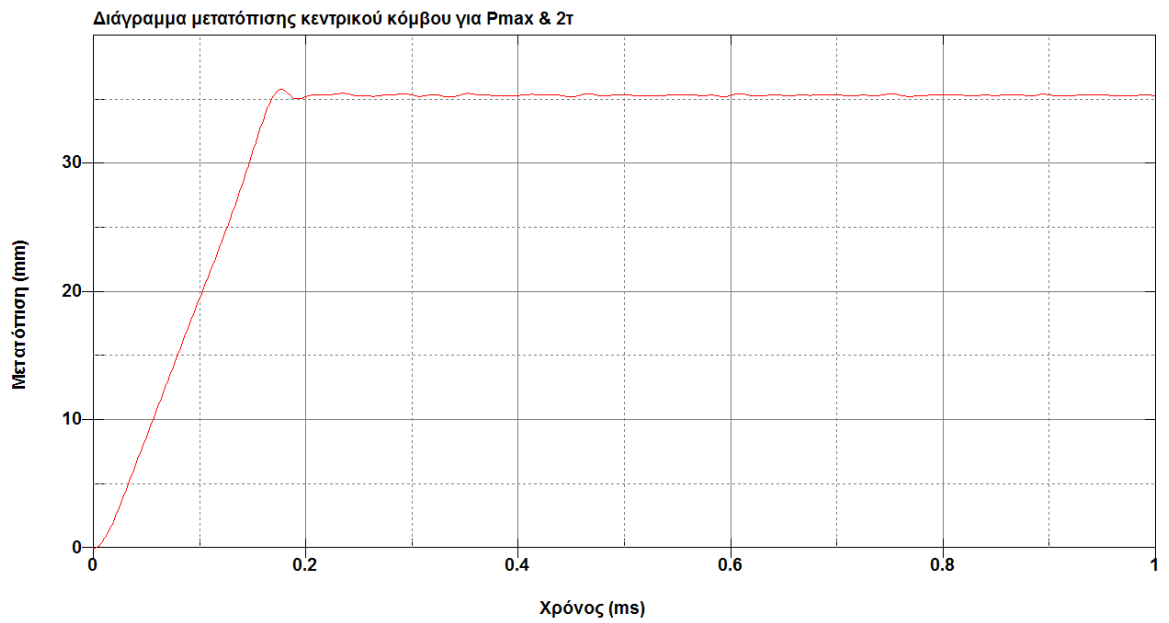
Πίνακας 4.3.3.1: Πίνακας συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων για τις μετατοπίσεις κεντρικού κόμβου του πειράματος με κωδικό S01

	S01 (84x84)			
	Τετραγωνικός (P_{max} & τ)	Τετραγωνικός ($P_{max}/2$ & 2τ)	Τριγωνικός (P_{max} & 2τ)	Τριγωνικός ($2P_{max}$ & τ)
Μόνιμη	35.42	34.63	35.34	36.06
Μέγιστη	35.83	35.24	35.82	36.49
Απόκλιση	-	-2.33%	0.23%	1.81%

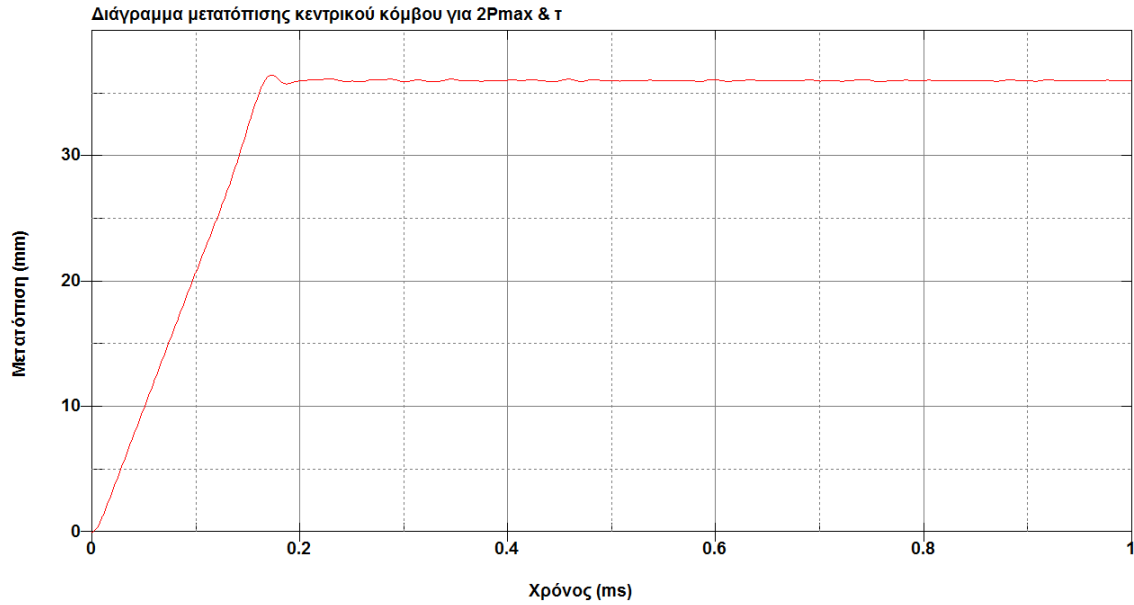
Η παραπάνω απόκλιση αφορά την ποσοστιαία απόκλιση της μόνιμης μετατόπισης από τον αρχικό τετραγωνικό παλμό.



Διάγραμμα 4.3.3.4: Διάγραμμα μετατόπισης κεντρικού κόμβου για τετραγωνικό παλμό με $P_{max}/2$ & 2τ



Διάγραμμα 4.3.3.5: Διάγραμμα μετατόπισης κεντρικού κόμβου για τριγωνικό παλμό με P_{max} & 2τ



Διάγραμμα 4.3.3.6: Διάγραμμα μετατόπισης κεντρικού κόμβου για τριγωνικό παλμό με $2P_{max}$ & τ

Ενδεικτικά παρατίθεται και ένας συγκριτικός πίνακας τιμών που αφορά το πείραμα με κωδικό S56. Πάλι στο συγκεκριμένο πίνακα η απόκλιση αφορά την ποσοστιαία απόκλιση της μόνιμης μετατόπισης σε σχέση με τον αρχικό τετραγωνικό παλμό.

Πίνακας 4.3.3.2: Πίνακας συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων για τις μετατοπίσεις κεντρικού κόμβου του πειράματος με κωδικό S56

	S56 (84x84)			
	Τετραγωνικός (p_{max} & t)	Τετραγωνικός ($p_{max}/2$ & $2t$)	Τριγωνικός (p_{max} & $2t$)	Τριγωνικός ($2p_{max}$ & t)
Μόνιμη	26.58	26.25	26.64	27.16
Μέγιστη	27.11	26.74	27.09	27.59
Απόκλιση	-	-1.24%	0.23%	2.18%

Βλέπουμε από τα διαγράμματα και από τους συγκριτικούς πίνακες ότι δεν υπάρχει αξιοσημείωτη διαφορά στα αποτελέσματα, ειδικά μεταξύ του τετραγωνικού με P_{max} & τ και του τριγωνικού με P_{max} & 2τ , τα αποτελέσματα διαφέρουν μόνο κατά 0.23% για το S01 και 0.23% για το S56, ενώ σε σχέση με τα αποτελέσματα των άλλων δύο, ο 1^{ος} παλμός διαφέρει κατά ~2%. Από αυτό συμπαίρνουμε ότι για την περίπτωση του τετράγωνου ελάσματος το σχήμα του παλμού δεν επηρεάζει σημαντικά το αποτέλεσμα αρκεί να διατηρείται σταθερό το ολοκλήρωμα που έχουμε παρουσιάσει παραπάνω.

Κεφάλαιο 5 Μελέτη απόκρισης τετραγωνικών ελασμάτων με ενίσχυση σε κρουστικό φορτίο

Σε αυτό το κεφάλαιο, σαν συνέχεια του προηγούμενου, θα μελετήσουμε την απόκριση τετραγωνικών ελασμάτων με ενίσχυση, σε κρουστικά φορτία. Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από την αριθμητική ανάλυση θα συγκριθούν και πάλι με πειραματικά. Τα πειραματικά δεδομένα όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, ανήκουν στους S. Chung Kim Yuen και G. N. Nurick [17], οι οποίοι είχαν εκτελέσει μία σειρά από πειράματα σε τετραγωνικά ελάσματα (πλάκες) με και χωρίς ενίσχυση.

Η μελέτη αυτή θα λάβει χώρα, σε μία προσπάθεια προσομοίωσης των νομέων και των σταθμίδων που διαθέτουν τα πλοία στο εσωτερικό της γάστρας τους για την στήριξη των ελασμάτων αυτής. Η γάστρα των πλοίων, δεν αποτελείται μόνο από ελάσματα ενωμένα μεταξύ τους. Οι νομείς και οι σταθμίδες λειτουργούν ως στηρίγματα των ελασμάτων αυτών προστατεύοντάς τόσο τα ίδια τα ελάσματα όσο και ολόκληρο το πλοίο από τον κίνδυνο να υποστούν σοβαρές ζημιές που προκαλούνται κατά τη διάρκεια της πλεύσης του. Οι νομείς είναι χαλύβδινα δοκάρια με διατομή συνήθως σχήματος «L» ή ανεστραμμένου «T», τα οποία τοποθετούνται στις πλευρές του πλοίου κατακόρυφα από την τροπίδα μέχρι το κατάστρωμα. Οι σταθμίδες είναι χαλύβδινα δοκάρια διατομής «H» ή «T» τα οποία τοποθετούνται παράλληλα με την τροπίδα σε όλο το μήκος του πυθμένα. Ωστόσο επειδή δε διαθέτουμε πειραματικά δεδομένα για τη μοντελοποίηση των νομέων και των σταθμίδων θα βασιστούμε στα πειραματικά δεδομένα που διαθέτουμε προσπαθώντας να προσομοιάσουμε τη λειτουργία των χαλύβδινων αυτών δοκαριών

Στα πειράματα στα οποία χρησιμοποιήθηκε ενίσχυση λοιπόν, οι διαστάσεις και η διάταξη αυτών φαίνεται στην Εικόνα 4.1.1. Τα ελάσματα ήταν ίσα σε διαστάσεις με αυτά που δεν είχαν ενίσχυση, δηλαδή $126 \times 126 \text{ mm}^2$ με ονομαστικό πάχος 1.6mm.

Παρατηρούμε ότι χρησιμοποιήθηκε μονή ενίσχυση στο κέντρο (single stiffener) που χώριζε το έλασμα σε δύο ίσου εμβαδού επιφάνειες (A/2), ενίσχυση σε σχήμα σταυρού (cross stiffener) που χώριζε το έλασμα σε τέσσερις ίσου εμβαδού επιφάνειες (A/4) και ενίσχυση διπλού σταυρού (double cross stiffener) που χώριζε το έλασμα σε έξι ίσου εμβαδού επιφάνειες (A/6). Επίσης σωστό θα ήταν να αναφερθεί ότι οι ενισχύσεις που επιλέχθηκαν για τη δική μας ανάλυση, ήταν αυτές με διαστάσεις 3x3 και 3x7 δηλαδή 3 πλάτος x 3 ύψος και 3πλάτος x 7 ύψος με μονάδες μέτρησης πάντα σε mm. Ο λόγος που επιλέχθηκαν αυτές οι διαστάσεις είναι η παρουσία τους και στα τρία είδη είδη ενισχύσεων.

5.1 Μοντελοποίηση ελασμάτων με ενίσχυση, παλμού και επιλογή πλέγματος

Στη συγκεκριμένη υποενότητα, θα αναφερθούν οι παράμετροι και τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη μοντελοποίηση των ελασμάτων με ενίσχυση.

Πρώτα και κύρια, ξανατονίζεται η σημασία της διατήρησης των ίδιων μονάδων μέτρησης με αυτές που είχαν επιλεγεί σε προηγούμενη υποενότητα (3.1 Μονάδες μέτρησης).

- **Επιλογή υλικού και τύπος στοιχείου**

Όσον αφορά την επιλογή του υλικού, αφού από τη βιβλιογραφία είναι ξεκάθαρο ότι οι ενισχύσεις προήλθαν από το ίδιο υλικό με το υπόλοιπο έλασμα, διατηρούμε την ίδια μοντελοποίηση και για το έλασμα και για τις ενισχύσεις όπως αναλύθηκε στην υποενότητα 3.2 *Επιλογή των στοιχείων του μοντέλου για επίλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων*.

Συνεχίζοντας, κατά την επιλογή του τύπου στοιχείου έγιναν δύο προσπάθειες. Η μία απέφερε επιθυμητά αποτελέσματα, ενώ η άλλη όχι.

Για αρχή, είχε επιλεγεί ως στοιχείο μοντελοποίησης της ενίσχυσης το στερεό (solid element). Η επιλογή αυτή έγινε επειδή οι ενισχύσεις είχαν τη μία διάσταση εκ των τριών πολύ μεγαλύτερη και αυτή ήταν το μήκος. Το οποίο είτε κάθετα είτε οριζόντια ήταν ίσο με 126mm². Εφόσον οι άλλες δύο διαστάσεις (πλάτος και ύψος) ήταν συγκρίσιμες επιλέχθηκε ο παραπάνω τύπος στοιχείου για τη μοντελοποίηση. Ωστόσο τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης μοντελοποίησης δεν ήταν τα επιθυμητά, καθώς όχι μόνο είχαν τεράστια απόκλιση από τα πειραματικά, αλλά δεν είχαν και καμία σχέση με το είδος της παραμόρφωσης. Πιο συγκεκριμένα, οι στερεές (solid) ενισχύσεις πάνω στο κελυφωτό (shell) έλασμα, δημιουργούσαν ένα στιβαρό μοντέλο, το οποίο δεν παραμορφωνόταν πλαστικά παρά μόνο ελαστικά.

Για τον παραπάνω λόγο, επιλέχθηκε στη συνέχεια η μοντελοποίηση των ενισχύσεων με τη βοήθεια των κελυφωτών στοιχείων (shell elements). Το είδος του κελυφωτού στοιχείου είναι ακριβώς το ίδιο με αυτό που αναλύθηκε στην υποενότητα 3.2 *Επιλογή των στοιχείων του μοντέλου για επίλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων*. Η μόνη τους διαφορά, αφορά τα δεδομένα που εισήχθησαν και πιο συγκεκριμένα το πάχος, το οποίο ήταν ίσο με το πλάτος της ενίσχυσης δηλαδή ίσο με 3mm.

Όσον αφορά το έλασμα, διατηρήσαμε την ίδια μοντελοποίηση στον τύπο στοιχείου που είχε βάσει της παραπάνω υποενότητας.

Επίσης σωστό θα ήταν να αναφερθεί σε αυτό το σημείο, ότι το έλασμά μας είναι σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι πάντα παράλληλο με το επίπεδο που ορίζουν οι x-y άξονες, ενώ οι ενισχύσεις, εφόσον είναι κάθετες πάνω στο έλασμα είναι παράλληλες με το επίπεδο που ορίζουν είτε οι x-z άξονες είτε οι y-z άξονες, αναλόγως την περίπτωση.

- **Επιλογή πλέγματος**

Όπως αναφέρθηκε και στην υποενότητα 4.2 *Μοντελοποίηση παλμού & επιλογή πλέγματος*, το πλέγμα επιλέχθηκε με τέτοιο τρόπο, ώστε να διευκολυνθεί ο σχεδιασμός και δη η ευθυγράμμιση του πλέγματος του ελάσματος με αυτό της ενίσχυσης. Το τελευταίο αποτελεί βασικό παράγοντα κατά τη σχεδίαση στο περιβάλλον του *LS – DYNA*.

Λόγω γεωμετρίας καταλήξαμε ότι για τα ελάσματα με ενισχύσεις 3x3, το πλέγμα που θα χρησιμοποιούσαμε θα ήταν 84x84 (για x-y άξονες) για το έλασμα και 2x84 (για z-x άξονες ή για z-y άξονες) για τις ενισχύσεις. Η επιλογή αυτή έγινε καθώς θέλαμε να έχουμε ένα οικονομικό μοντέλο με ακρίβεια, τα στοιχεία του οποίου να είναι σε σχήμα τετραγώνου. Πιο συγκεκριμένα, θέλοντας να διαιρέσουμε το ύψος της ενίσχυσης σε 2 ίσα μέρη (δηλαδή δύο στοιχεία καθ' ύψος) προέκυπτε ότι το ύψος κάθε στοιχείου αυτής θα είναι 1.5mm ($3/2 = 1.5$ mm). Επομένως και το μήκος θα πρέπει να είναι 1.5mm αφού επιθυμούμε τετράγωνα στοιχεία. Άρα $126/1.5 = 84$ στοιχεία, κατά το μήκος της ενίσχυσης. Βάσει της ενίσχυσης λοιπόν, εφόσον πρέπει να ικανοποιήσουμε από τη μία την απαίτηση της ευθυγράμμισης των πλεγμάτων στο σημείο επαφής τους και από την άλλη τα τετράγωνα σε σχήμα στοιχεία, επιλέχθηκε το πλέγμα 84x84 για το έλασμα.

Σύμφωνα με την παραπάνω μεθοδολογία, για τα ελάσματα με ενισχύσεις 3x7, το πλέγμα που επιλέχθηκε ήταν 72x72 για το έλασμα και 4x72 για τις ενισχύσεις. Η επιλογή αυτή έγινε βάσει των ίδιων κριτηρίων, δηλαδή ένα οικονομικό μοντέλο με ακρίβεια, τα στοιχεία του οποίου να είναι σχήμα τετραγώνου. Η διαφορά που εντοπίζεται εδώ, αφορά τη διαίρεση του ύψους της ενίσχυσης σε 4 ίσα μέρη και όχι σε 2 όπως ήταν προηγουμένως. Αν διαιρούσαμε το ύψος σε 2 ίσα μέρη, αυτό θα σήμαινε ότι το ύψος κάθε στοιχείου θα ήταν 3.5mm, άρα κατ'επέκταση και το μήκος του 3.5mm (λόγω τετραγωνικών στοιχείων), άρα 36 στοιχεία κατά το μήκος της ενίσχυσης. Θα προέκυπτε λοιπόν ένα πιο οικονομικό αλλά και πιο ανακριβές μοντέλο με μέγεθος πλέγματος ελάσματος 36x36 και μέγεθος πλέγματος ενίσχυσης 2x36. Καταλήγοντας επομένως στο πλέγμα που αναφέρθηκε στην αρχή της παραγράφου, ικανοποιούμε τα κριτήρια που προαναφέρθηκαν και φυσικά την απαίτηση ευθυγράμμισης των πλεγμάτων στο σημείο επαφής.

Συνοψίζοντας, για τα ελάσματα με ενισχύσεις 3x3 το πλέγμα που χρησιμοποιείται είναι 84x84 για το έλασμα και 2x84 για την ενίσχυση με μέγεθος στοιχείου $1.5 \times 1.5 \text{mm}^2$ και για τα ελάσματα με ενισχύσεις 3x7 το πλέγμα που χρησιμοποιείται είναι 72x72 για το έλασμα και 4x72 για την ενίσχυση με μέγεθος στοιχείου $1.75 \times 1.75 \text{mm}^2$.

Στο σημείο αυτό, πρέπει να επισημανθεί το γεγονός ότι μετά τη δημιουργία των πλεγμάτων, οι κοινοί κόμβοι των στοιχείων, στο σημείο επαφής του ελάσματος με τις ενισχύσεις και στο σημείο επαφής των ενισχύσεων μεταξύ τους (ισχύει για cross stiffener και double cross stiffener), πρέπει να συγχωνευθούν (merge). Αυτή η ενέργεια είναι απαραίτητη για τη σωστή και ομαλή λειτουργία του κώδικα, πρέπει να αντιλαμβάνεται τους κόμβους μία φορά τον καθένα. Η συγχώνευση αυτή γίνεται με την εξής διαδικασία:

Γραμμή εργαλείων: FEM \Rightarrow Element Tools \Rightarrow Duplicate Nodes.

Μαρκάροντας τις επιθυμητές περιοχές, ο κώδικας εντοπίζει τους διπλούς ή τριπλούς κόμβους και εν συνεχεία τους συγχωνεύει (merge).

- **Μοντελοποίηση παλμού**

Στο σημείο αυτό θα αναφερθούμε στο πως μοντελοποιήθηκε ο παλμός στο περιβάλλον του *LS – DYNA* για την περίπτωση των ελασμάτων με ενίσχυση. Χρησιμοποιώντας τη σχέση της μέγιστης πίεσης που αναπτύσσεται και συσχετίζει τον παλμό, με την επιφάνεια του ελάσματος και την διάρκεια του, δημιουργούμε στο περιβάλλον του *LS – DYNA* μία προσομοίωση του παλμού αυτού.

Σύμφωνα πάντα με τη σχέση:

$$P = \frac{I}{A \cdot \tau}$$

Όπου:

- I : η ένταση του παλμού σε $N \cdot s$
- A : η επιφάνεια του ελάσματος
- τ : η διάρκεια του παλμού

Ακολουθείται επομένως η ίδια διαδικασία όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 4.2 *Μοντελοποίηση παλμού & επιλογή πλέγματος* που αφορά τα ελάσματα χωρίς ενίσχυση.

Απαιτείται να δοθεί προσοχή στο γεγονός ότι σύμφωνα με την πειραματική διάταξη, η οποία φαίνεται στην Εικόνα 4.1.2, ο παλμός που δημιουργείται λόγω του εκρηκτικού μηχανισμού, εφαρμόζεται ομοιόμορφα πάνω στο έλασμα. Βάσει αυτής της οπτικής εφαρμόζουμε και πάλι τον παλμό, μόνο πάνω στο έλασμα και όχι στις ενισχύσεις του.

Ωστόσο τα επιμέρους τμήματα του μοντέλου μας (έλασμα και ενισχύσεις) πρέπει να αντιμετωπισθούν σαν ενιαίο σώμα. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος αφού πρώτα ορίσουμε τα επιμέρους κομμάτια του μοντέλου μας (έλασμα και ενισχύσεις) ως ένα ενιαίο τμήμα μέσω της εντολής **SET_PART*, καταφεύγουμε στην εντολή **CONTACT* στην οποία εν συνεχεία επιλέγουμε τη λειτουργία **AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE*. Η εντολή αυτή δέχεται μόνο την εισαγωγή τμημάτων slave, όπου και επιλέγουμε το τμήμα (part) που δημιουργήσαμε, και όχι την εισαγωγή τμημάτων master. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε «βοηθήσει» τον κώδικά μας να αντιληφθεί σαν ενιαίο σώμα, το οποίο υποβάλλεται σε διάφορες φορτίσεις, τα επιμέρους τμήματα ελασμάτων και ενισχύσεων.

Τέλος πρέπει να επισημανθεί ότι τα συμπεράσματα που διεξήχθησαν στο προηγούμενο κεφάλαιο στις υποενότητες 4.3.2 *Επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης* και 4.3.3 *Επίδραση διαφορετικού είδους παλμού* ως προς τη χρήση του ρυθμού παραμόρφωσης (strain rate effect) και τη μορφή του σχήματος του παλμού θα ληφθούν στην παρούσα ενότητα ως δεδομένα, χωρίς να γίνει περαιτέρω ανάλυση ως προς τη συμβολή τους στο τελικό αποτέλεσμα.

Παρακάτω παρατίθενται πίνακες, που περιέχουν τα δεδομένα και τα αποτελέσματα για τα πειράματα που έγιναν σε ενισχυμένα ελάσματα με διαστάσεις ενισχύσεων 3x3 (Πίνακας 5.1.1) και 3x7 (Πίνακας 5.1.2) αντίστοιχα.

Πίνακας 5.1.1: Πίνακας στοιχείων και αποτελεσμάτων για τα πειράματα A17, A01, T04, T01 που αφορούν ενισχύσεις 3x3

Κωδικός πειράματος	Πάχος ελάσματος (mm)	Πλάτος ενίσχυσης (mm)	Ύψος ενίσχυσης (mm)	Ένταση παλμού ($N \cdot s$)	Διάρκεια παλμού (μs)	Μετατόπιση κέντρου (mm)
A17	1.60	3.36	2.99	34.0	14.5	26.53
A01	1.62	2.96	3.06	35.8	14.5	30.1
T04	1.59	3.10	3.00	35.9	14.5	25.92
T01	1.61	3.10	3.01	35.8	14.5	24.35

Τα πειράματα με κωδικό A17 και A01 αφορούν τα ελάσματα με μονή ενίσχυση (single stiffener), το πείραμα με κωδικό T04 αφορά τα ελάσματα με ενίσχυση σταυρό (cross stiffener) και το πείραμα με κωδικό T01 αφορά τα ελάσματα με ενίσχυση διπλού σταυρού (double cross stiffener).

Πίνακας 5.1.2: Πίνακας στοιχείων και αποτελεσμάτων για τα πειράματα A17, A01, T04, T01 που αφορούν ενισχύσεις 3x7

Κωδικός πειράματος	Πάχος ελάσματος (mm)	Πλάτος ενίσχυσης (mm)	Ύψος ενίσχυσης (mm)	Ένταση παλμού ($N \cdot s$)	Διάρκεια παλμού (μs)	Μετατόπιση κέντρου (mm)
K10	1.60	3.22	6.97	34.1	14.5	24.71
K28	1.59	3.14	6.97	39	14.5	26.66
S43	1.59	3.10	6.98	35.6	14.5	21.5
S14	1.59	3.00	7.03	44.2	14.5	26.95
T02	1.60	3.14	7.01	36.7	14.5	19.76

Τα πειράματα με κωδικό K10 και K28 αφορούν τα ελάσματα με μονή ενίσχυση (single stiffener), τα πειράματα με κωδικό S43 και S14 αφορούν τα ελάσματα με ενίσχυση σταυρό (cross stiffener) και το πείραμα με κωδικό T02 αφορά τα ελάσματα με ενίσχυση διπλού σταυρού (double cross stiffener).

5.2 Αποτελέσματα και σύγκριση με πειραματικά δεδομένα

Αρχικά πρωτού γίνει αναφορά στα αποτελέσματα, σωστό θα ήταν να τονιστεί ότι τα ελάσματα και οι ενισχύσεις κατασκευάστηκαν -εντός του κώδικα- σύμφωνα με τις ονομαστικές τους διαστάσεις, δηλαδή πάχος ελάσματος 1.6mm με διαστάσεις 126x126mm² και οι ενισχύσεις με διαστάσεις 3x3mm² και 3x7mm² (πλάτος x ύψος) και με μήκος προφανώς την πλευρά του ελάσματος (δηλαδή 126 mm). Στα πειραματικά δεδομένα υπήρχαν κάποιες αποκλίσεις από τις ονομαστικές διαστάσεις που οφείλονταν στη διαδικασία κατασκευής των δοκιμίων.

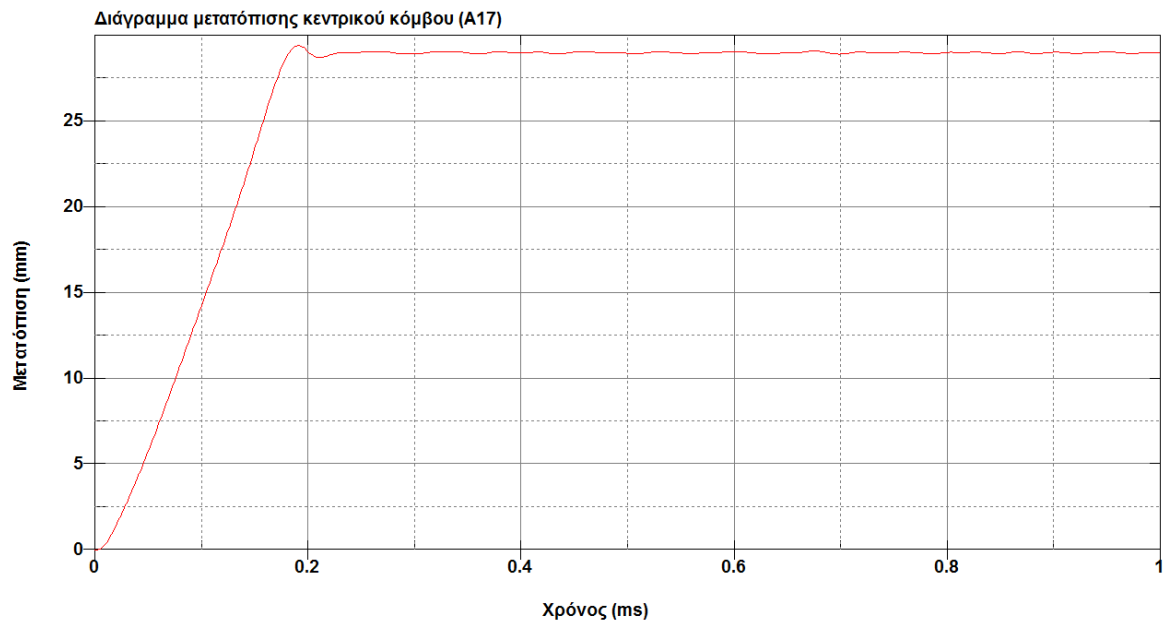
Παρακάτω θα ακολουθήσουν τα αποτελέσματα όπως προέκυψαν από τον κώδικα για τις ενισχυμένα ελάσματα (3x3 και 3x7) και παράλληλα η σύγκρισή τους με τα πειραματικά δεδομένα.

- **Αποτελέσματα ενισχυμένων ελασμάτων 3x3**

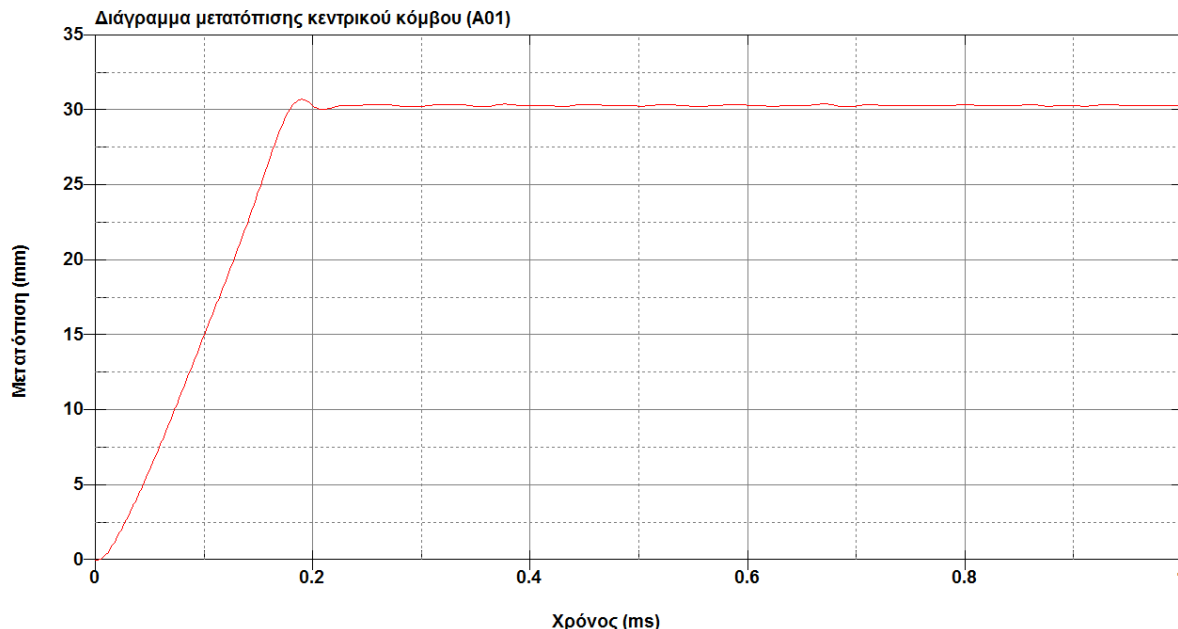
Για τα ελάσματα με ενισχύσεις διαστάσεων 3x3 (πλάτος x ύψος), βασιστήκαμε στα πειράματα με κωδικούς A17 και A01 για μονή ενίσχυση, T04 για ενίσχυση σταυρό και T01 για ενίσχυση διπλού σταυρού. Τα στοιχεία των πειραμάτων αυτών φαίνονται στον Πίνακα 5.1.1 που προηγήθηκε.

➤ Μονή ενίσχυση (Single Stiffener)

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε μορφή διαγράμματος, της μετατόπισης του κεντρικού κόμβου σε συνάρτηση με το χρόνο για τα δύο πειράματα A17 (Διάγραμμα 5.2.1) και A01 (Διάγραμμα 5.2.2) αντίστοιχα. Η μετατόπιση του κεντρικού κόμβου αφορά τον κόμβο που βρίσκεται πάνω στο έλασμα και όχι στην ενίσχυση.



Διάγραμμα 5.2.1: Διάγραμμα μετατόπισης κεντρικού κόμβου σε συνάρτηση με το χρόνο για το πείραμα με κωδικό A17



Διάγραμμα 5.2.2: Διάγραμμα μετατόπισης κεντρικού κόμβου σε συνάρτηση με το χρόνο για το πείραμα με κωδικό A01

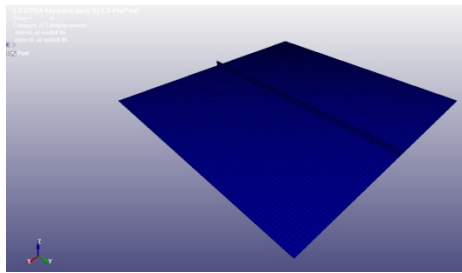
Βάσει των παραπάνω διαγραμμάτων, παρατηρούμε ότι η μέγιστη μετατόπιση δεν ταυτίζεται με την μόνιμη μετατόπιση. Για το πείραμα με κωδικό A17 η μέγιστη μετατόπιση είναι 29.44 mm και η μόνιμη μετατόπιση είναι 29.02 mm, ενώ για το πείραμα με κωδικό A01 η μέγιστη μετατόπιση είναι 30.76 mm και η μόνιμη 30.39 mm.

Επίσης, ενώ το κέντρο του ελάσματος φτάνει σε μέγιστη μετατόπιση σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, περίπου στα 0,18-0,19 ms ή στα 180-190 μ s, η ίδια συνεχίζει να ταλαντώνεται μέχρι την απόσβεση της ταλάντωσης η οποία συμβαίνει πολύ αργότερα σε σχέση με τον χρόνο που επιτυγχάνεται η μέγιστη μετατόπιση.

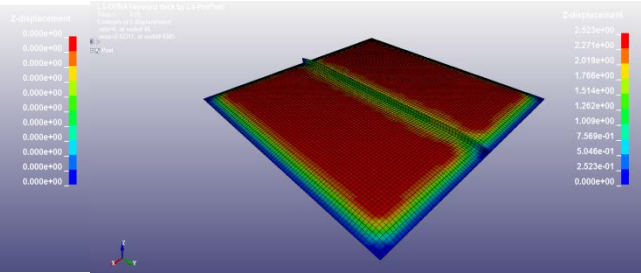
Στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 5.2.1: Εξέλιξη παραμόρφωσης του ελάσματος με μονή ενίσχυση. α) για 0 μ s, β) για 20 μ s, γ) για 40 μ s, δ) για 60 μ s, ε) για 80 μ s, στ) για 100 μ s, ζ) για 120 μ s, η) για 140 μ s, θ) για 160 μ s, ι) για 190 μ s, κ) τελική μορφή για 1000 μ s (A01)) παρουσιάζεται η εξέλιξη της παραμόρφωσης του ελάσματος. Βλέπουμε ότι η παραμόρφωση ξεκινά από την περιοχή των πλευρών του ελάσματος και συνεχίζεται προς το κέντρο δημιουργώντας δύο περιοχές μέγιστης μετατόπισης. Πιο συγκεκριμένα η περιοχή στην οποία βρίσκεται η ενίσχυση δεν παρουσιάζει στην αρχή (περίπου για τα πρώτα 80 μ s) τόσο μεγάλη μετατόπιση όσο η περιοχή γύρω από αυτή, γεγονός που είναι ευδιάκριτο από το χρώμα του ελάσματος το οποίο στη συγκεκριμένη περιοχή παραμένει κίτρινο ενώ γύρω από αυτή είναι κόκκινο. Με την πάροδο του χρόνου παρατηρούμε ότι η μέγιστη μετατόπιση επέρχεται τελικά στον κεντρικό κόμβο. Οι εικόνες παρουσιάζουν τις μετατοπίσεις των κόμβων σε άξονα κάθετο (z-άξονα) στο έλασμα και προέρχονται από το μοντέλο A01, αντίστοιχη μορφή του ελάσματος έχουμε και για το πείραμα με κωδικό A17.

Αριθμητική Προσομοίωση Σφυρόκρουσης Ελασμάτων
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

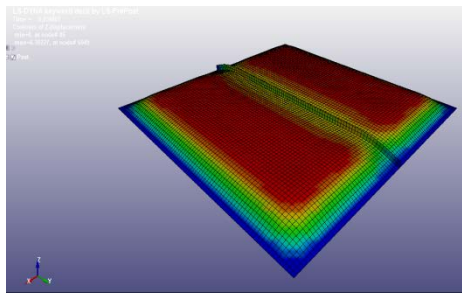
α)



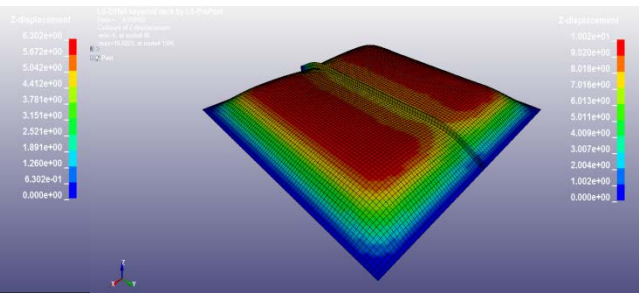
β)



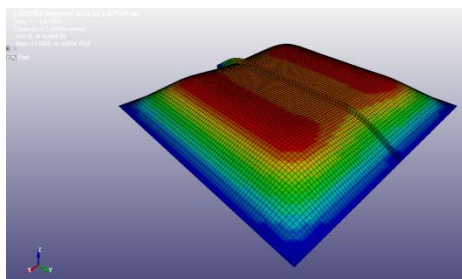
γ)



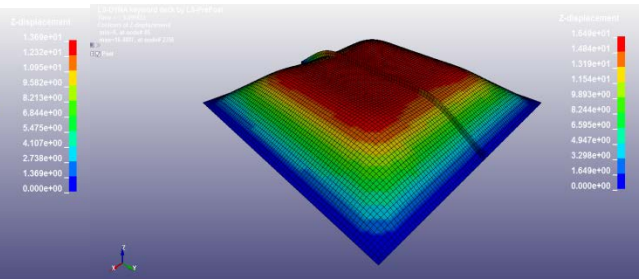
δ)



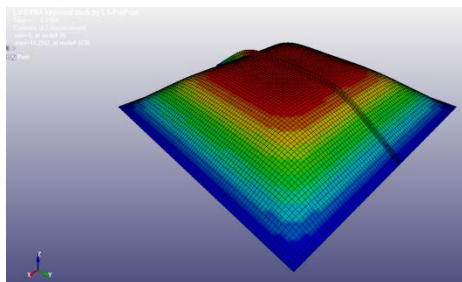
ε)



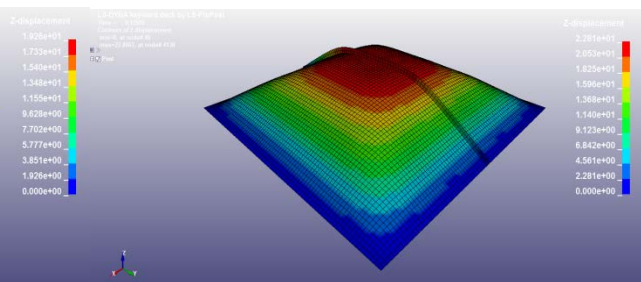
στ)



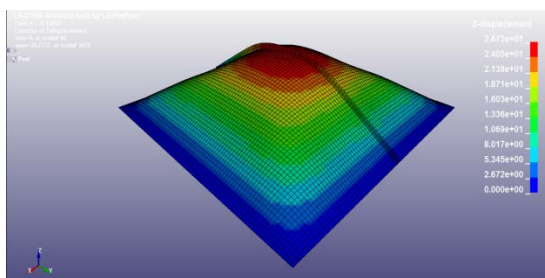
ζ)



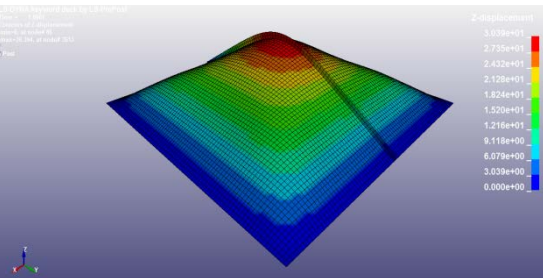
η)



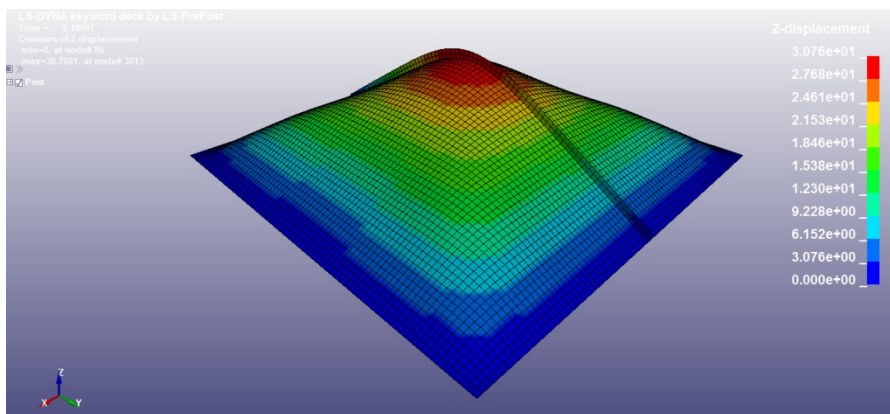
θ)



ι)



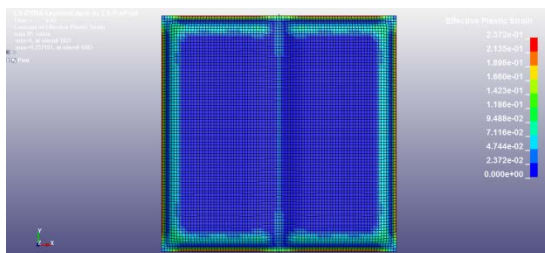
κ)



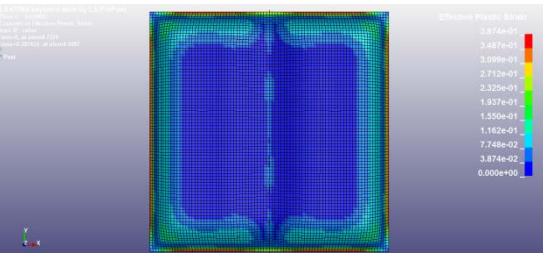
Εικόνα 5.2.1: Εξέλιξη παραμόρφωσης του ελάσματος με μονή ενίσχυση. α) για 0μs, β) για 20μs, γ) για 40μs, δ) για 60μs, ε) για 80μs, στ) για 100μs, ζ) για 120μs, η) για 140μs, θ) για 160μs, ι) για 190μs, κ) τελική μορφή για 1000μs (A01)

Στη συνέχεια, παρατίθενται εικόνες (Εικόνα 5.2.2: Πλαστική παραμόρφωση ελάσματος με μονή ενίσχυση για διάφορες χρονικές στιγμές α) για 20μs, β) για 40μs, γ) για 60μs, δ) για 80μs, ε) για 100μs, στ) για 120μs, ζ) για 140μs, η) για 160μs, θ) για 190μs και ι,κ) για 1000μs (A01)) οι οποίες αποτυπώνουν την πλαστική παραμόρφωση του ελάσματος του πειράματος με κωδικό A01. Αντίστοιχα θα είναι και στο πείραμα με κωδικό A17.

α)

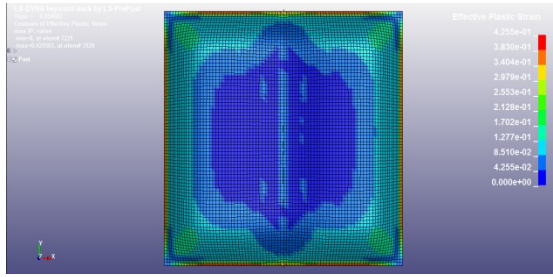


β)

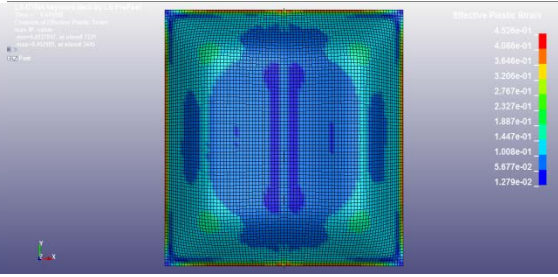


Αριθμητική Προσομοίωση Σφυρόκρουσης Ελασμάτων
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

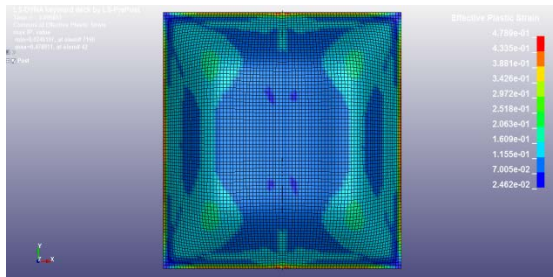
γ)



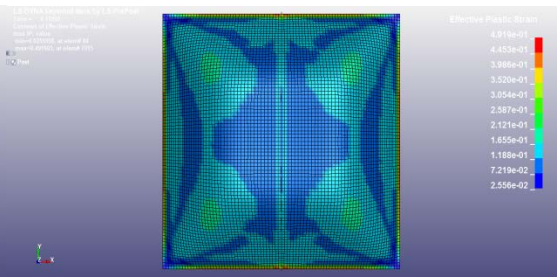
δ)



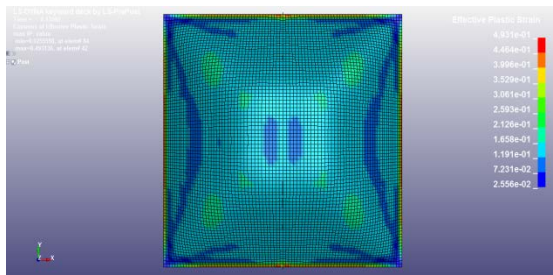
ε)



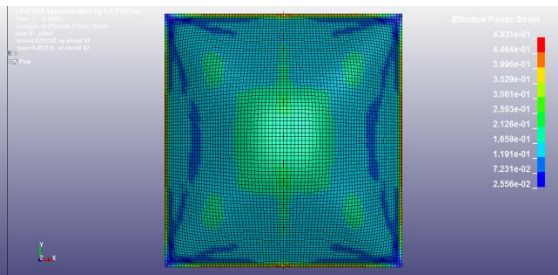
στ)



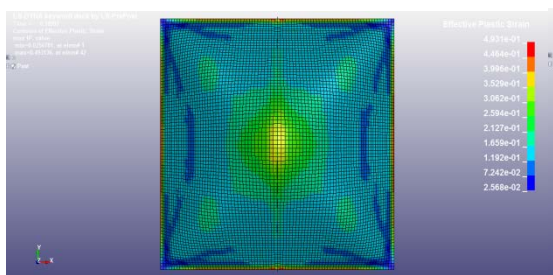
ζ)



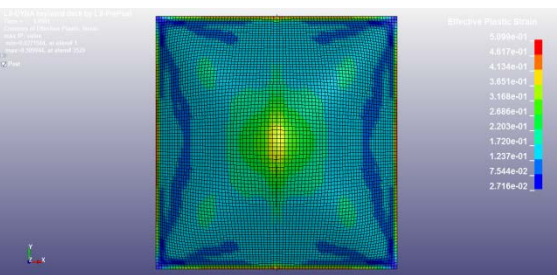
η)



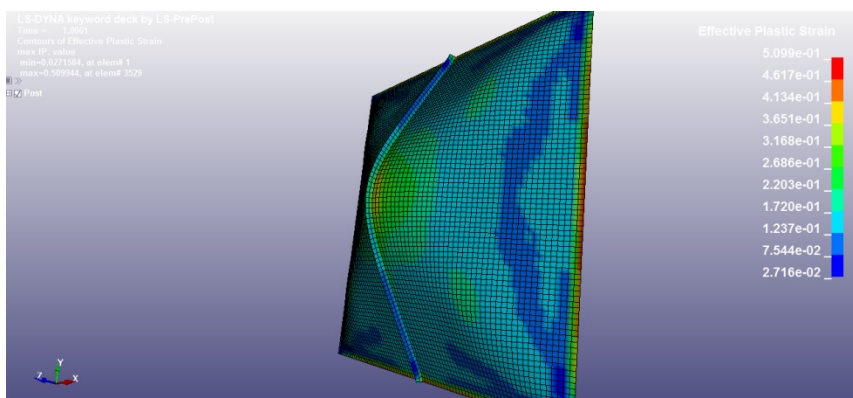
θ)



ι)

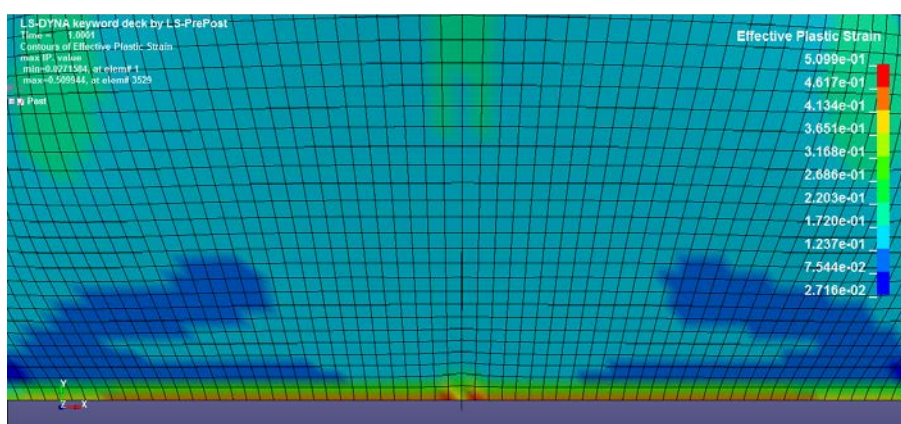


κ)



Εικόνα 5.2.2: Πλαστική παραμόρφωση ελάσματος με μονή ενίσχυση για διάφορες χρονικές στιγμές α) για 20μs, β) για 40μs, γ) για 60μs, δ) για 80μs, ε) για 100μs, στ) για 120μs, ζ) για 140μs, η) για 160μs, θ) για 190μs και ι,κ) για 1000μs (A01)

Εδώ παρατηρούμε ότι η μέγιστη παραμόρφωση εμφανίζεται και πάλι στα μεσαία τμήματα των ελασμάτων. Ωστόσο στις πλευρές όπου υπάρχει η ενίσχυση, δημιουργείται στην αρχή μία περιοχή γύρω από την ενίσχυση η οποία χωρίζει σε δύο μέρη τη μέγιστη παραμόρφωση. Στην περιοχή αυτή εμφανίζονται λίγο μεγαλύτερες τιμές παραμόρφωσης (Εικόνα 5.2.3) σε σχέση με την υπόλοιπη πλευρά, γεγονός που συμφωνεί και με τα πειραματικά αποτελέσματα [17]. Παράλληλα παρατηρούμε ότι στο τελικό αποτέλεσμα, υπάρχει ένα πιο έντονο φαινόμενο μόνιμης παραμόρφωσης, στο κέντρο γύρω από την ενίσχυση, σε σχέση με το έλασμα χωρίς ενίσχυση. Τέλος η ίδια η ενίσχυση δεν παρουσιάζει κάποια χαρακτηριστικά μόνιμης παραμόρφωση εκτός από κάποια σημεία στο μέσο και στα άκρα της, τα οποία και πάλι δεν είναι τόσο έντονα.



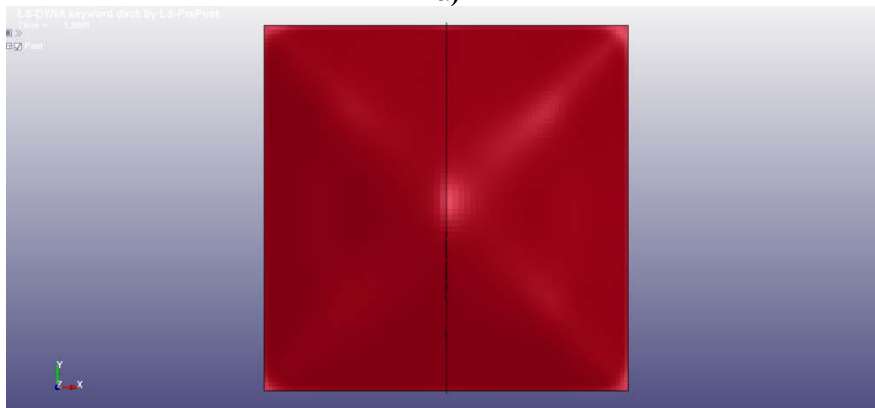
Εικόνα 5.2.3: Μεγέθυνση στην περιοχή της πλευράς του ελάσματος γύρω από την ενίσχυση

Παρακάτω παρουσιάζονται μερικές εικόνες, στις οποίες φαίνεται η ομοιότητα στο αποτέλεσμα μεταξύ του κώδικα (Εικόνα 5.2.5: Αποτύπωση τελικής μορφής του ελάσματος με γ,δ) και χωρίς πλέγμα (α,β), για διάφορες οπτικές γωνίες (A01)) και του πειράματος (Εικόνα 5.2.4: Τελική μορφή ελάσματος με μονή ενίσχυση), που αφορούν την τελική μορφή του ελάσματος.

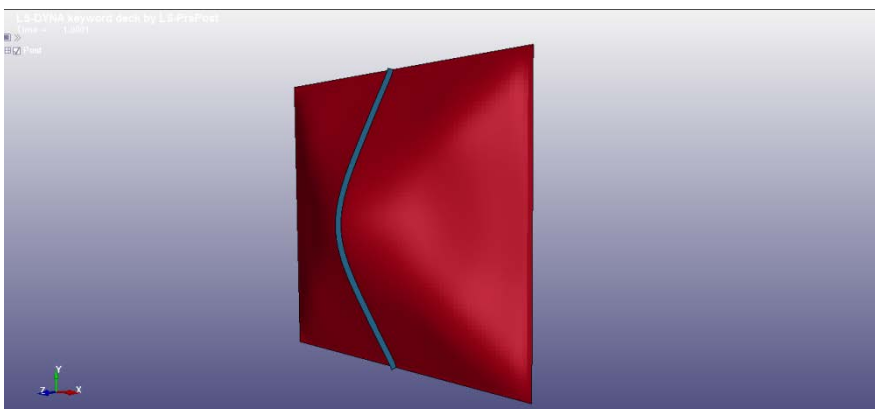


Εικόνα 5.2.4: Τελική μορφή ελάσματος με μονή ενίσχυση

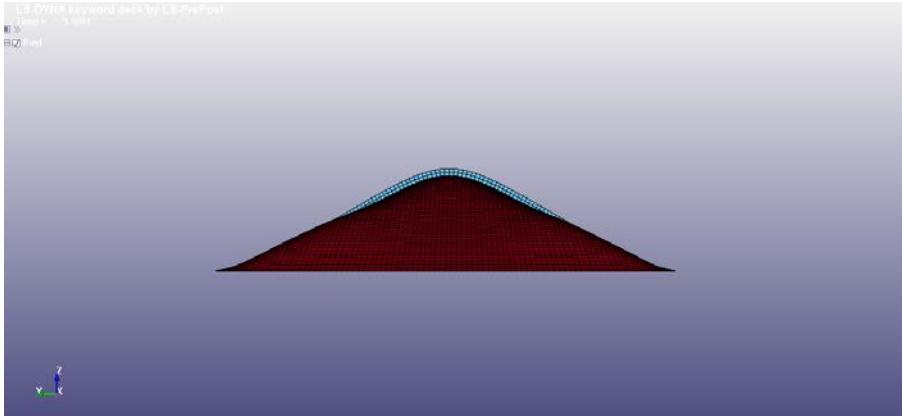
α)



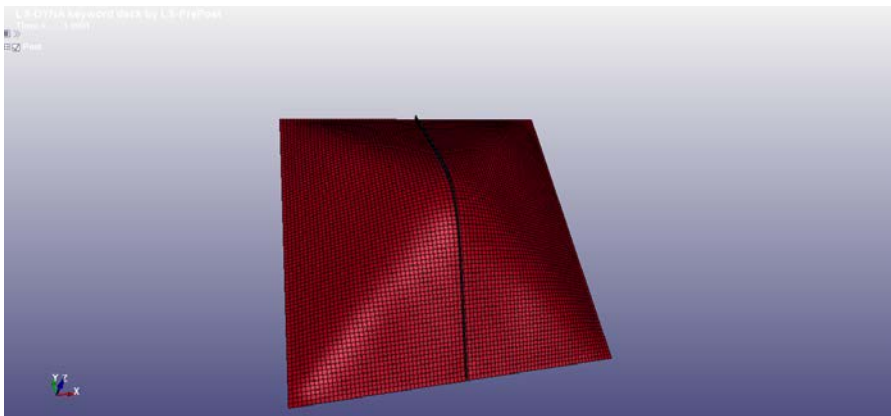
β)



γ)



δ)



Εικόνα 5.2.5: Αποτύπωση τελικής μορφής του ελάσματος με (γ,δ) και χωρίς πλέγμα (α,β), για διάφορες οπτικές γωνίες (A01)

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης σε σύγκριση με αυτά της πειραματικής διαδικασίας για το πείραμα με κωδικό A17 (Πίνακας 5.2.1: Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων μεταξύ του πειράματος με κωδικό A17 και του LS-DYNA) και A01 (Πίνακας 5.2.2: Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων μεταξύ του πειράματος με κωδικό A01 και του LS-DYNA)

Πίνακας 5.2.1: Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων μεταξύ του πειράματος με κωδικό A17 και του LS-DYNA

	Σύγκριση LS-DYNA με Πειραματικό (A17)	
	Πείραμα	LS-DYNA
Μόνιμη	26.53	29.02
Μέγιστη	-	29.44
Απόκλιση από πείραμα	-	9.39%

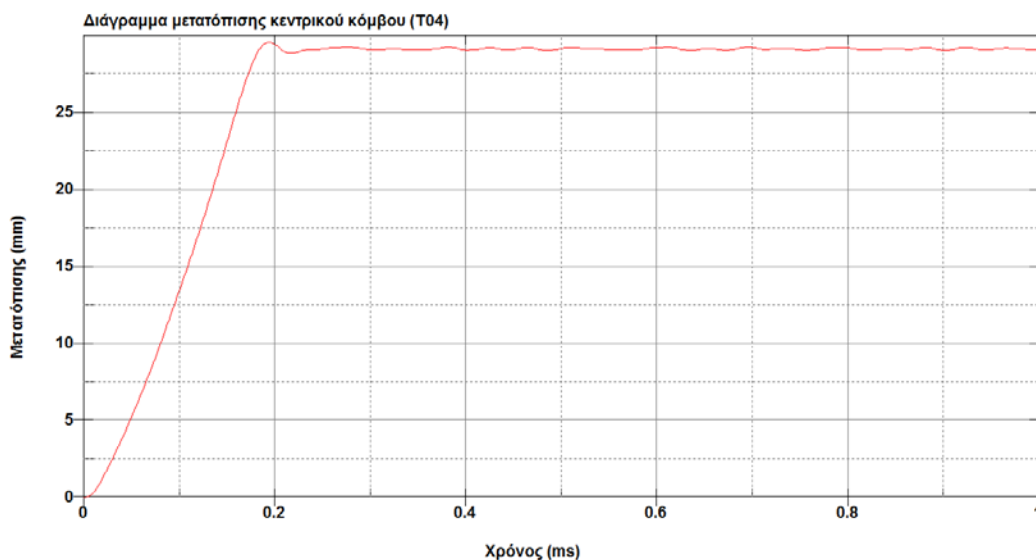
Πίνακας 5.2.2: Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων μεταξύ του πειράματος με κωδικό A01 και του LS-DYNA

	Σύγκριση LS-DYNA με Πειραματικό (A01)	
	Πείραμα	LS-DYNA
Μόνιμη	30.10	30.39
Μέγιστη	-	30.76
Απόκλιση από πείραμα	-	0.96%

Οι αποκλίσεις αφορούν την απόκλιση της μόνιμης μετατόπισης του κεντρικού κόμβου του LS – DYNA από αυτή του πειράματος

➤ Ενίσχυση σε σχήμα σταυρού (Cross Stiffener)

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε μορφή διαγράμματος, της μετατόπισης του κεντρικού κόμβου σε συνάρτηση με το χρόνο για το πείραμα με κωδικό T04 (Διάγραμμα 5.2.3). Η μετατόπιση του κεντρικού κόμβου αφορά τον κόμβο που βρίσκεται πάνω στο έλασμα και όχι στη συμβολή των ενισχύσεων.



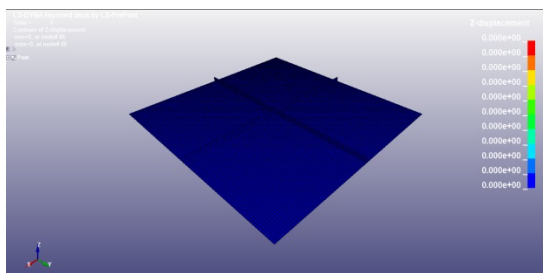
Διάγραμμα 5.2.3: Διάγραμμα μετατόπισης κεντρικού κόμβου σε συνάρτηση με χρόνο για το πείραμα με κωδικό T04

Βάσει του παραπάνω διαγράμματος, παρατηρούμε ότι η μέγιστη μετατόπιση δεν ταυτίζεται με την μόνιμη μετατόπιση. Για το πείραμα με κωδικό T04 η μέγιστη μετατόπιση είναι 29.62 mm και η μόνιμη μετατόπιση είναι 29.15 mm.

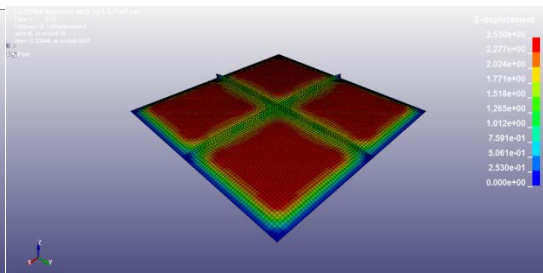
Επίσης, ενώ το κέντρο του ελάσματος φτάνει σε μέγιστη μετατόπιση σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, περίπου στα 0.192 ms ή στα 192 μs, η ίδια συνεχίζει να ταλαντώνεται μέχρι την απόσβεση της ταλάντωσης η οποία συμβαίνει πολύ αργότερα σε σχέση με τον χρόνο που επιτυγχάνεται η μέγιστη μετατόπιση.

Στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 5.2.6: Εξέλιξη παραμόρφωσης του ελάσματος με ενίσχυση σταυρό. α) για 0μs, β) για 20μs, γ) για 40μs, δ) για 60μs, ε) για 80μs, στ) για 100μs, ζ) για 120μs, η) για 140μs, θ) για 160μs, ι) για 192μs, κ) τελική μορφή για 1000μs (T04)) παρουσιάζεται η εξέλιξη της παραμόρφωσης του ελάσματος. Βλέπουμε ότι η παραμόρφωση ξεκινά από την περιοχή των πλευρών του ελάσματος και συνεχίζεται προς το κέντρο δημιουργώντας τέσσερις περιοχές μέγιστης μετατόπισης. Πιο συγκεκριμένα οι περιοχές στις οποίες βρίσκονται οι ενισχύσεις δεν παρουσιάζουν στην αρχή (περίπου για τα πρώτα 100-120μs) τόσο μεγάλη μετατόπιση σε σύγκριση με την περιοχή γύρω από αυτές, γεγονός που είναι ευδιάκριτο από το χρώμα του ελάσματος το οποίο στις συγκεκριμένες περιοχές παραμένει κίτρινο ενώ γύρω από αυτές είναι κόκκινο. Με την πάροδο του χρόνου παρατηρούμε ότι η μέγιστη μετατόπιση επέρχεται τελικά στον κεντρικό κόμβο. Οι εικόνες παρουσιάζουν τις μετατοπίσεις των κόμβων σε άξονα κάθετο (z-άξονα) στο έλασμα και προέρχονται από το μοντέλο T04.

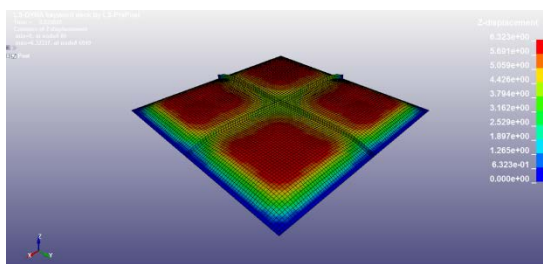
α)



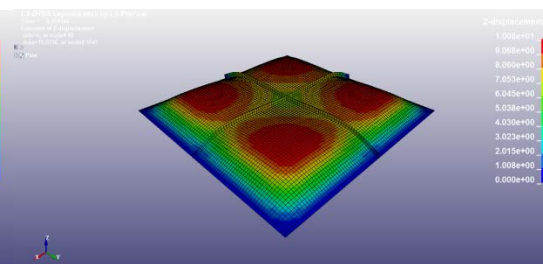
β)



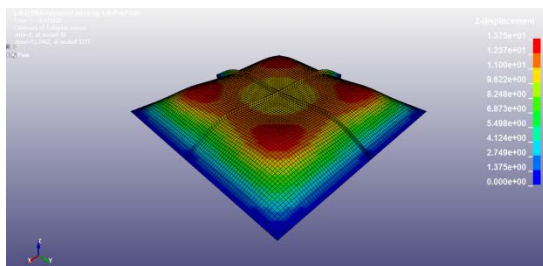
γ)



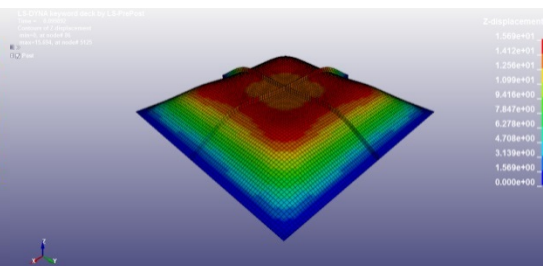
δ)

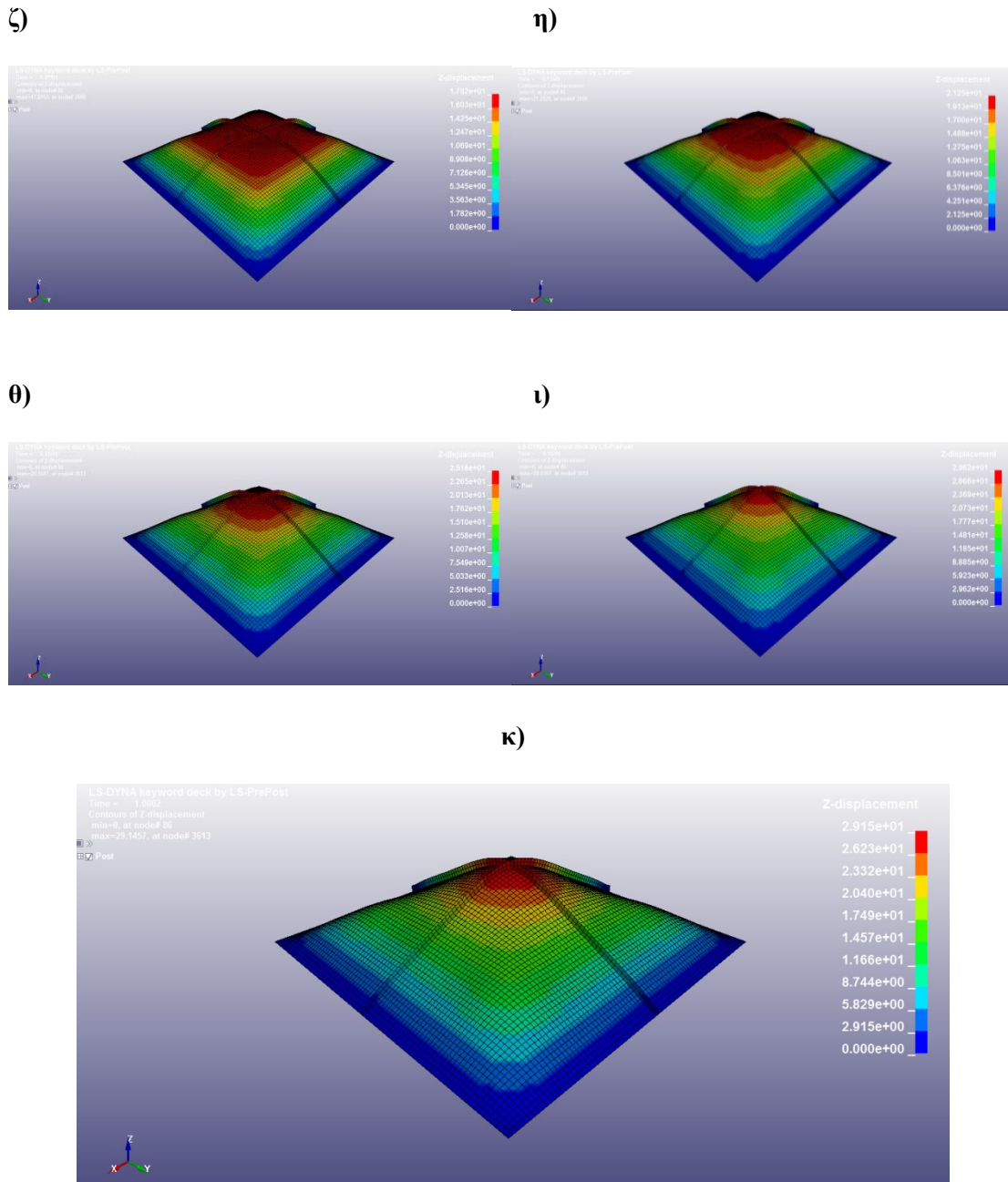


ε)



στ)



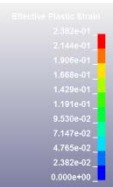
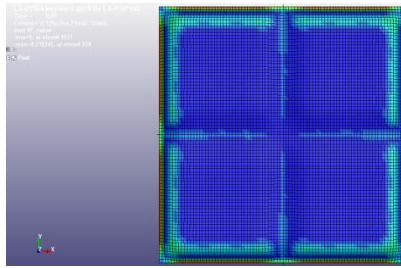


Εικόνα 5.2.6: Εξέλιξη παραμόρφωσης του ελάσματος με ενίσχυση σταυρό. α) για 0μs, β) για 20μs, γ) για 40μs, δ) για 60μs, ε) για 80μs, στ) για 100μs, ζ) για 120μs, η) για 140μs, θ) για 160μs, ι) για 192μs, κ) τελική μορφή για 1000μs (T04)

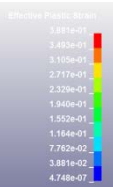
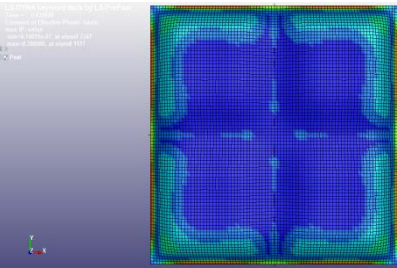
Στη συνέχεια, παρατίθενται εικόνες (Εικόνα 5.2.7: Πλαστική παραμόρφωση ελάσματος με ενίσχυση σταυρό για διάφορες χρονικές στιγμές α) για 20μs, β) για 40μs, γ) για 60μs, δ) για 80μs, ε) για 100μs, στ) για 120μs, ζ) για 140μs, η) για 160μs, θ) για 192μs και ι,κ) για 1000μs (T04)) οι οποίες αποτυπώνουν την πλαστική παραμόρφωση του ελάσματος του πειράματος με κωδικό T04.

Αριθμητική Προσομοίωση Σφυρόκρουσης Ελασμάτων
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

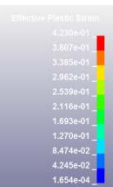
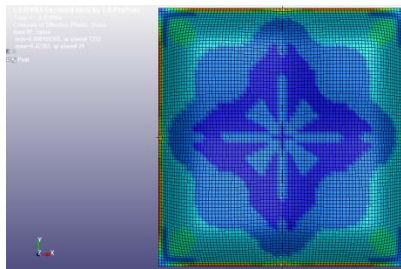
α)



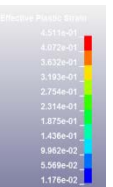
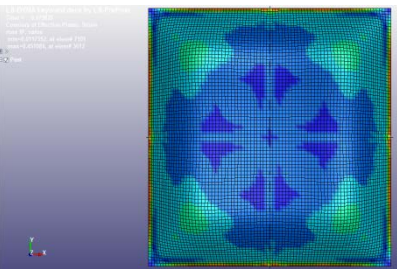
β)



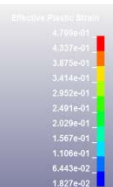
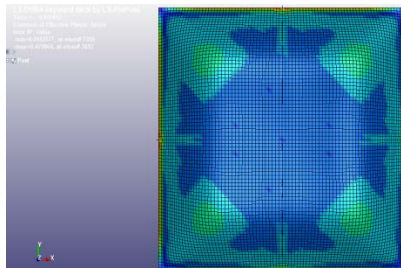
γ)



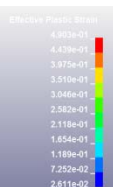
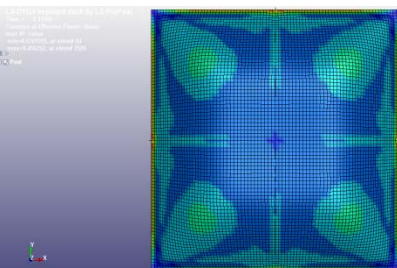
δ)



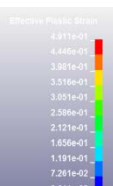
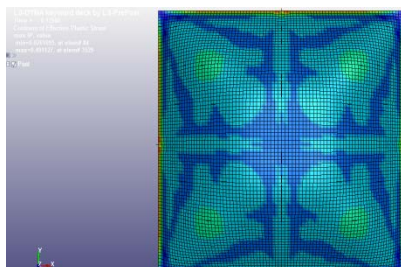
ε)



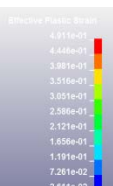
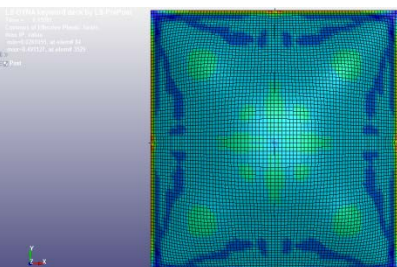
στ)



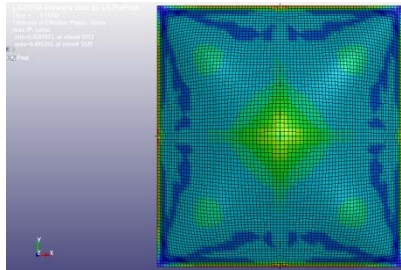
ζ)



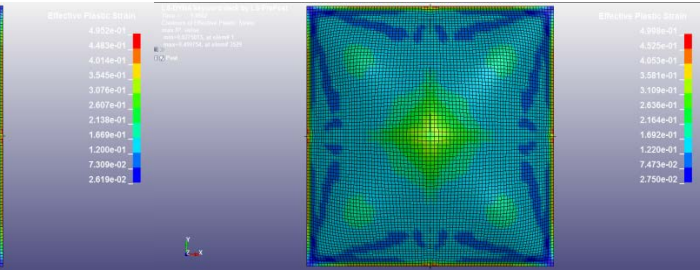
η)



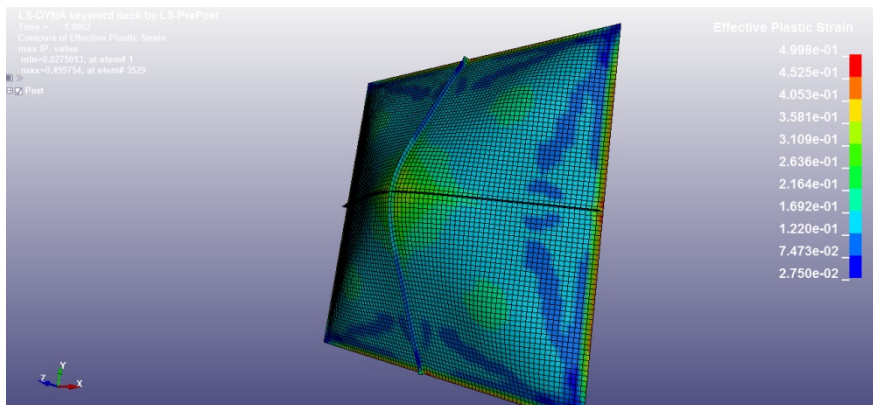
θ)



ι)

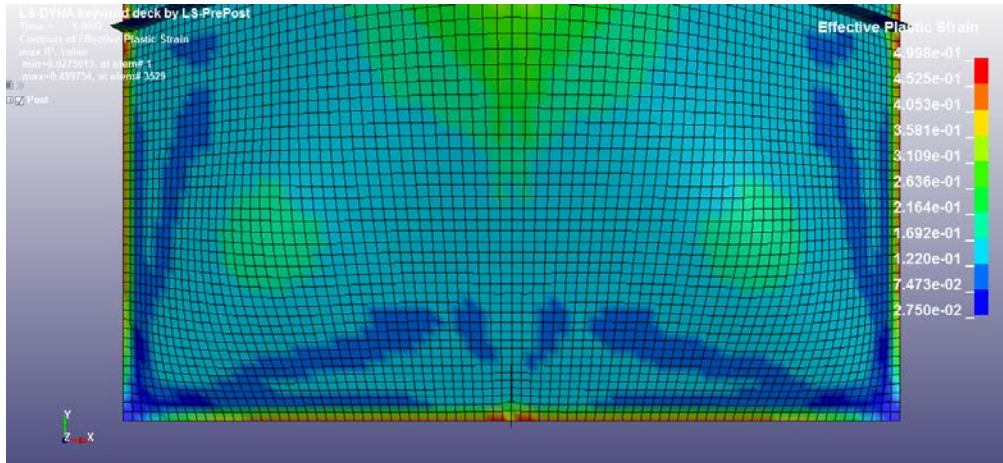


κ)



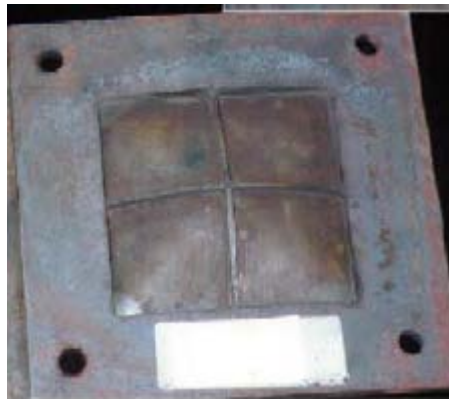
Εικόνα 5.2.7: Πλαστική παραμόρφωση ελάσματος με ενίσχυση σταυρό για διάφορες χρονικές στιγμές α) για 20μs, β) για 40μs, γ) για 60μs, δ) για 80μs, ε) για 100μs, στ) για 120μs, ζ) για 140μs, η) για 160μs, θ) για 192μs και ι,κ) για 1000μs (T04)

Εδώ παρατηρούμε ότι η μέγιστη παραμόρφωση εμφανίζεται και πάλι στα μεσαία τμήματα των ελασμάτων. Ωστόσο στις πλευρές όπου υπάρχει ενίσχυση, δημιουργείται στην αρχή μία περιοχή γύρω από την ενίσχυση αυτή η οποία χωρίζεται σε δύο μέρη τη μέγιστη παραμόρφωση. Όπως ακριβώς έγινε στη μονή ενίσχυση για τις δύο πλευρές, γίνεται εδώ και στις 4 πλευρές. Στην περιοχή αυτή εμφανίζονται λίγο μεγαλύτερες τιμές παραμόρφωσης (Εικόνα 5.2.3) σε σχέση με την υπόλοιπη πλευρά, γεγονός που συμφωνεί και με τα πειραματικά αποτελέσματα [17]. Παράλληλα παρατηρούμε ότι στο τελικό αποτέλεσμα, υπάρχει ένα πιο έντονο φαινόμενο μόνιμης παραμόρφωσης, στο κέντρο γύρω από την ενίσχυση, σε σχέση με το έλασμα χωρίς ενίσχυση, ωστόσο λιγότερο έντονο από την περίπτωση της μονής ενίσχυσης καθώς αποτελεί σημείο τομής των ενισχύσεων. Τέλος η ίδια η ενίσχυση δεν παρουσιάζει κάποια χαρακτηριστικά μόνιμης παραμόρφωση εκτός από κάποια σημεία στο μέσο και στα άκρα της, τα οποία και πάλι δεν είναι τόσο έντονα.



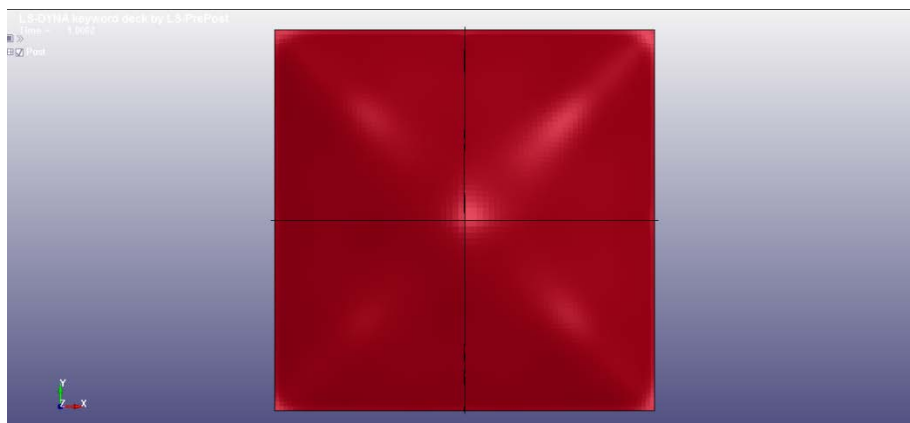
Εικόνα 5.2.8: Μεγέθυνση στην περιοχή της πλευράς του ελάσματος γύρω από την ενίσχυση

Όπως και στην περίπτωση του ελάσματος με μονή ενίσχυση έτσι και εδώ παρουσιάζονται μερικές εικόνες, στις οποίες φαίνεται η ομοιότητα στο αποτέλεσμα μεταξύ του κώδικα (Εικόνα 5.2.10: Αποτύπωση τελικής μορφής του ελάσματος με (γ, δ) και χωρίς πλέγμα (α, β) , για διάφορες οπτικές γωνίες (T04)) και του πειράματος (Εικόνα 5.2.9: Τελικό μορφή ελάσματος με ενίσχυση σε σχήμα σταυρού), που αφορούν την τελική μορφή του ελάσματος.

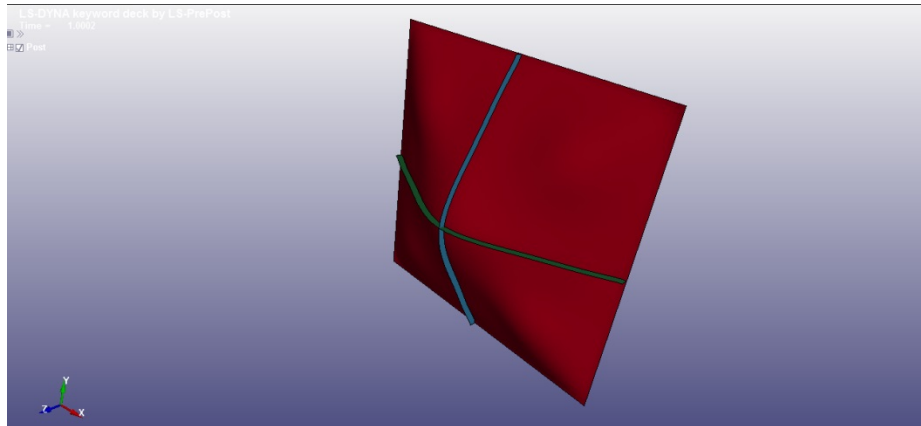


Εικόνα 5.2.9: Τελικό μορφή ελάσματος με ενίσχυση σε σχήμα σταυρού

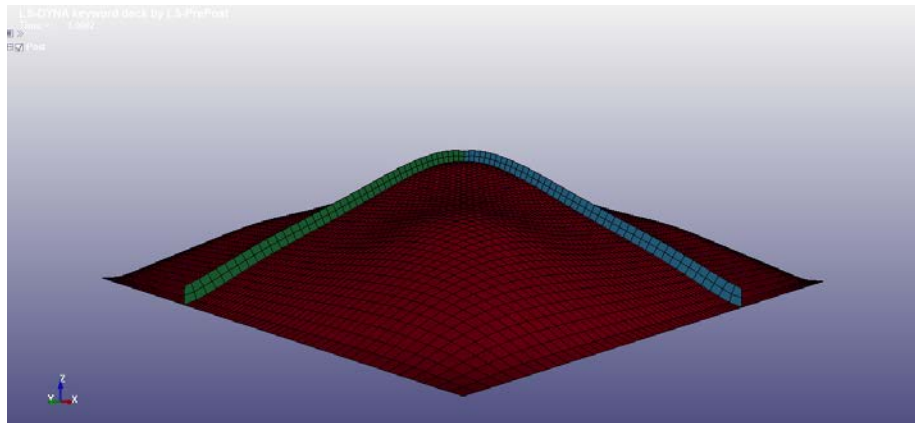
α)



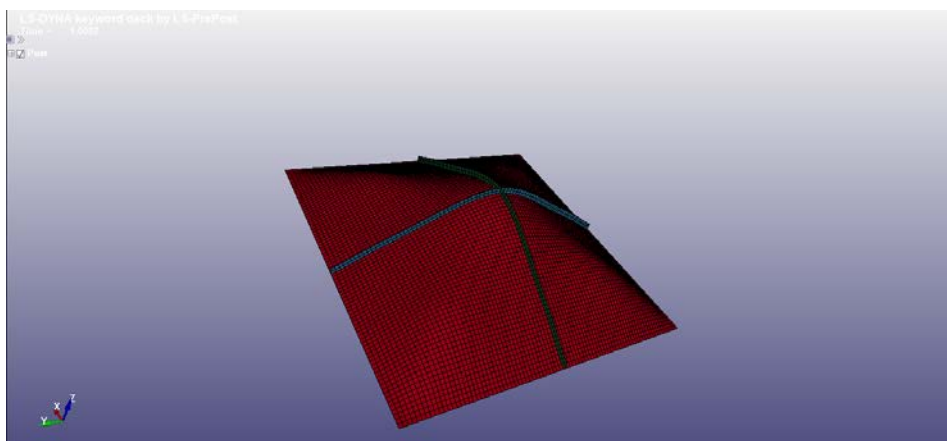
β)



γ)



δ)



Εικόνα 5.2.10: Αποτύπωση τελικής μορφής του ελάσματος με (γ,δ) και χωρίς πλέγμα (α,β), για διάφορες οπτικές γωνίες (T04)

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης σε σύγκριση με αυτά της πειραματικής διαδικασίας για το πείραμα T04 (Πίνακας 5.2.3: Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων μεταξύ του πειράματος με κωδικό T04 και του LS-DYNA).

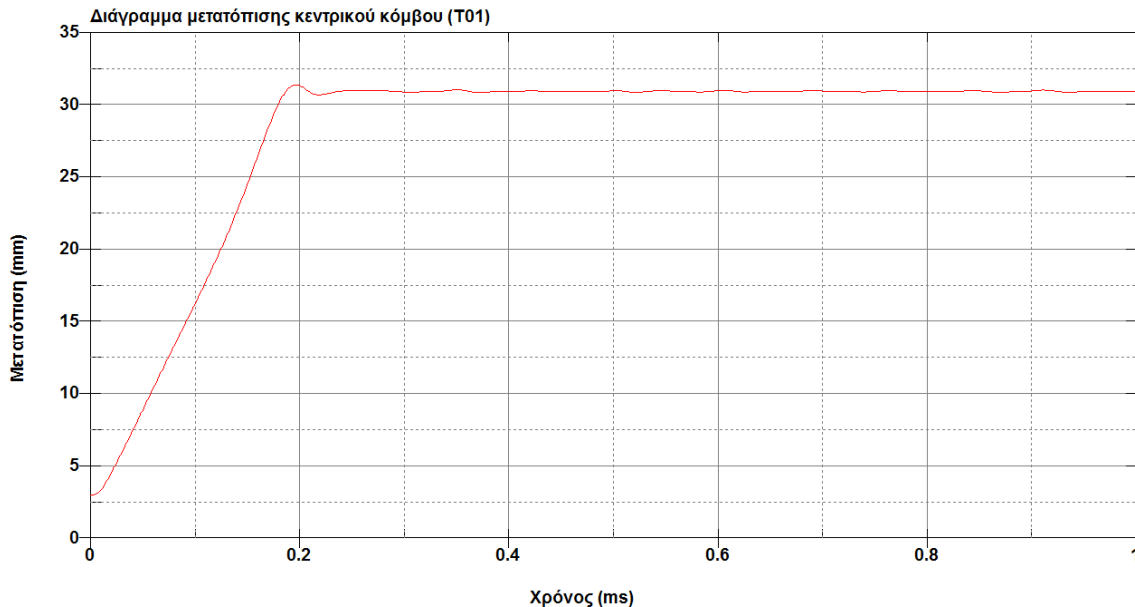
Πίνακας 5.2.3: Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων μεταξύ του πειράματος με κωδικό T04 και του LS-DYNA

	Σύγκριση LS-DYNA με Πειραματικό (T04)	
	Πείραμα	LS-DYNA
Μόνιμη	25.92	29.12
Μέγιστη	-	29.62
Απόκλιση από πείραμα	-	12.46%

Η απόκλιση αφορά την απόκλιση της μόνιμης μετατόπισης του κεντρικού κόμβου του LS-DYNA από αυτή του πειράματος.

➤ Ενίσχυση σε σχήμα διπλού σταυρού (Double Cross Stiffener)

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε μορφή διαγράμματος, της μετατόπισης του κεντρικού κόμβου σε συνάρτηση με το χρόνο για το πείραμα με κωδικό T01 (Διάγραμμα 5.2.4: Διάγραμμα μετατόπισης κεντρικού κόμβου σε συνάρτηση με το χρόνο για το πείραμα με κωδικό T01). Η μετατόπιση του κεντρικού κόμβου αφορά τον κόμβο που βρίσκεται πάνω στο έλασμα και όχι στη συμβολή των ενισχύσεων.



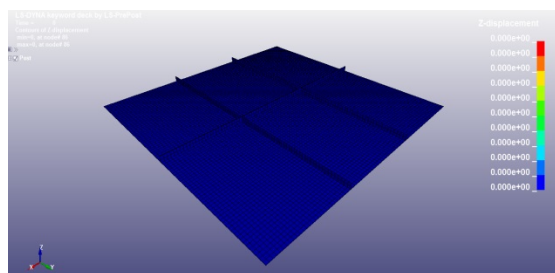
Διάγραμμα 5.2.4: Διάγραμμα μετατόπισης κεντρικού κόμβου σε συνάρτηση με το χρόνο για το πείραμα με κωδικό T01

Βάσει του παραπάνω διαγράμματος, παρατηρούμε ότι η μέγιστη μετατόπιση δεν ταυτίζεται με την μόνιμη μετατόπιση. Για το πείραμα με κωδικό T01 η μέγιστη μετατόπιση είναι 28.67 mm και η μόνιμη μετατόπιση είναι 28.23 mm.

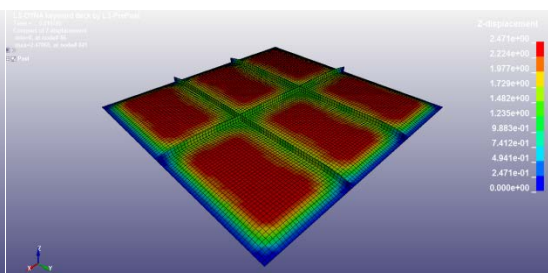
Επίσης, ενώ το κέντρο του ελάσματος φτάνει σε μέγιστη μετατόπιση σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, περίπου στα 0.195 ms ή στα 195 μ s, η ίδια συνεχίζει να ταλαντώνεται μέχρι την απόσβεση της ταλάντωσης η οποία συμβαίνει πολύ αργότερα σε σχέση με τον χρόνο που επιτυγχάνεται η μέγιστη μετατόπιση.

Στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 5.2.11: Εξέλιξη παραμόρφωσης του ελάσματος με ενίσχυση διπλού σταυρού. α) για 0 μ s, β) για 20 μ s, γ) για 40 μ s, δ) για 60 μ s, ε) για 80 μ s, στ) για 100 μ s, ζ) για 120 μ s, η) για 140 μ s, θ) για 160 μ s, ι) για 195 μ s, κ) τελική μορφή για 1000 μ s (T01)) παρουσιάζεται η εξέλιξη της παραμόρφωσης του ελάσματος. Βλέπουμε ότι η παραμόρφωση ξεκινά από την περιοχή των πλευρών του ελάσματος και συνεχίζεται προς το κέντρο δημιουργώντας έξι περιοχές μέγιστης μετατόπισης. Πιο συγκεκριμένα οι περιοχές στις οποίες βρίσκονται οι ενισχύσεις δεν παρουσιάζουν στην αρχή (περίπου για τα πρώτα 80-100 μ s) τόσο μεγάλη μετατόπιση σε σύγκριση με την περιοχή γύρω από αυτές, γεγονός που είναι ευδιάκριτο από το χρώμα του ελάσματος το οποίο στις συγκεκριμένες περιοχές παραμένει κίτρινο ενώ γύρω από αυτές είναι κόκκινο. Με την πάροδο του χρόνου παρατηρούμε ότι η μέγιστη μετατόπιση επέρχεται τελικά στον κεντρικό κόμβο. Οι εικόνες παρουσιάζουν τις μετατοπίσεις των κόμβων σε άξονα κάθετο (z-άξονα) στο έλασμα και προέρχονται από το μοντέλο T01.

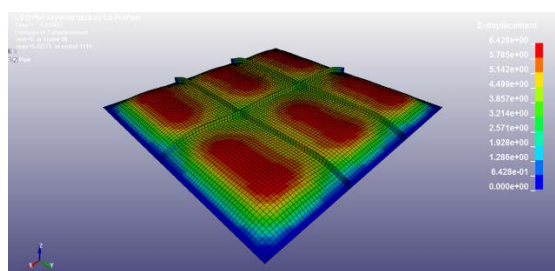
α)



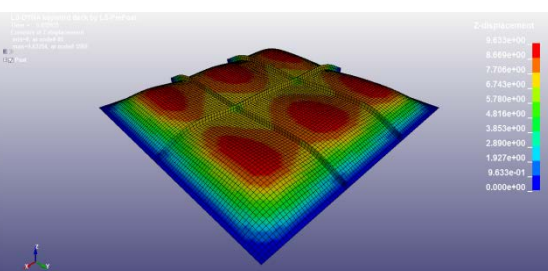
β)

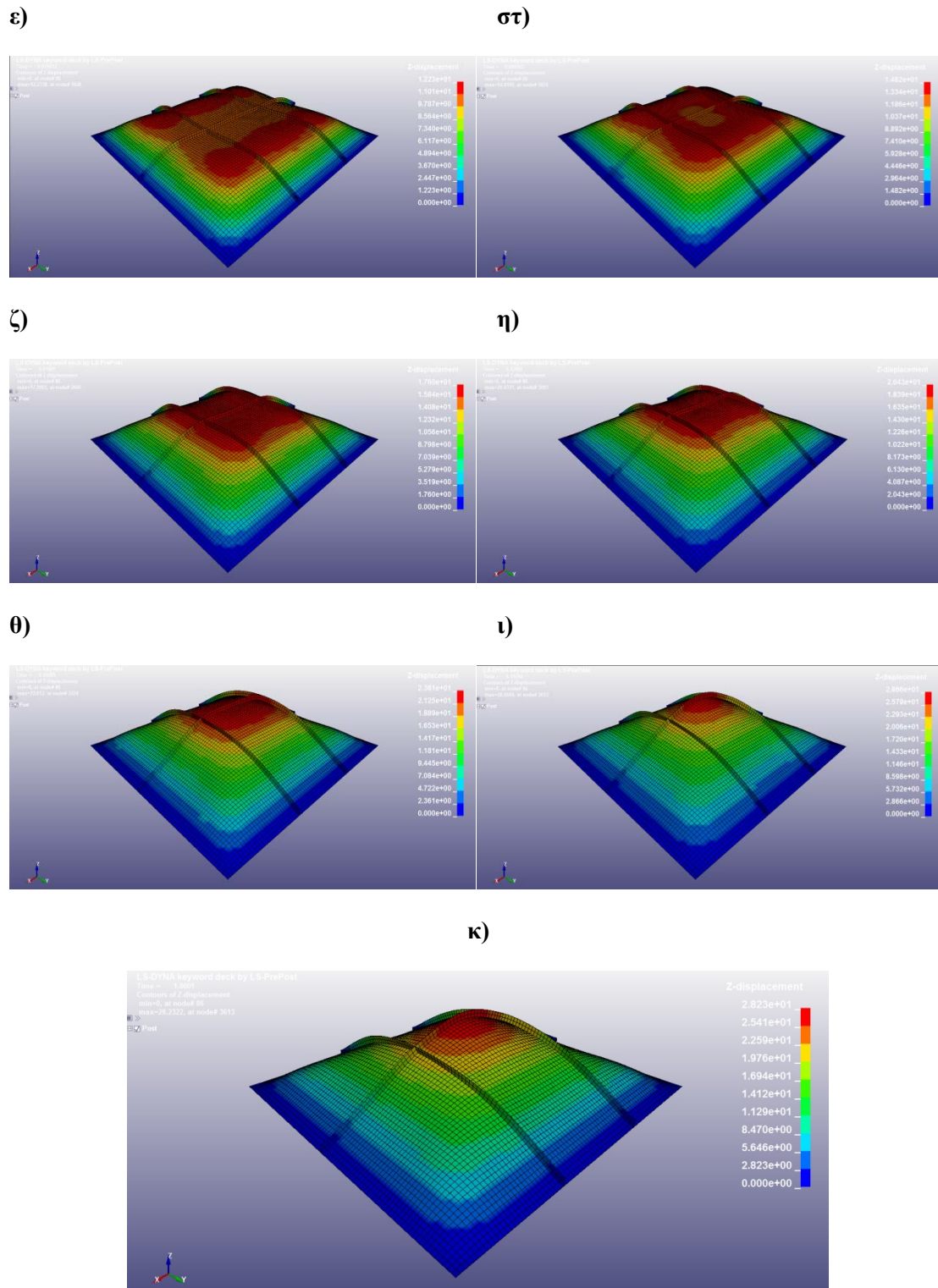


γ)



δ)

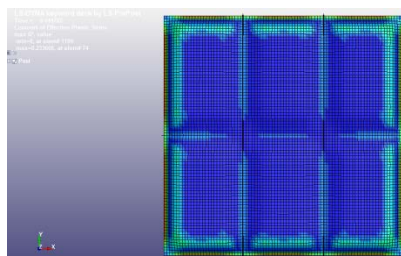




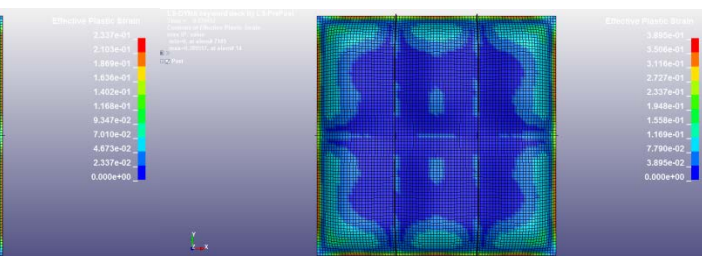
Εικόνα 5.2.11: Εξέλιξη παραμόρφωσης του ελάσματος με ενίσχυση διπλού σταυρού. α) για 0μs, β) για 20μs, γ) για 40μs, δ) για 60μs, ε) για 80μs, στ) για 100μs, ζ) για 120μs, η) για 140μs, θ) για 160μs, ι) για 195μs, κ) τελική μορφή για 1000μs (T01)

Στη συνέχεια, παρατίθενται εικόνες (Εικόνα 5.2.12: : Πλαστική παραμόρφωση ελάσματος με ενίσχυση διπλού σταυρού για διάφορες χρονικές στιγμές α) για 20μs, β) για 40μs, γ) για 60μs, δ) για 80μs, ε) για 100μs, στ) για 120μs, ζ) για 140μs, η) για 160μs, θ) για 192μs και ι,κ,λ) για 1000μs (T01)) οι οποίες αποτυπώνουν την πλαστική παραμόρφωση του ελάσματος του πειράματος με κωδικό T04.

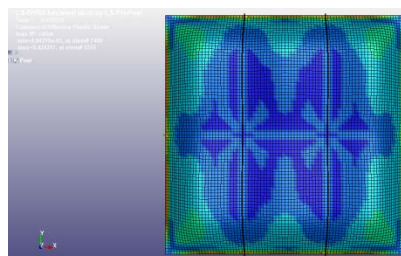
α)



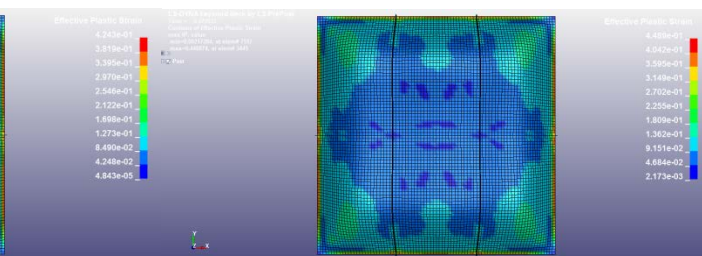
β)



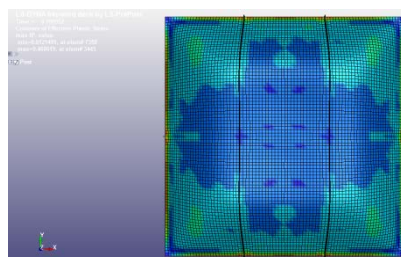
γ)



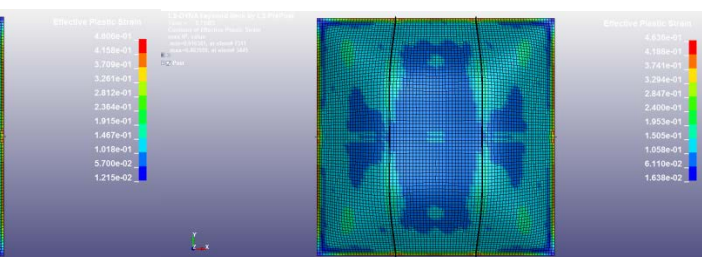
δ)



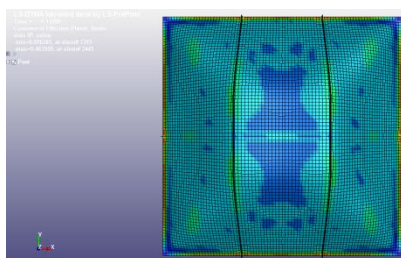
ε)



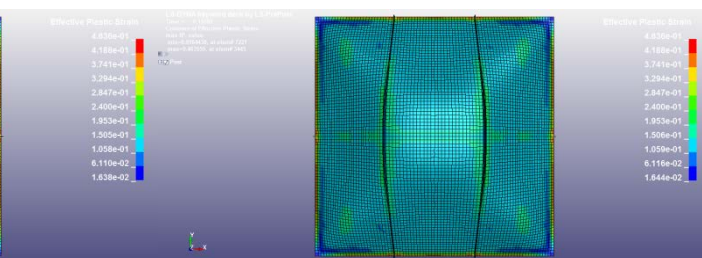
στ)

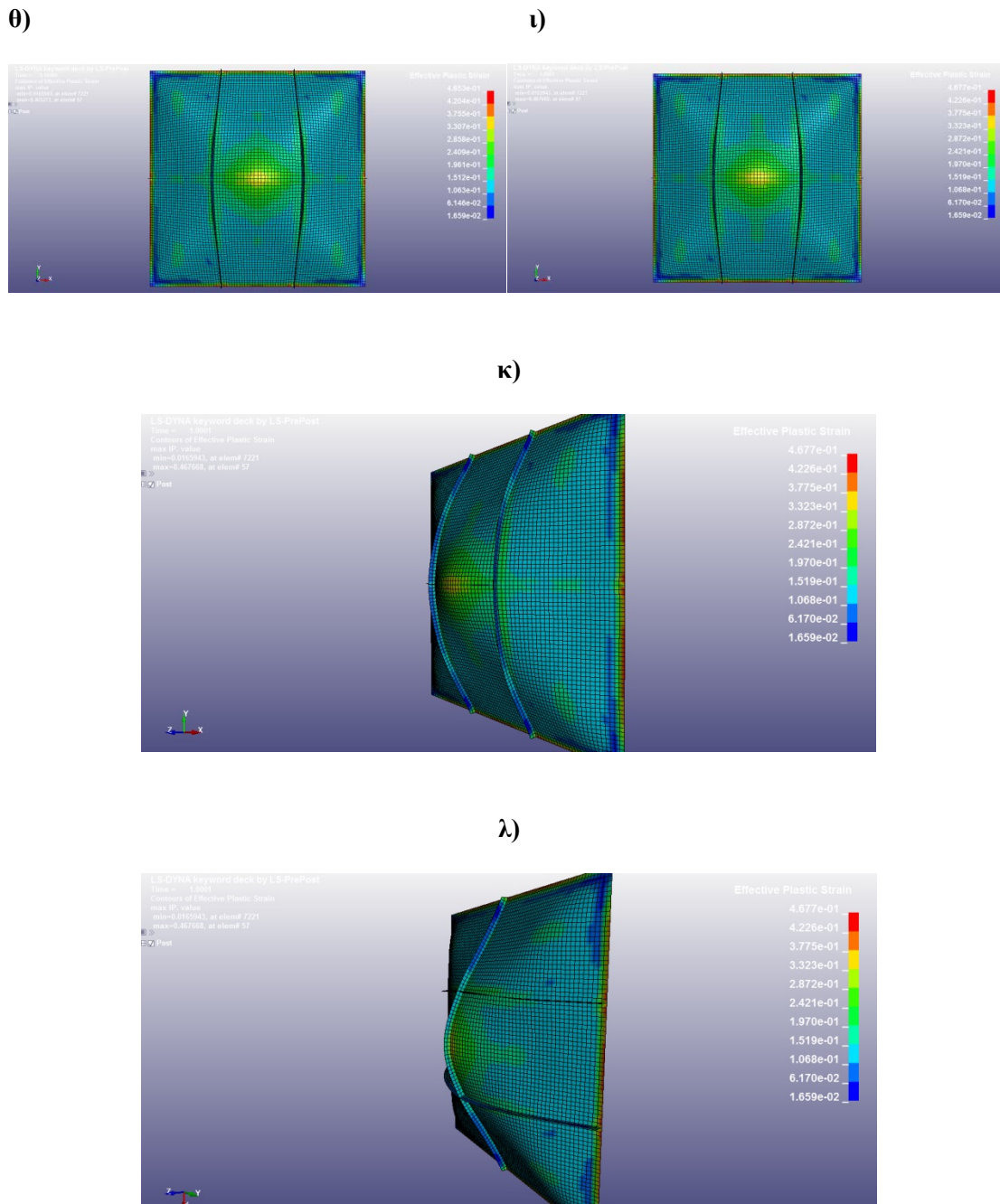


ζ)



η)

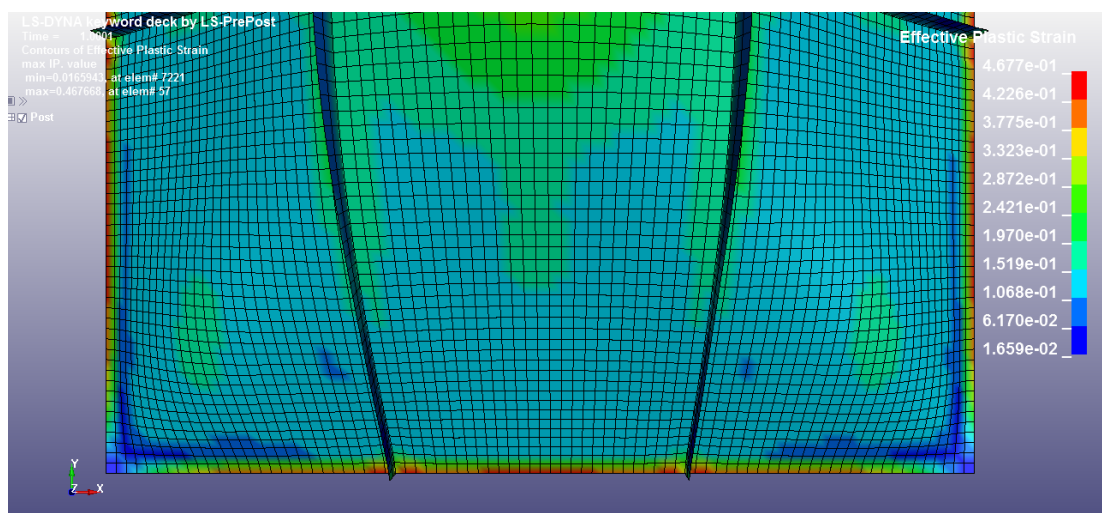




Εικόνα 5.2.12: : Πλαστική παραμόρφωση ελάσματος με ενίσχυση διπλού σταυρού για διάφορες χρονικές στιγμές α) για 20μs, β) για 40μs, γ) για 60μs, δ) για 80μs, ε) για 100μs, στ) για 120μs, ζ) για 140μs, η) για 160μs, θ) για 192μs και ι,κ,λ) για 1000μs (T01)

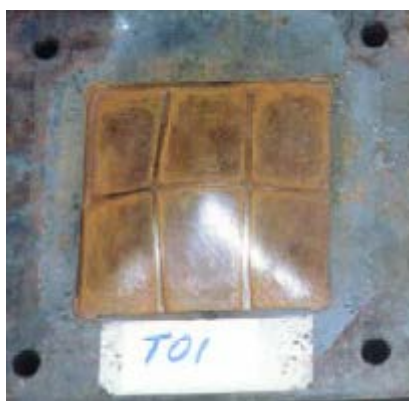
Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις έτσι και εδώ παρατηρούμε ότι η μέγιστη παραμόρφωση εμφανίζεται αρχικά στα μεσαία τμήματα των ελασμάτων. Ωστόσο στις πλευρές όπου υπάρχει ενίσχυση, δημιουργείται στην αρχή μία περιοχή γύρω από την ενίσχυση αυτή η οποία χωρίζει σε δύο μέρη τη μέγιστη παραμόρφωση. Με την πάροδο του χρόνου στην περιοχή αυτή εμφανίζονται λίγο μεγαλύτερες τιμές παραμόρφωσης (Εικόνα 5.2.13) σε σχέση με την υπόλοιπη πλευρά, γεγονός που συμφωνεί και με τα πειραματικά αποτελέσματα [17]. Παράλληλα παρατηρούμε ότι στο τελικό αποτέλεσμα, υπάρχει ένα πιο

έντονο φαινόμενο μόνιμης παραμόρφωσης, στο κέντρο γύρω από την ενίσχυση, σε σχέση με το έλασμα χωρίς ενίσχυση, το οποίο μοιάζει σε μεγάλο βαθμό με το βαθμό παραμόρφωσης του ελάσματος με μονή ενίσχυση. Οι ίδιες οι ενισχύσεις παρουσιάζουν διαφορετικά αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα, οι δύο κάθετες ενισχύσεις παρουσιάζουν μικρότερο βαθμό παραμόρφωσης από την οριζόντια, ωστόσο, όπως παρατηρείται στις παραπάνω εικόνες, όσο περνάει ο χρόνος αποκτούν μία κλίση, σύμφωνα με την παραμόρφωση του ελάσματος, γεγονός που τις καθιστά ευδιάκριτες ακόμα και από την κάτοψη του (του ελάσματος). Κάτι παρόμοιο δεν παρατηρήθηκε από τη μονή ενίσχυση και από την ενίσχυση σε σχήμα σταυρού, οι οποίες δεν αποκτούσαν κάποια κλίση και για την αναγνώρισή τους χρειαζόταν η περιστροφή του ελάσματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι ενισχύσεις αυτές όπως και εδώ η οριζόντια, βρίσκονται πάνω στους άξονες συμμετρίας του ελάσματος.



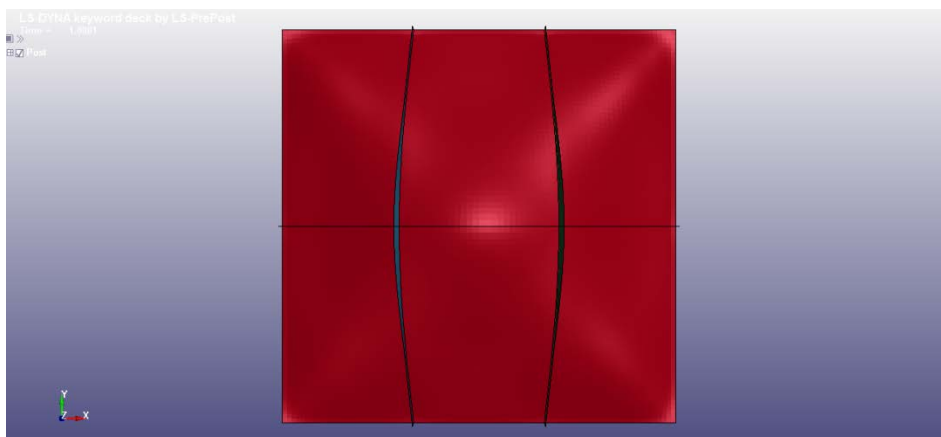
Εικόνα 5.2.13: Μεγέθυνση στην περιοχή της πλευράς του ελάσματος γύρω από τις ενισχύσεις

Στη συνέχεια παρουσιάζονται μερικές εικόνες, στις οποίες φαίνεται η ομοιότητα στο αποτέλεσμα μεταξύ του κώδικα (Εικόνα 5.2.15: Αποτύπωση τελικής μορφής του ελάσματος με (γ, δ) και χωρίς πλέγμα (α, β) , για διάφορες οπτικές γωνίες (T01)) και του πειράματος (Εικόνα 5.2.14: Τελική μορφή ελάσματος με ενίσχυση σε σχήμα διπλού σταυρού), που αφορούν την τελική μορφή του ελάσματος.

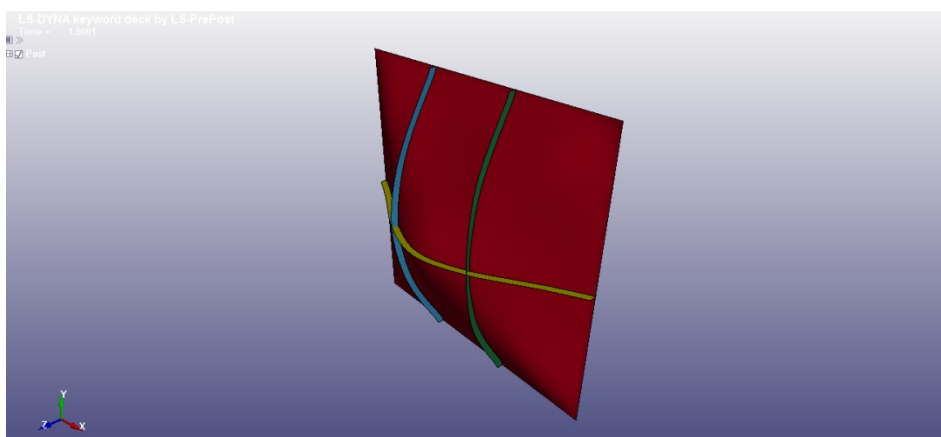


Εικόνα 5.2.14: Τελική μορφή ελάσματος με ενίσχυση σε σχήμα διπλού σταυρού

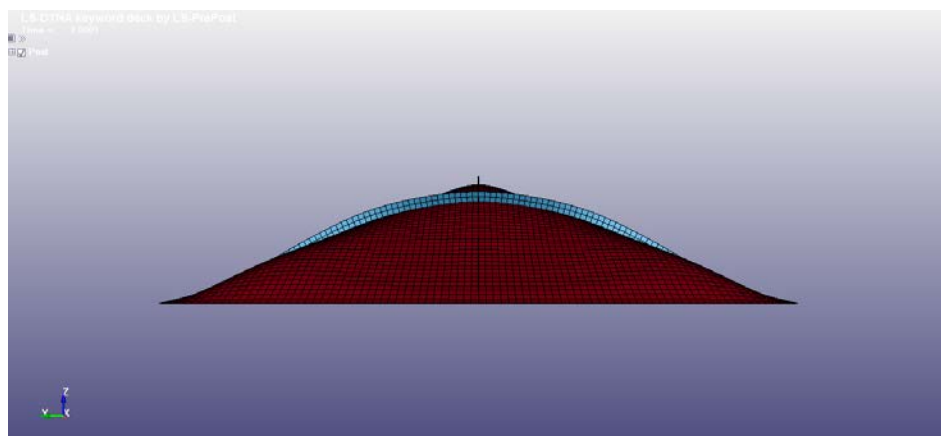
α)



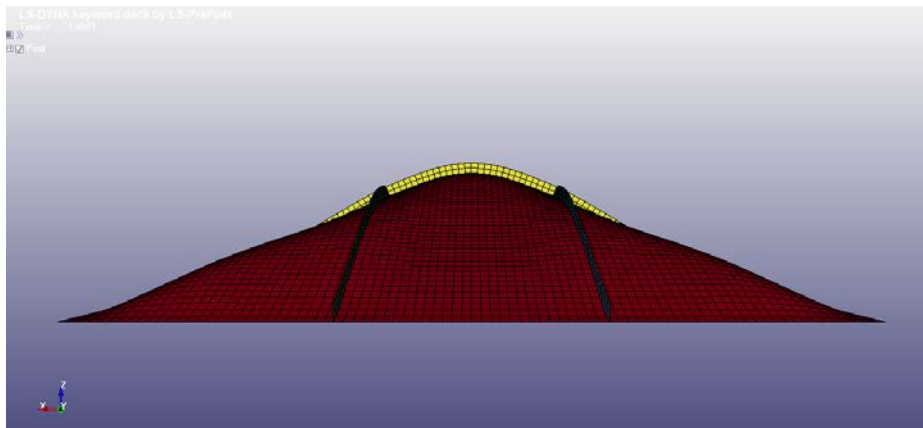
β)



γ)



δ)



Εικόνα 5.2.15: Αποτύπωση τελικής μορφής του ελάσματος με (γ,δ) και χωρίς πλέγμα (α,β), για διάφορες οπτικές γωνίες (T01)

Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης σε σύγκριση με αυτά της πειραματικής διαδικασίας για το πείραμα T04 (Πίνακας 5.2.4: Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων μεταξύ του πειράματος με κωδικό T04 και του LS-DYNA).

Πίνακας 5.2.4: Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων μεταξύ του πειράματος με κωδικό T04 και του LS-DYNA

	Σύγκριση LS-DYNA με Πειραματικό (T01)	
	Πείραμα	LS-DYNA
Μόνιμη	24.35	28.23
Μέγιστη	-	28.67
Απόκλιση από πείραμα	-	15.93%

Η απόκλιση αφορά την απόκλιση της μόνιμης μετατόπισης του κεντρικού κόμβου του LS – DYNA από αυτή του πειράματος.

➤ Συμβολή των ενισχύσεων στα ελάσματα

Στο κεφάλαιο αυτό χρησιμοποιήθηκαν, όπως έχει προαναφερθεί αρκετές φορές, ελάσματα με ονομαστικό πάχος 1.60 mm διαστάσεων 126x126 mm². Γνωρίζοντας παράλληλα από το Κεφάλαιο 4, ότι τα ελάσματα που χρησιμοποιήθηκαν για τα δύο πειράματα S56 και S01 ήταν ίδιων διαστάσεων με πάχη 1.60 mm και 1.63 mm αντίστοιχα τα οποία υποβλήθηκαν σε παλμούς 31 Ns και 43.4 Ns, έγινε μία απόπειρα σύγκρισης της μετατόπισης του κεντρικού κόμβου υπό τον ίδιο παλμό για τα ελάσματα με μονή ενίσχυση, ενίσχυση στα σταυρού και ενίσχυση διπλού σταυρού σε σχέση με τα ελάσματα χωρίς ενίσχυση.

Εφόσον τα πλέγματα σε όλα τα προαναφερθέντα ελάσματα είναι 84x84, θα εφαρμόσουμε τον παλμό μεγέθους 31 Ns σε όλα, χωρίς να υπάρχουν ωστόσο πειραματικά δεδομένα για ελάσματα με τις ενισχύσεις.

Τα αποτελέσματα όπως προέκυψαν φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 5.2.5.

Πίνακας 5.2.5: Συγκριτικός πίνακας μετατόπισης κεντρικού κόμβου για ελάσματα χωρίς ενίσχυση (F-plate) σε σχέση με ελάσματα με μονή ενίσχυση (S-plate), ενίσχυση σταυρού (C-plate) και ενίσχυση διπλού σταυρού (DC-plate)

Σύγκριση ενισχύσεων για Impulse 31Ns				
	F-plate	S-plate	C-plate	DC-plate
Μέγιστη	27.11	27.05	26.08	25.27
Μόνιμη	26.58	26.43	25.58	24.78
Απόκλιση Μόνιμης	-	-0.56%	-3.76%	-6.77%

Όπως φαίνεται, με εξαίρεση τη μονή ενίσχυση η οποία δεν επιδρά ουσιαστικά στη μόνιμη μετατόπιση του κεντρικού κόμβου, η ενίσχυση σε σχήμα σταυρού και η ενίσχυση σε σχήμα διπλού σταυρού επιδρούν επιτυχώς στη μείωση της μετατόπισης κεντρικού κόμβου.

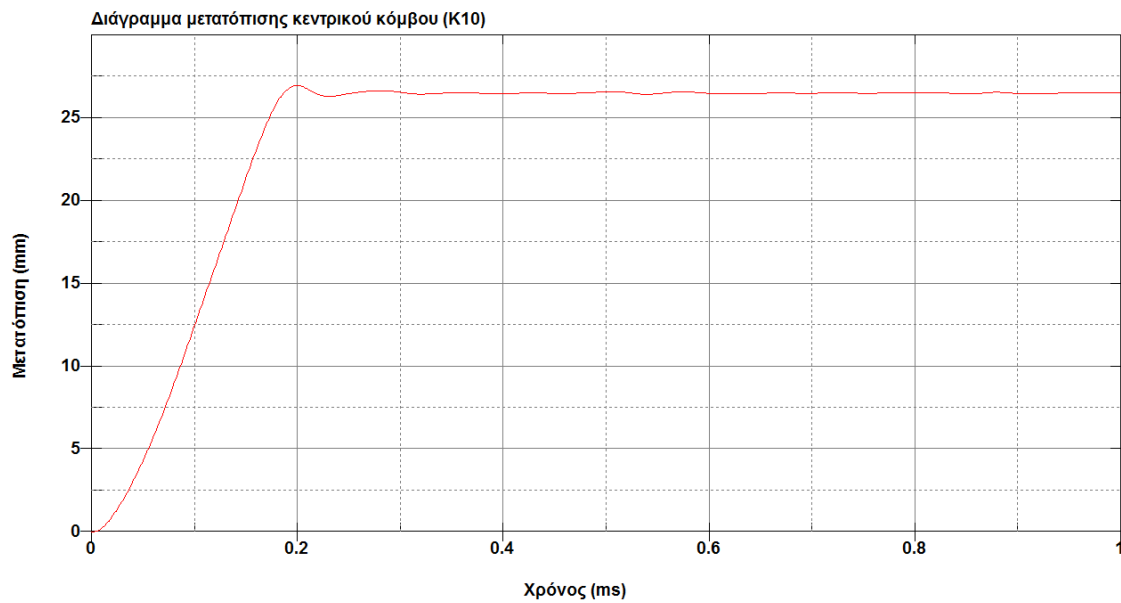
- **Αποτελέσματα ενισχυμένων ελασμάτων 3x7**

Στο σημείο αυτό θα ασχοληθούμε με τα ελάσματα με ενισχύσεις διαστάσεων 3x7 mm² (πλάτος x ύψος). Βασιστήκαμε στα πειράματα με κωδικούς K10 και K28 για μονή ενίσχυση, S43 και S14 για ενίσχυση σε σχήμα σταυρού και T02 για ενίσχυση σε σχήμα διπλού σταυρού. Τα στοιχεία των πειραμάτων αυτών φαίνονται στον Πίνακα 5.1.2 που προηγήθηκε.

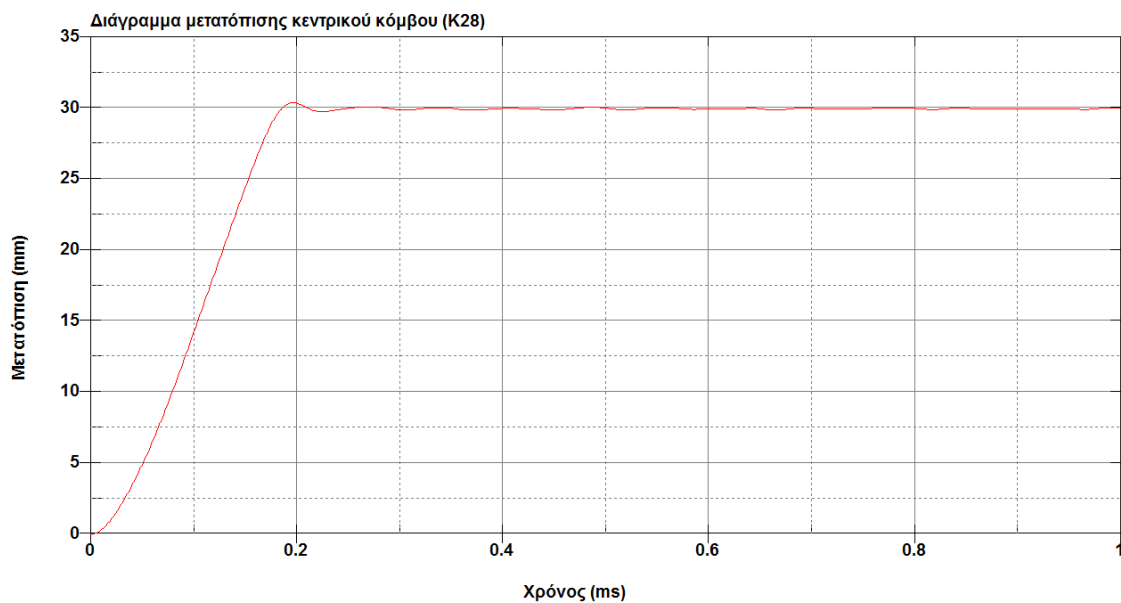
Πριν αναφερθούμε εκτενέστερα σε κάθε είδος ενίσχυσης ξεχωριστά, σωστό θα ήταν να αναφερθεί πως έχοντας κάνει μία αναλυτική προσέγγιση για τα ενισχυμένα ελάσματα 3x3 όσον αφορά το σχήμα/μορφή του ελάσματος σε διάφορες χρονικές στιγμές καθώς και τη μόνιμη παραμόρφωσή του επίσης για διάφορες χρονικές στιγμές, δεν θα συμπεριλάβουμε τόσο αναλυτικές εικόνες στο συγκεκριμένο κομμάτι παρά μόνο κάποιες αντιπροσωπευτικές. Ο λόγος έγκειται στο γεγονός ότι η μορφή του παραμορφωμένου ελάσματος είναι παρόμοια με τις προαναφερθείσες.

➤ Μονή ενίσχυση (Single Stiffener)

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε μορφή διαγράμματος, της μετατόπισης του κεντρικού κόμβου σε συνάρτηση με το χρόνο για τα δύο πειράματα K10 (Διάγραμμα 5.2.5) και K28 (Διάγραμμα 5.2.6) αντίστοιχα. Η μετατόπιση του κεντρικού κόμβου αφορά τον κόμβο που βρίσκεται πάνω στο έλασμα και όχι στην ενίσχυση.



Διάγραμμα 5.2.5: Διάγραμμα μετατόπισης κεντρικού κόμβου σε συνάρτηση με χρόνο για το πείραμα με κωδικό K10

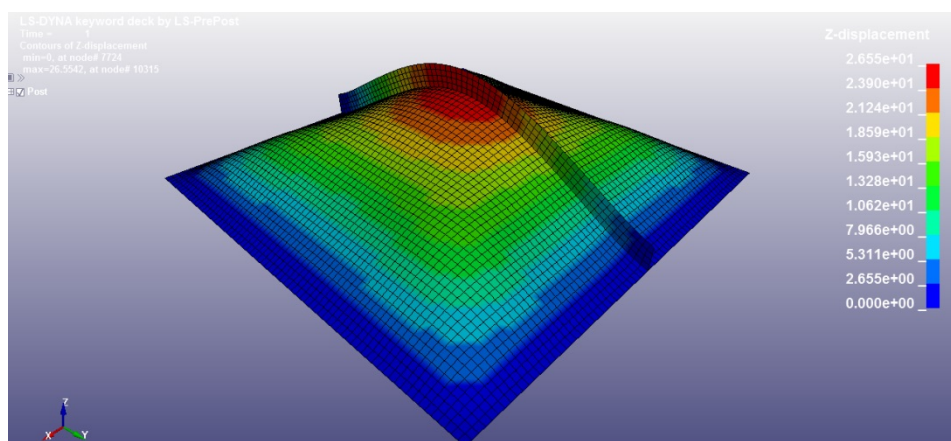


Διάγραμμα 5.2.6: Διάγραμμα μετατόπισης κεντρικού κόμβου σε συνάρτηση με το χρόνο για το πείραμα με κωδικό K28

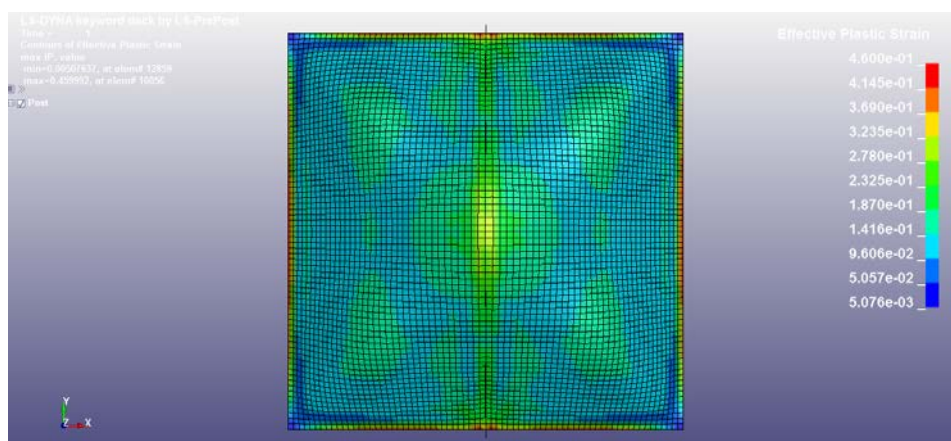
Βάσει των παραπάνω διαγραμμάτων, παρατηρούμε ότι η μέγιστη μετατόπιση δεν ταυτίζεται με την μόνιμη μετατόπιση. Για το πείραμα με κωδικό K10 η μέγιστη μετατόπιση είναι 26.99 mm και η μόνιμη μετατόπιση είναι 26.55 mm, ενώ για το πείραμα με κωδικό K28 η μέγιστη μετατόπιση είναι 30.41 mm και η μόνιμη 30.01 mm.

Επίσης, ενώ το κέντρο του ελάσματος φτάνει σε μέγιστη μετατόπιση σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, περίπου στα 0,19-0,20 ms ή στα 190-200 μs, η ίδια συνεχίζει να ταλαντώνεται μέχρι την απόσβεση της ταλάντωσης η οποία συμβαίνει πολύ αργότερα σε σχέση με τον χρόνο που επιτυγχάνεται η μέγιστη μετατόπιση.

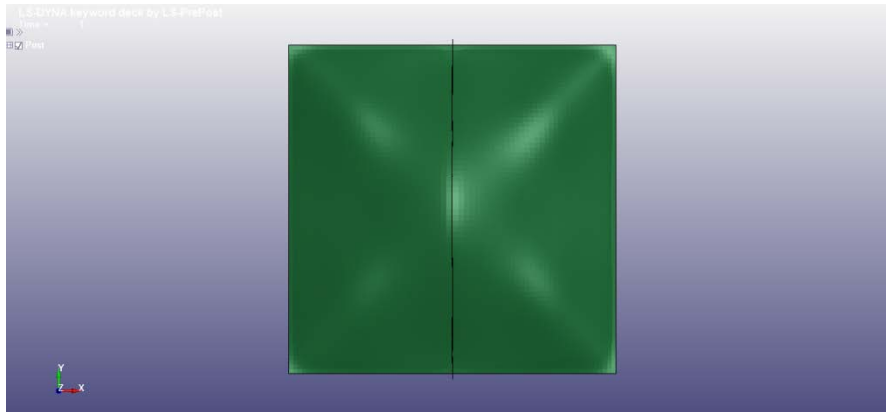
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, επειδή η τελική μορφή του ελάσματος δε διαφέρει με αυτή που προέκυψε από την ανάλυση στα ελάσματα με ενίσχυση σταυρού 3x3, στο συγκεκριμένο σημείο θα παρατεθούν ενδεικτικά κάποιες αντιπροσωπευτικές εικόνες (Εικόνα 5.2.16 και Εικόνα 5.2.17 και Εικόνα 5.2.18) από την τελική μορφή του ελάσματος οι οποίες προέρχονται από το πείραμα με κωδικό K10.



Εικόνα 5.2.16: Τελική μορφή ελάσματος για 1000μs με μονή ενίσχυση 3x7 για το πείραμα με κωδικό K10



Εικόνα 5.2.17: Πλαστική παραμόρφωση ελάσματος για 1000 μs με μονή ενίσχυση 3x7 για το πείραμα με κωδικό K10



Εικόνα 5.2.18: Τελική μορφή ελάσματος με μονή ενίσχυση 3x7 χωρίς πλέγμα για το πείραμα με κωδικό K10

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης σε σύγκριση με αυτά της πειραματικής διαδικασίας για το πείραμα με κωδικό K10 (Πίνακας 5.2.6: Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων μεταξύ του πειράματος με κωδικό K10 και του LS-DYNA) και K28 (Πίνακας 5.2.7: Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων μεταξύ του πειράματος με κωδικό K28 και του LS-DYNA) αντίστοιχα.

Πίνακας 5.2.6: Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων μεταξύ του πειράματος με κωδικό K10 και του LS-DYNA

	Σύγκριση LS-DYNA με Πειραματικό (K10)	
	Πείραμα	LS-DYNA
Μόνιμη	24.71	26.55
Μέγιστη	-	26.99
Απόκλιση από πείραμα	-	7.45%

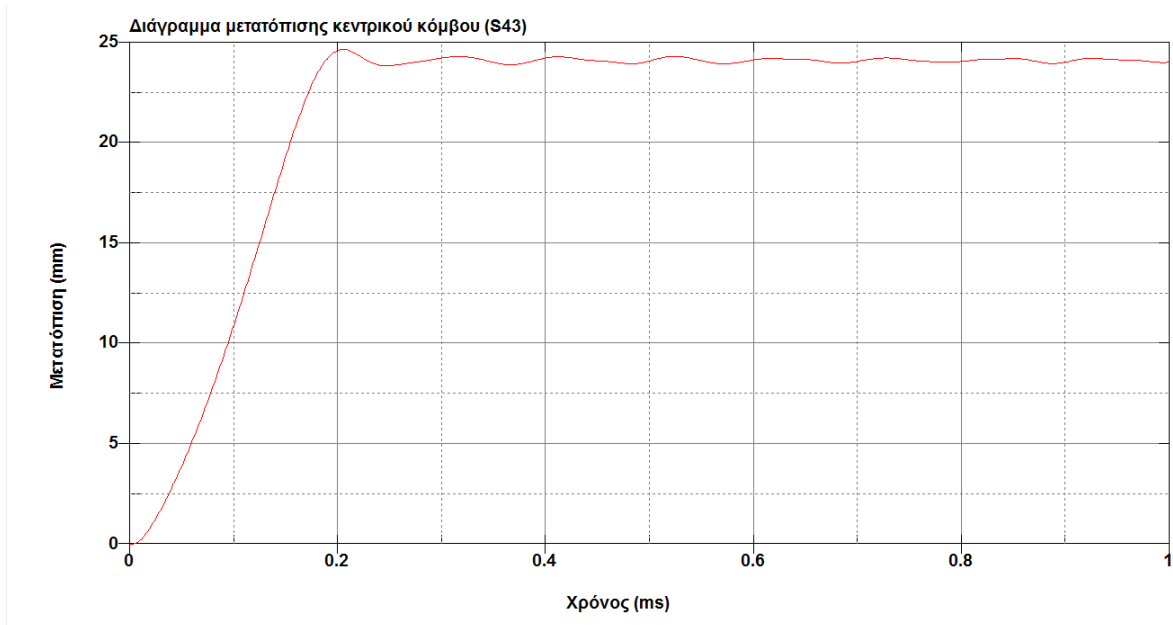
Πίνακας 5.2.7: Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων μεταξύ του πειράματος με κωδικό K28 και του LS-DYNA

	Σύγκριση LS-DYNA με Πειραματικό (K28)	
	Πείραμα	LS-DYNA
Μόνιμη	26.66	30.01
Μέγιστη	-	30.41
Απόκλιση από πείραμα	-	12.57%

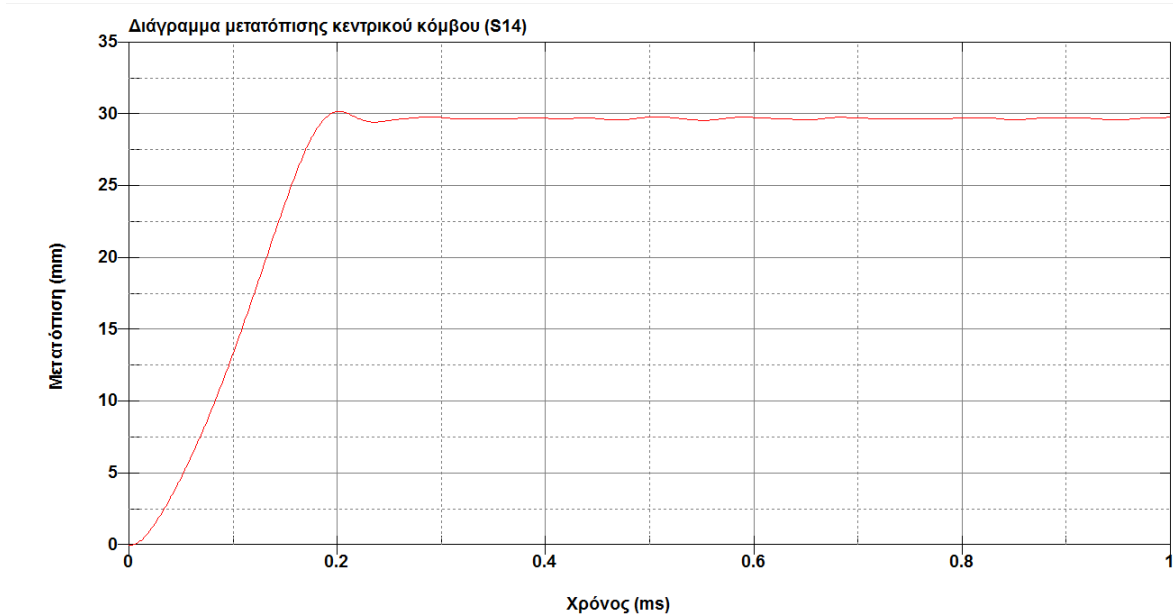
Οι αποκλίσεις αφορούν την απόκλιση της μόνιμης μετατόπισης του κεντρικού κόμβου του LS – DYNA από αυτή του πειράματος

➤ Ενίσχυση σε σχήμα σταυρού (Cross Stiffener)

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε μορφή διαγράμματος, της μετατόπισης του κεντρικού κόμβου σε συνάρτηση με το χρόνο για τα δύο πειράματα S43 (Διάγραμμα 5.2.7) και S14 (Διάγραμμα 5.2.8) αντίστοιχα. Η μετατόπιση του κεντρικού κόμβου αφορά τον κόμβο που βρίσκεται πάνω στο έλασμα και όχι στην ενίσχυση.



Διάγραμμα 5.2.7: Διάγραμμα μετατόπισης κεντρικού κόμβου σε συνάρτηση με χρόνο για το πείραμα με κωδικό S43

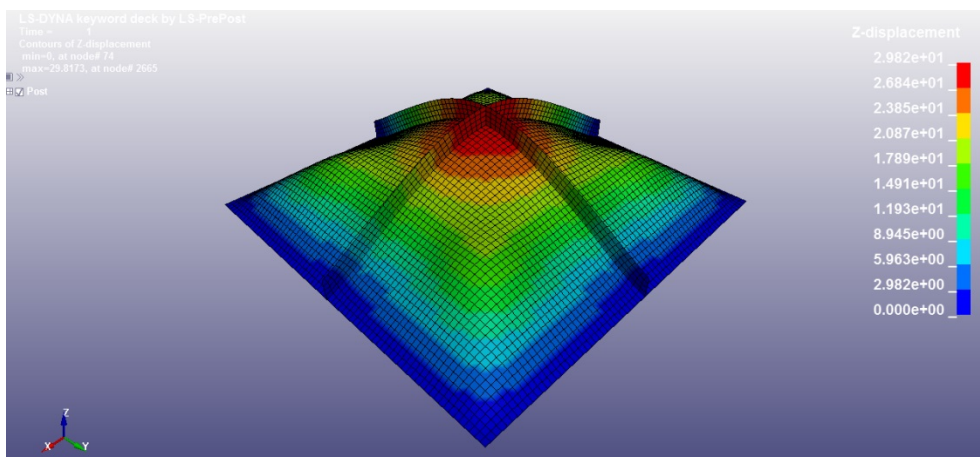


Διάγραμμα 5.2.8: Διάγραμμα μετατόπισης κεντρικού κόμβου σε συνάρτηση με χρόνο για το πείραμα με κωδικό S14

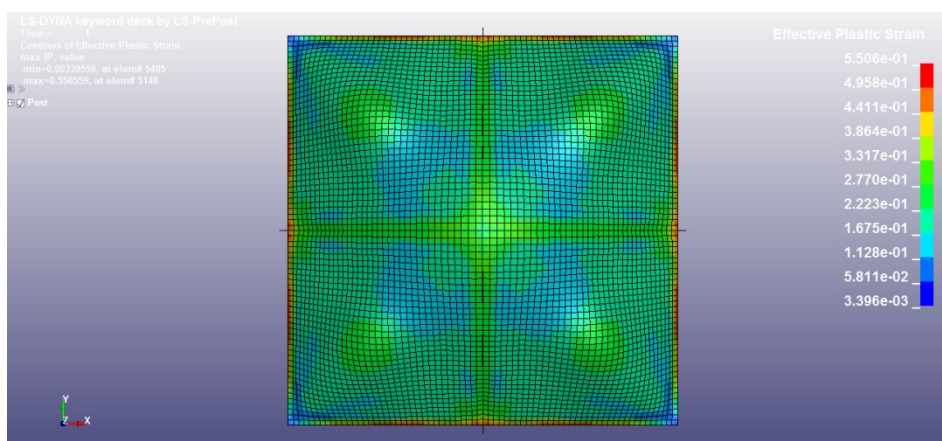
Βάσει των παραπάνω διαγραμμάτων, παρατηρούμε ότι η μέγιστη μετατόπιση δεν ταυτίζεται με την μόνιμη μετατόπιση. Για το πείραμα με κωδικό S43 η μέγιστη μετατόπιση είναι 24.68 mm και η μόνιμη μετατόπιση είναι 24.04 mm, ενώ για το πείραμα με κωδικό S14 η μέγιστη μετατόπιση είναι 30.23 mm και η μόνιμη 29.82 mm.

Επίσης, ενώ το κέντρο του ελάσματος φτάνει σε μέγιστη μετατόπιση σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, περίπου στα 0,19-0,20 ms ή στα 190-200 μs, η ίδια συνεχίζει να ταλαντώνεται μέχρι την απόσβεση της ταλάντωσης η οποία συμβαίνει πολύ αργότερα σε σχέση με τον χρόνο που επιτυγχάνεται η μέγιστη μετατόπιση.

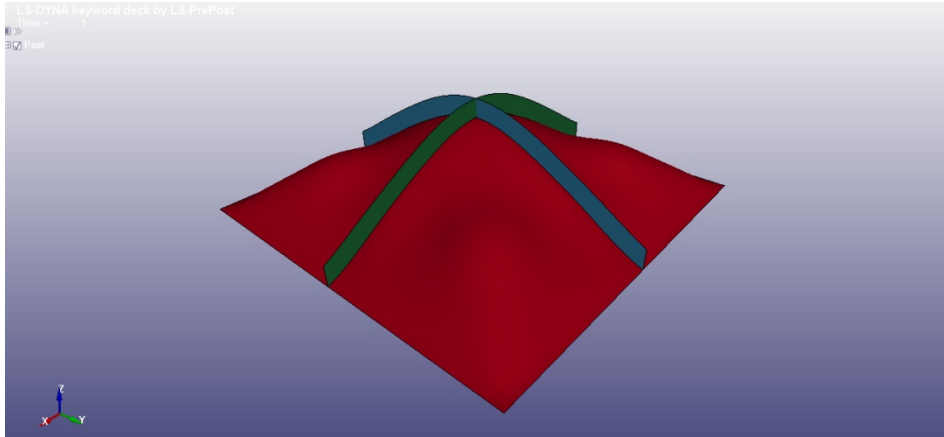
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, επειδή η τελική μορφή του ελάσματος δε διαφέρει με αυτή που προέκυψε από την ανάλυση στα ελάσματα με ενίσχυση σταυρού 3x3, στο συγκεκριμένο σημείο θα παρατεθούν ενδεικτικά κάποιες αντιπροσωπευτικές εικόνες (Εικόνα 5.2.19 και Εικόνα 5.2.20 και Εικόνα 5.2.21) από την τελική μορφή του ελάσματος οι οποίες προέρχονται από το πείραμα με κωδικό S14.



Εικόνα 5.2.19: Τελική μορφή ελάσματος για 1000 μs με ενίσχυση σε σχήμα σταυρού 3x7 για το πείραμα με κωδικό S14



Εικόνα 5.2.20: Πλαστική παραμόρφωση ελάσματος για 1000 μs με ενίσχυση σε σχήμα σταυρού 3x7 για το πείραμα με κωδικό S14



Εικόνα 5.2.21: Τελική μορφή ελάσματος με ενίσχυση σε σχήμα σταυρού 3x7 χωρίς πλέγμα για το πείραμα με κωδικό S14

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης σε σύγκριση με αυτά της πειραματικής διαδικασίας για το πείραμα με κωδικό S43 (Πίνακας 5.2.8: Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων μεταξύ του πειράματος με κωδικό S43 και του LS-DYNA) και S14 (Πίνακας 5.2.9: Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων μεταξύ του πειράματος με κωδικό S14 και του LS-DYNA) αντίστοιχα.

Πίνακας 5.2.8: Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων μεταξύ του πειράματος με κωδικό S43 και του LS-DYNA

	Σύγκριση LS-DYNA με Πειραματικό (S43)	
	Πείραμα	LS-DYNA
Μόνιμη	21.5	24.04
Μέγιστη	-	24.68
Απόκλιση από πείραμα	-	11.81%

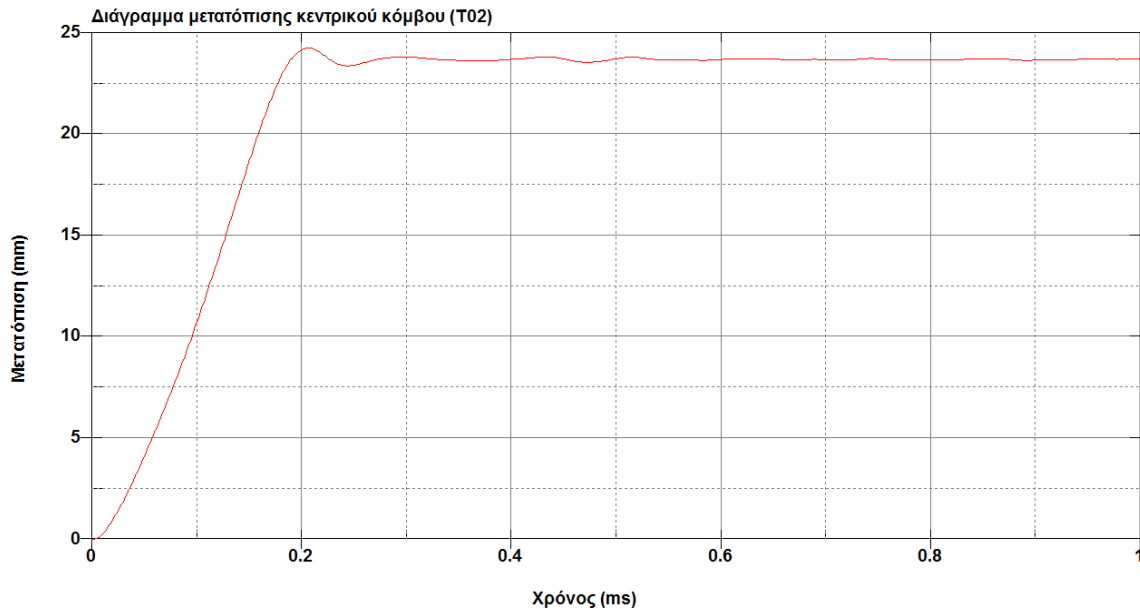
Πίνακας 5.2.9: Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων μεταξύ του πειράματος με κωδικό S14 και του LS-DYNA

	Σύγκριση LS-DYNA με Πειραματικό (S14)	
	Πείραμα	LS-DYNA
Μόνιμη	26.95	29.82
Μέγιστη	-	30.23
Απόκλιση από πείραμα	-	10.65%

Οι αποκλίσεις αφορούν την απόκλιση της μόνιμης μετατόπισης του κεντρικού κόμβου του LS – DYNA από αυτή του πειράματος

➤ Ενίσχυση σε σχήμα διπλού σταυρού (Double Cross Stiffener)

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε μορφή διαγράμματος, της μετατόπισης του κεντρικού κόμβου σε συνάρτηση με το χρόνο για το πείραμα με κωδικό T02 (Διάγραμμα 5.2.9). Η μετατόπιση του κεντρικού κόμβου αφορά τον κόμβο που βρίσκεται πάνω στο έλασμα και όχι στην ενίσχυση.

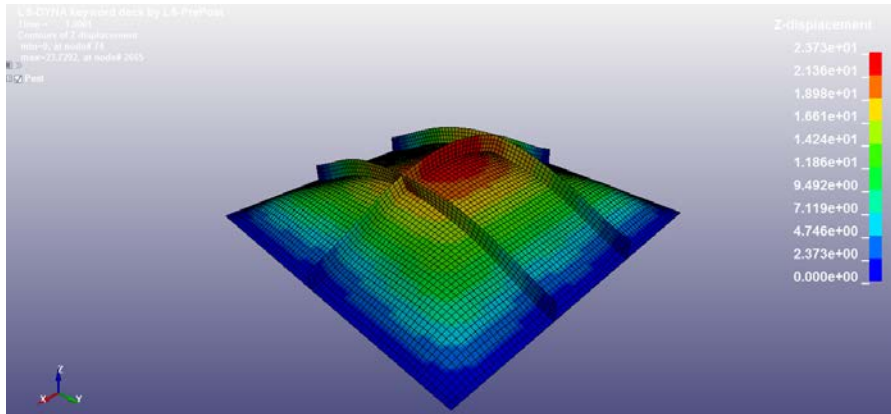


Διάγραμμα 5.2.9: Διάγραμμα μετατόπισης κεντρικού κόμβου σε συνάρτηση με χρόνο για το πείραμα με κωδικό T02

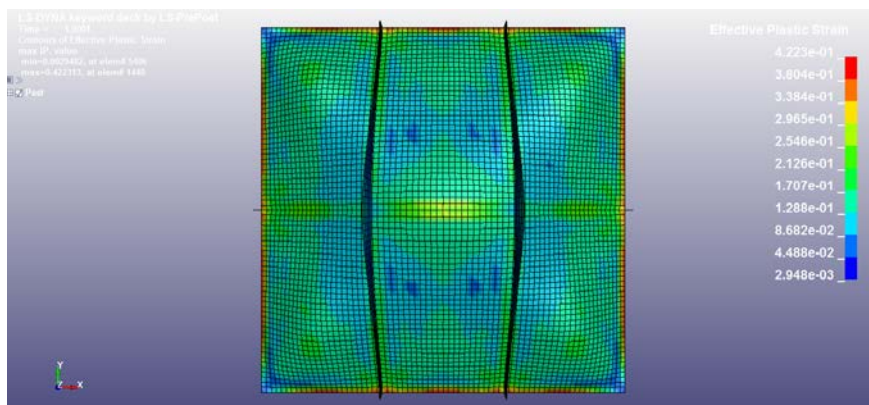
Βάσει του παραπάνω διαγράμματος, παρατηρούμε ότι η μέγιστη μετατόπιση δεν ταυτίζεται με την μόνιμη μετατόπιση. Για το πείραμα με κωδικό T02 η μέγιστη μετατόπιση είναι 24.28 mm και η μόνιμη μετατόπιση είναι 23.73 mm.

Επίσης, ενώ το κέντρο του ελάσματος φτάνει σε μέγιστη μετατόπιση σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, περίπου στα 0,20-0,21 ms ή στα 200-210 μs, η ίδια συνεχίζει να ταλαντώνεται μέχρι την απόσβεση της ταλάντωσης η οποία συμβαίνει πολύ αργότερα σε σχέση με τον χρόνο που επιτυγχάνεται η μέγιστη μετατόπιση.

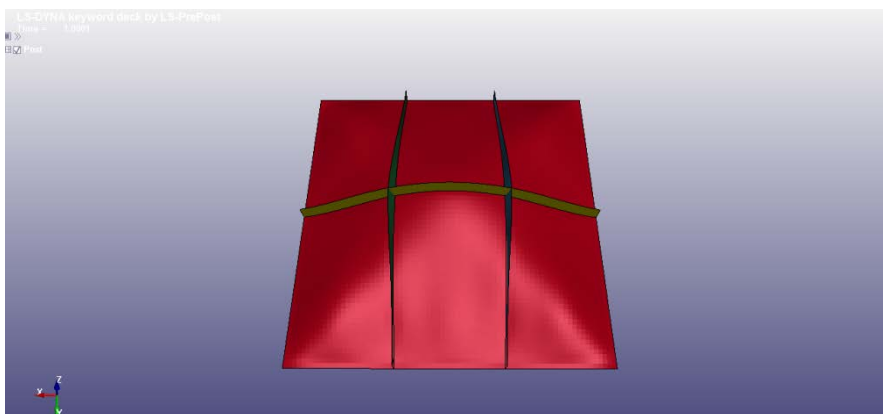
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, επειδή η τελική μορφή του ελάσματος δε διαφέρει με αυτή που προέκυψε από την ανάλυση στα ελάσματα με ενίσχυση διπλού σταυρού 3x3, στο συγκεκριμένο σημείο θα παρατεθούν ενδεικτικά κάποιες αντιπροσωπευτικές εικόνες (Εικόνα 5.2.22 και Εικόνα 5.2.23 και Εικόνα 5.2.24) από την τελική μορφή του ελάσματος.



Εικόνα 5.2.22: Τελική μορφή ελάσματος για 1000 μ s με ενίσχυση σε σχήμα διπλού σταυρού 3x7 για το πείραμα με κωδικό T02



Εικόνα 5.2.23: Πλαστική παραμόρφωση ελάσματος για 1000 μ s με ενίσχυση σε σχήμα διπλού σταυρού 3x7 για το πείραμα με κωδικό T02



Εικόνα 5.2.24: Τελική μορφή ελάσματος με ενίσχυση σε σχήμα διπλού σταυρού 3x7 χωρίς πλέγμα για το πείραμα με κωδικό T02

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης σε σύγκριση με αυτά της πειραματικής διαδικασίας για το πείραμα με κωδικό T02 (Πίνακας 5.2.10: Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων μεταξύ του πειράματος με κωδικό T02 και του LS-DYNA).

Πίνακας 5.2.10: Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων μεταξύ του πειράματος με κωδικό T02 και του LS-DYNA

	Σύγκριση LS-DYNA με Πειραματικό (T02)	
	Πείραμα	LS-DYNA
Μόνιμη	19.76	23.73
Μέγιστη	-	24.78
Απόκλιση από πείραμα	-	20.09%

Η απόκλιση αφορά την απόκλιση της μόνιμης μετατόπισης του κεντρικού κόμβου του LS – DYNA από αυτή του πειράματος

- **Σχολιασμός αποτελεσμάτων**

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, παρατηρούμε ότι με εξαίρεση την αριθμητική προσομοίωση του πειράματος με κωδικό A01 το οποίο έχει μία απόκλιση της τάξεως των 0.96%, τα υπόλοιπα εμφανίζουν μία απόκλιση από τα πειραματικά δεδομένα.

Η απόκλιση σε κάποιες περιπτώσεις είναι αποδεκτή όπως για παράδειγμα στις αριθμητικές προσομοιώσεις των πειραμάτων με κωδικό A17, K10, S14 σε κάποιες άλλες μερικώς αποδεκτή όπως για παράδειγμα στις αριθμητικές προσομοιώσεις των πειραμάτων με κωδικό T04, K28, S43, S14 και T01, ενώ σε μία περίπτωση το αποτέλεσμα εμφανίζει μεγάλη απόκλιση από το πείραμα και αυτή είναι η περίπτωση του πειράματος με κωδικό T02 η οποία συμπεριλήφθηκε στη συγκεκριμένη διπλωματική για την ύπαρξη αποτελεσμάτων και την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Η μοντελοποίηση όλων των παραπάνω περιπτώσεων βασίστηκε, όπως αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου, στη μοντελοποίηση των ελασμάτων χωρίς ενίσχυση τα οποία εμφάνιζαν μία πολύ ικανοποιητική απόκλιση από τα πειραματικά δεδομένα γεγονός που μας οδήγησε στην αποδοχή εκείνης της μοντελοποίησης. Για τον λόγο αυτό, δεν υπήρξε κάποια άλλη επέμβαση στον κώδικα.

Ένας παράγοντας που επηρέασε τα αποτελέσματα, είναι η απόκλιση των διαστάσεων των ενισχύσεων και των ελασμάτων του πειράματος από τις ονομαστικές. Η μοντελοποίηση βασίστηκε όπως τονίστηκε νωρίτερα στις ονομαστικές διαστάσεις.

Τέλος η απόκλιση όπως φαίνεται, εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές κυρίως για τα πειράματα που αφορούν τα ελάσματα με ενισχύσεις σε σχήμα διπλού σταυρού, επομένως εκεί ίσως χρειαζόταν διαφορετική μοντελοποίηση. Σε αντίθεση στα πειράματα με ενίσχυση σε σχήμα σταυρού ή με μονή ενίσχυση, η απόκλιση εμφανίζει αποδεκτές τιμές.

Κεφάλαιο 6 Μελέτη απόκρισης τετραγωνικών ελασμάτων χωρίς ενίσχυση για ναυπηγικό χάλυβα υψηλής αντοχής

Έχοντας αναλύσει στα προηγούμενα κεφάλαια την απόκριση τετραγωνικών ελασμάτων με και χωρίς ενίσχυση, σύμφωνα με τα πειράματα που διεξήγαγαν οι S. Chung Kim Yuen και G. N. Nurick, κρίθηκε σκόπιμο να γίνει μία μελέτη για το πως θα επηρεάσει τα αποτελέσματα η χρήση ενός ναυπηγικού χάλυβα υψηλής αντοχής.

Στον τομέα της ναυπηγικής πέρα από τη χρήση του κοινού ναυπηγικού χάλυβα γίνεται ευρεία χρήση και του χάλυβα υψηλής αντοχής. Γενικά ισχύει ότι:

- Κοινοί χάλυβες ή χάλυβες συνήθους αντοχής (Mild steel)
 - Πιο διαδεδομένοι χάλυβες
 - Πολύ καλή έως εξαιρετική συγκολλητότητα
 - Όριο διαρροής ~235 MPa
- Χάλυβες υψηλής αντοχής (High strength steel)
 - Ευρεία χρήση
 - Όριο διαρροής ~350 MPa

Η διαφορά αφορά τη χημική τους σύσταση. Πέρα από τον άνθρακα, το μαγγάνιο, το πυρίτιο, το φώσφορο και το θείο, χημικά στοιχεία που υπάρχουν κυρίως στους κοινούς χάλυβες, περιέχονται και στοιχεία όπως το αλουμίνιο, το νιόβιο, το βανάδιο στους χάλυβες υψηλής αντοχής.

Ο πρώτος τύπος χάλυβα χρησιμοποιήθηκε και αναλύθηκε, όπως προαναφέρθηκε, στα προηγούμενα κεφάλαια σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα που είχαμε στη διάθεσή μας. Για τον δεύτερο τύπο χάλυβα δεν υπάρχουν στη διάθεσή μας κάποια πειραματικά δεδομένα, για την επιβεβαίωση ή την απόρριψη των αποτελεσμάτων ωστόσο θα γίνει μία διερεύνηση της οποίας τα αποτελέσματα θα συγκριθούν με τα αποτελέσματα του κοινού χάλυβα.

Υπάρχουν διάφορες εκδοχές για τους ναυπηγικούς χάλυβες υψηλής αντοχής, αυτή που επιλέχθηκε στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής είναι αυτή του χάλυβα AH36.

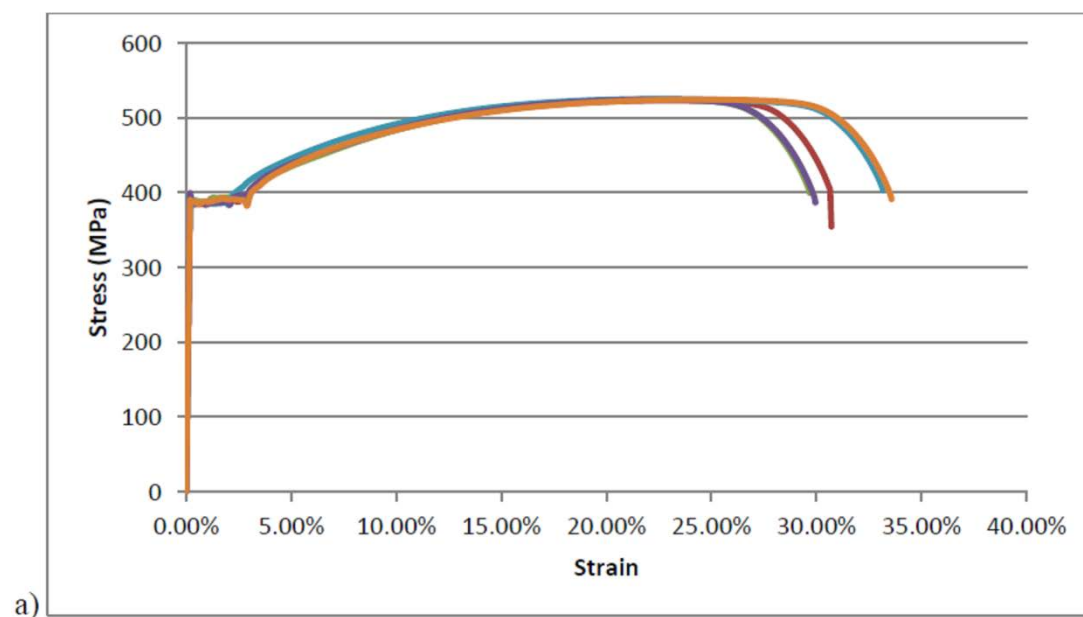
Παρακάτω φαίνονται οι ιδιότητες εφελκυσμού του:

- Αντοχή Εφελκυσμού (N/mm²): 490-620
- Τάση διαρροής (N/mm²): 355
- Επιμήκυνση: 21%

6.1 Μοντελοποίηση της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς του χάλυβα υψηλής αντοχής

Νωρίτερα στο Κεφάλαιο 2, έγινε ανάλυση για το πως μοντελοποιείται ο ναυπηγικός χάλυβας, ο οποίος συγκαταλέγεται στα όλκιμα υλικά. Εφόσον έχει προηγηθεί μία τέτοια ανάλυση, δεν κρίνεται απαραίτητο η επανάληψη των όσων αναφέρθηκαν.

Το πραγματικό διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης του χάλυβα όπως προαναφέρθηκε είναι της μορφής εκείνης του Σχήμα 2.1.2. Για την περίπτωση του χάλυβα AH36 θα παρατηρήσουμε ότι η καμπύλη μοιάζει πάρα πολύ με την παραπάνω. Στο παρακάτω Διάγραμμα 6.1.1 αποτυπώνεται η καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων όπως αυτή προέκυψε από πειράματα που έγιναν στο AIMEN της Ισπανίας [20].

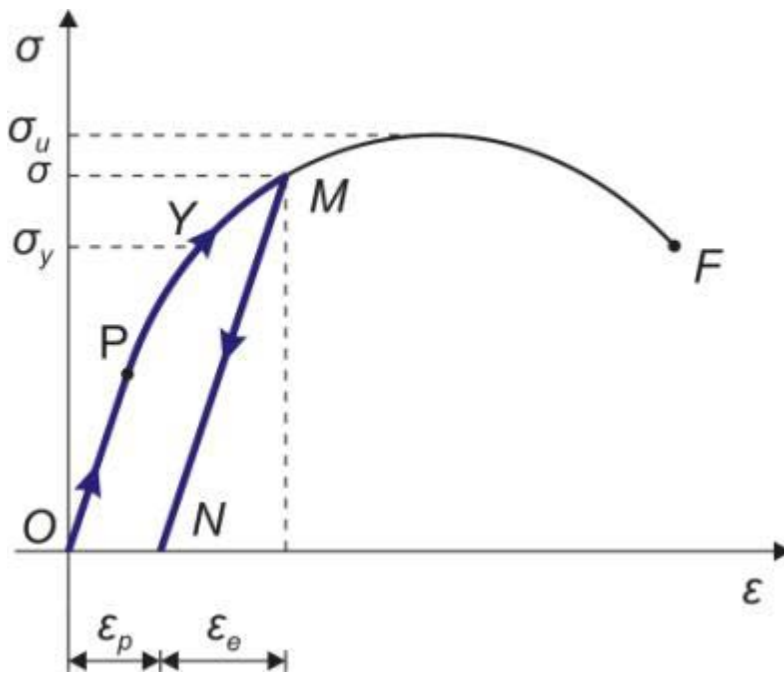


Διάγραμμα 6.1.1: Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του χάλυβα AH36 όπως προκύπτει από τα πειράματα που έγιναν στο AIMEN της Ισπανίας

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, εφόσον διαθέτουμε το συγκεκριμένο διάγραμμα θα εργαστούμε διαφορετικά από την περίπτωση του κοινού χάλυβα. Πιο συγκεκριμένα, δεν θα μοντελοποιήσουμε την πλαστική περιοχή του ως γραμμικά κρατυνόμενη στο περιβάλλον του κώδικα *LS – DYNA*. Γνωρίζοντας πως ο κώδικας βάση του υλικού που έχει επιλεγεί (*MAT_24) δέχεται την εισαγωγή ζευγών τιμών τάσεων – παραμενουσών παραμορφώσεων, θα επιλέξουμε από το παραπάνω διάγραμμα κάποια ζεύγη τα οποία θα προσομοιάσουν όσο καλύτερα γίνεται την πλαστική περιοχή της καμπύλης μας.

Από το παραπάνω διάγραμμα, φαίνεται ότι η τιμή της τάσης διαρροής στο όριο διαρροής είναι περίπου 391.32 MPa . Το 1^ο σημείο επομένως που θα εισαχθεί στον κώδικά μας είναι αυτό με μηδενική παραμόρφωση και τάση 391.32 MPa .

Για την επιλογή των υπόλοιπων σημείων, πρέπει να θυμηθούμε ότι ο κώδικας δέχεται μόνο τις πραγματικές παραμένουσες παραμορφώσεις και τις πραγματικές τάσεις. Για αρχή λοιπόν βάσει του διαγράμματος, επιλέγουμε τις συμβατικές τιμές των τάσεων και παραμενουσών παραμορφώσεων. Για να γίνει αυτό σύμφωνα με τη θεωρία, αφού επιλέξουμε ένα σημείο στην παραπάνω καμπύλη, φέρνουμε μία κάθετη στον άξονα των τάσεων για να δούμε σε ποια συμβατική τάση αντιστοιχεί. Στη συνέχεια δεν κάνουμε το ίδιο για τις παραμορφώσεις, καθώς μία κάθετη στον άξονα των παραμορφώσεων αντιστοιχεί στην τιμή εκείνη που είναι το άθροισμα της παραμένουσας και της ελαστικής παραμόρφωσης όπως προαναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2. Για να βρούμε την τιμή της παραμένουσας παραμόρφωσης, από το σημείο της καμπύλης που επιλέχθηκε, φέρνουμε μία ευθεία παράλληλη στην ελαστική-γραμμική περιοχή όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1.1. Το σημείο τομής της ευθείας αυτής με τον άξονα των παραμορφώσεων, αντιστοιχεί στην παραμένουσα παραμόρφωση και συγκεκριμένα στην συμβατική παραμένουσα παραμόρφωση.



Σχήμα 6.1.1: Αποφόρτιση στην πλαστική περιοχή

Οι τιμές όπως προέκυψαν φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 6.1.1. Σωστό θα ήταν να αναφερθεί πως η τελευταία τιμή αντιστοιχεί στο UTS σημείο της καμπύλης.

Πίνακας 6.1.1: Πίνακας συμβατικών τιμών τάσεων – παραμενουσών παραμορφώσεων

σ (MPa)	ϵ
391.32	0
413.04	0.0341
476.98	0.0879
495.69	0.1197
512.17	0.15
526.09	0.2114
530.43	0.2394

Για την μετατροπή των συμβατικών τιμών σε πραγματικές θα εργαστούμε σύμφωνα με τη διαδικασία που αναφέρθηκε και πάλι στο κεφάλαιο 2. Μετά τις μετατροπές, τα ζεύγη τιμών όπως προέκυψαν παρατίθενται στον παρακάτω Πίνακα 6.1.1. Οι τιμές αυτές θα εισαχθούν στον κώδικα του *LS – DYNA*.

Πίνακας 6.1.2: Πίνακας πραγματικών τιμών τάσεων – παραμενουσών παραμορφώσεων

σ_{real} (MPa)	ϵ_{real}
391.32	0
427.1247	0.033531
518.9065	0.084249
555.0241	0.113061
588.9955	0.139762
637.3054	0.191777
657.4149	0.214627

Έχοντας μοντελοποιήσει λοιπόν την πλαστική περιοχή του υλικού μας, για την ελαστική περιοχή επιλέγονται και πάλι οι τιμές που επιλέχθηκαν στο Κεφάλαιο 2. Πιο συγκεκριμένα για τον λόγο Poisson η τιμή $\nu = 0.3$, για το μέτρο ελαστικότητας $E = 207 \text{ GPa}$ και για την πυκνότητα 7830 kg/m^3 . Η μόνη διαφορά έγκειται στην τιμή της τάσης διαρροής η οποία όπως προαναφέρθηκε είναι ίση με 391.32 MPa .

Τέλος, λαμβάνεται υπόψιν και η επιρροή του ρυθμού παραμόρφωσης, χρησιμοποιώντας τις ίδιες τιμές των παραμέτρων C και p .

6.2 Μοντελοποίηση ελασμάτων, παλμού και επιλογή πλέγματος

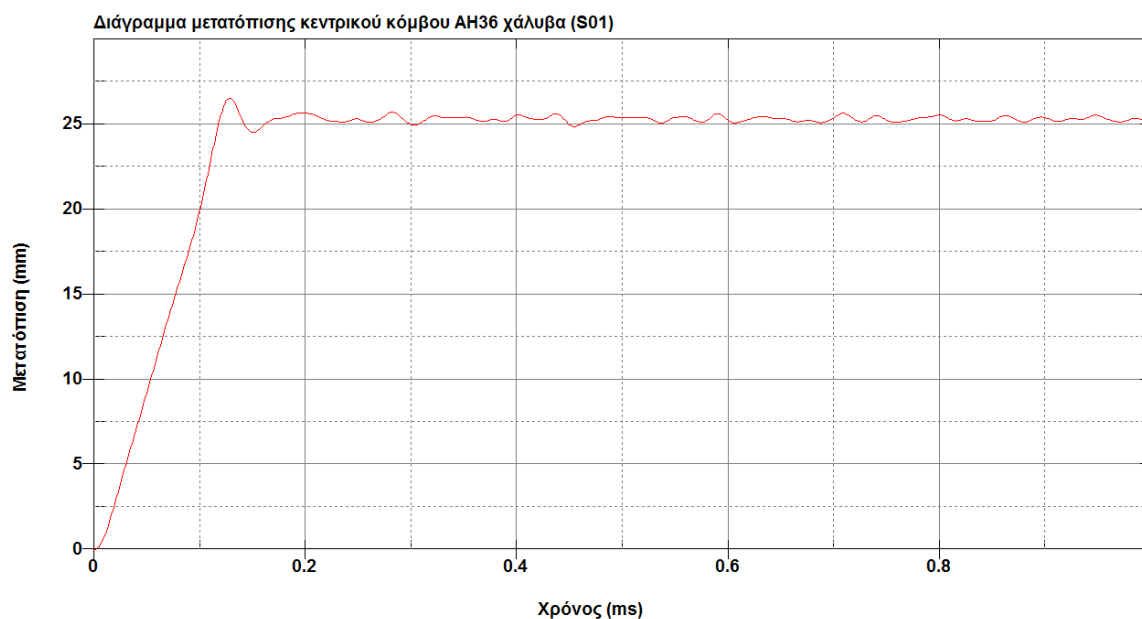
Στη συγκεκριμένη υποενότητα, δεν θα γίνει κάποια ιδιαίτερη ανάλυση. Θέλοντας ουσιαστικά να συγκρίνουμε τα δύο είδη χαλύβων, δεν κρίνεται σωστό να αλλάξουμε κάποια άλλη μεταβλητή στον κώδικα που έχουμε ήδη δημιουργήσει και αναλύσει στο Κεφάλαιο 4. Αν αλλάζαμε περισσότερες από μία παραμέτρους, δεν θα ξέραμε με βεβαιότητα ποια επηρέασε το αποτέλεσμά μας και με ποιόν τρόπο.

Σύμφωνα με τα παραπάνω λοιπόν, θα διεξάγουμε τη συγκεκριμένη μελέτη βασιζόμενοι στη μοντελοποίηση των πειραμάτων με κωδικό S56 και S01. Πιο συγκεκριμένα, το πλέγμα θα παραμείνει όπως ήταν 84x84, ο παλμός θα παραμείνει ο ίδιος για το εκάστοτε πείραμα (31 $N \cdot s$ για το S56 και 43,4 $N \cdot s$ για το S01), η μοντελοποίηση των στοιχείων και ο τύπος του υλικού δεν θα αλλάξουν επίσης. Το μόνο στοιχείο που θα αλλάξει είναι το ίδιο το υλικό (όχι ο τύπος), το οποίο θα είναι αυτό που αναφέρθηκε στην υποενότητα 6.1.

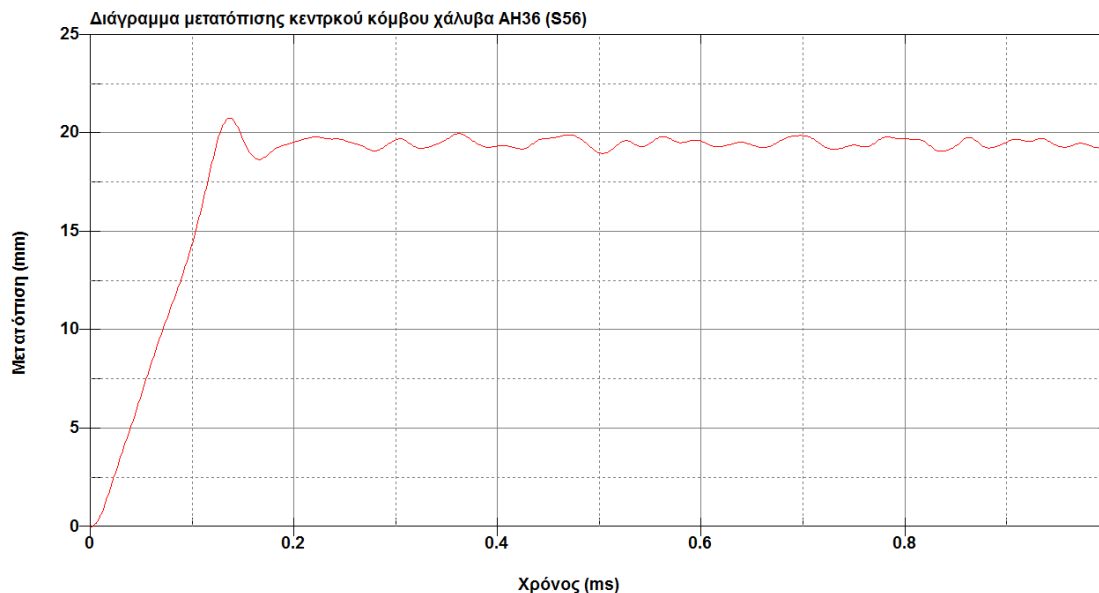
Τέλος, η μελέτη της επιρροής του υλικού θα διεξαχθεί μόνο στις περιπτώσεις των πειραμάτων με κωδικό S56 και S01, δηλαδή στα ελάσματα χωρίς ενισχύσεις. Στα ελάσματα με ενισχύσεις δε θα γίνει κάποια διερεύνηση, καθώς τα συμπεράσματα που θα βγουν είναι παρεμφερή με αυτά που θα προκύψουν από τη μελέτη των μη ενισχυμένων ελασμάτων, δηλαδή στο πως επηρεάζει το υλικό την κατασκευή.

6.3 Αποτελέσματα και σύγκριση με κοινό χάλυβα

Τα αποτελέσματα όπως προέκυψαν από την αριθμητική ανάλυση φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα για τα πειράματα με κωδικό S01 (Διάγραμμα 6.3.1) και S56 (Διάγραμμα 6.3.2) αντίστοιχα.



Διάγραμμα 6.3.1: Διάγραμμα μετατόπισης κεντρικού κόμβου σε συνάρτηση με το χρόνο για τον χάλυβα υψηλής αντοχής AH36 στο πείραμα S01



Διάγραμμα 6.3.2: Διάγραμμα μετατόπισης κεντρικού κόμβου σε συνάρτηση με το χρόνο για τον χάλυβα υψηλής αντοχής AH36 στο πείραμα S56

Βάσει των παραπάνω διαγραμμάτων, παρατηρούμε ότι η μέγιστη μετατόπιση δεν ταυτίζεται με την μόνιμη μετατόπιση. Για το πείραμα με κωδικό S01 η μέγιστη μετατόπιση είναι 26.55 mm και η μόνιμη μετατόπιση είναι περίπου 25.22 mm, ενώ για το πείραμα με κωδικό S56 η μέγιστη μετατόπιση είναι 20.79 mm και η μόνιμη περίπου 19.34 mm.

Επίσης, ενώ το κέντρο του ελάσματος φτάνει σε μέγιστη μετατόπιση σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, περίπου στα 0,13-0,14 ms ή στα 130-140 μs και για τις δύο περιπτώσεις, η ίδια συνεχίζει να ταλαντώνεται μέχρι την απόσβεση της ταλάντωσης η οποία συμβαίνει πολύ αργότερα σε σχέση με τον χρόνο που επιτυγχάνεται η μέγιστη μετατόπιση.

Στους παρακάτω δύο πίνακες περιέχονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των υλικών ως προς τη μετατόπιση του κεντρικού κόμβου. Ο πρώτος Πίνακας 6.3.1 αφορά το πείραμα με κωδικό S01 και ο δεύτερος Πίνακας 6.3.2 το πείραμα με κωδικό S56.

Πίνακας 6.3.1: Πίνακας σύγκρισης αποτελεσμάτων μετατόπισης κεντρικού κόμβου μεταξύ κοινού χάλυβα και χάλυβα υψηλής αντοχής AH36 για το πείραμα S01

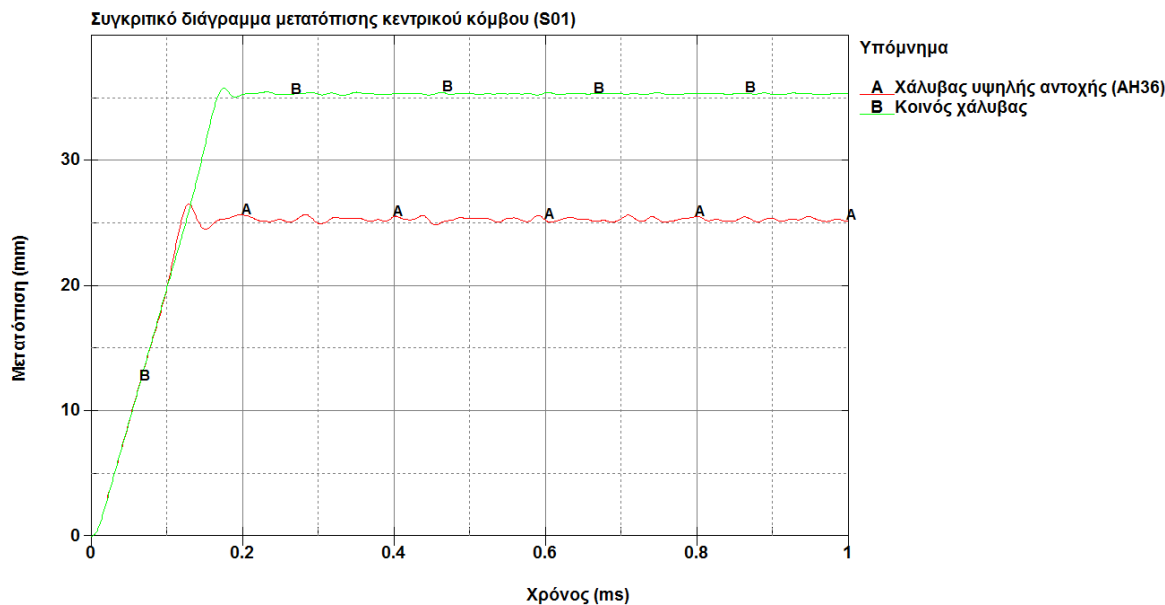
	Σύγκριση χαλύβων για το πείραμα S01	
	Κοινός χάλυβας	AH36 χάλυβας
Μόνιμη	35.42	25.22
Μέγιστη	35.83	26.55
Απόκλιση Μόνιμης	-	-28.80%
Απόκλιση Μέγιστης	-	-25.90%

Πίνακας 6.3.2: Πίνακας σύγκρισης αποτελεσμάτων μετατόπισης κεντρικού κόμβου μεταξύ κοινού χάλυβα και χάλυβα υψηλής αντοχής ΑΗ36 για το πείραμα S56

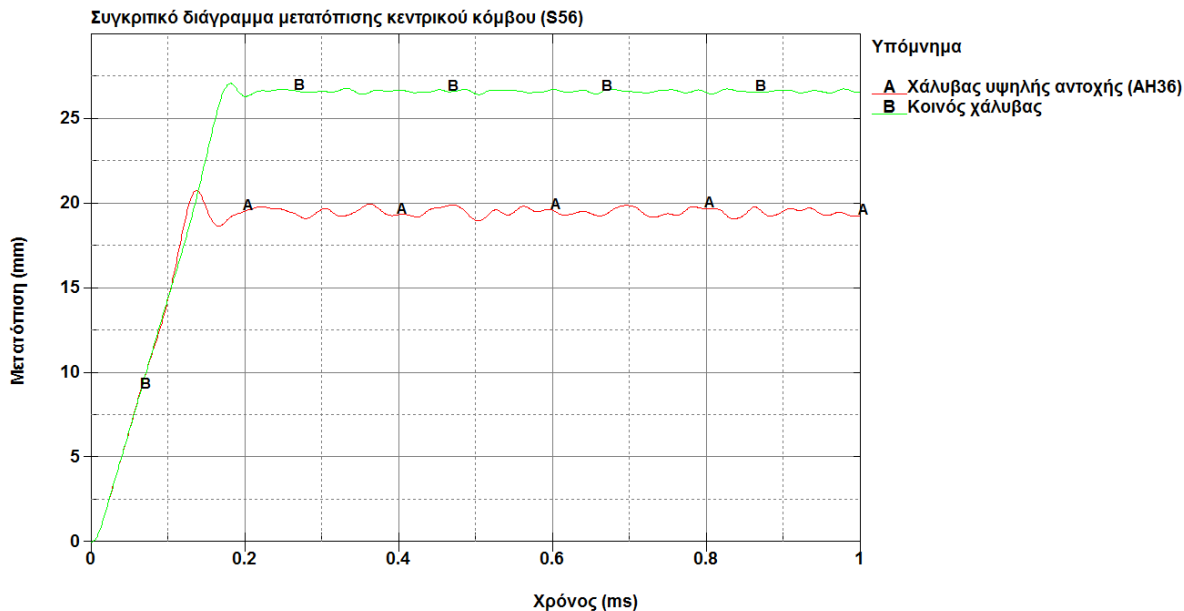
	Σύγκριση χάλυβων για το πείραμα S56	
	Κοινός χάλυβας	ΑΗ36 χάλυβας
Μόνιμη	26.58	19.34
Μέγιστη	27.11	20.79
Απόκλιση Μόνιμης	-	-27.24%
Απόκλιση Μέγιστης	-	-23.31%

Παρατηρούμε ότι έχουμε αναμενόμενα αποτελέσματα. Ο χάλυβας υψηλής αντοχής έχει μικρότερη μετατόπιση κεντρικού κόμβου από τον κοινό χάλυβα, άρα παρατηρείται μικρότερη παραμόρφωση στο έλασμα. Η μόνιμη παραμόρφωση του πειράματος με κωδικό S01 για το χάλυβα ΑΗ36 είναι κατά 28.80% μικρότερη από αυτή του κοινού χάλυβα ενώ στο πείραμα με κωδικό S56 η μετατόπιση είναι κατά 27.24%.

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα μετατόπισης κεντρικών κόμβων και για τους δύο τύπους χάλυβα ταυτόχρονα. Το Διάγραμμα 6.3.3 για το πείραμα με κωδικό S01 και το Διάγραμμα 6.3.4 για το πείραμα με κωδικό S56.



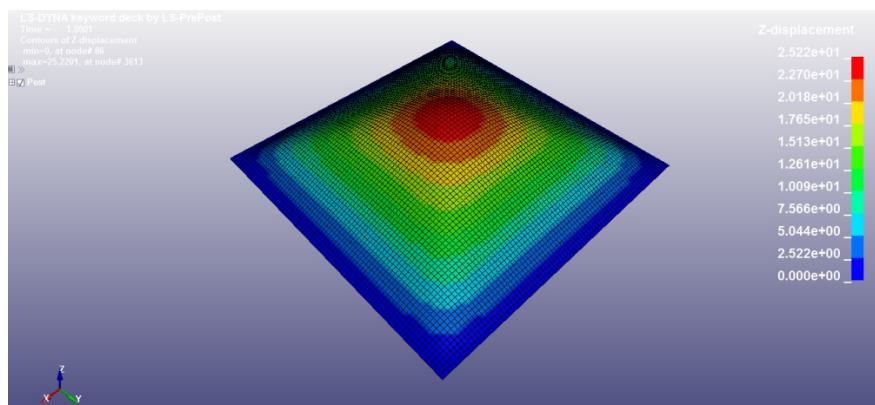
Διάγραμμα 6.3.3: Συγκριτικό διάγραμμα μετατόπισης κεντρικού κόμβου μεταξύ κοινού χάλυβα και χάλυβα υψηλής αντοχής για το πείραμα με κωδικό S01



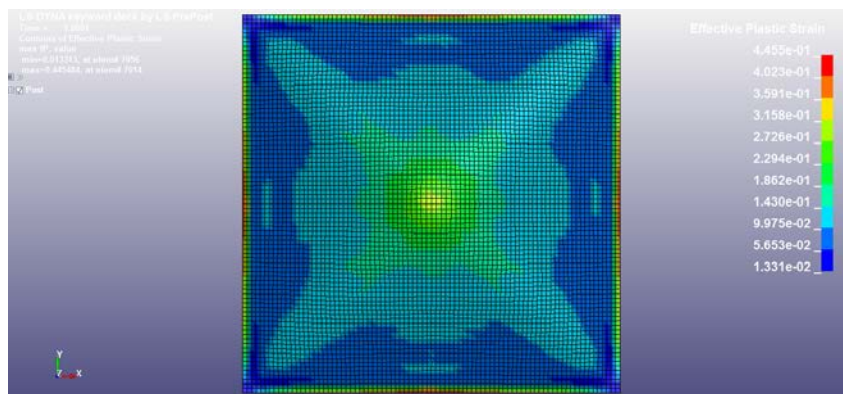
Διάγραμμα 6.3.4: Συγκριτικό διάγραμμα μετατόπισης κεντρικού κόμβου μεταξύ κοινού χάλυβα και χάλυβα υψηλής αντοχής για το πείραμα με κωδικό S56

Αυτό που παρατηρείται και στα δύο διαγράμματα, πέρα από τις μικρότερες σε μέγεθος τιμές όσον αφορά τις μετατοπίσεις, είναι ότι η μέγιστη μετατόπιση επιτυγχάνεται γρηγορότερα για τον χάλυβα υψηλής αντοχής (130-140 μs σε σχέση με τα 180-190 μs) και ότι η απόσβεση δεν είναι τόσο έντονη και τόσο ομαλή όσο στον κοινό ναυπηγικό χάλυβα.

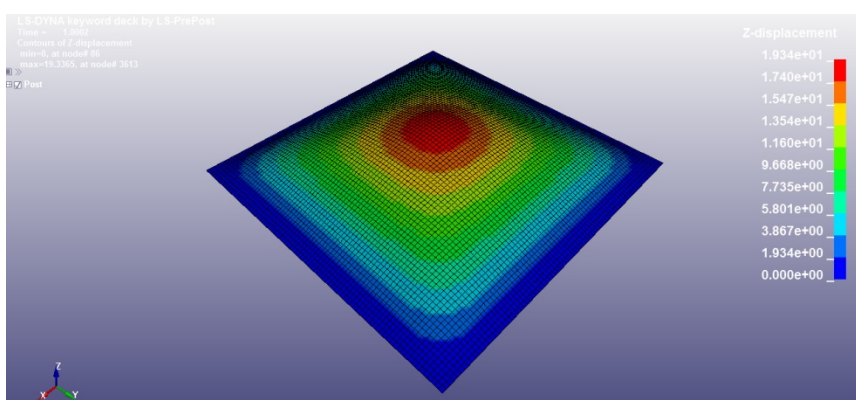
Τέλος παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιες εικόνες από την παραμόρφωση του ελασματος. Για το πείραμα S01 (Εικόνα 6.3.1 και Εικόνα 6.3.2) και S56 (Εικόνα 6.3.3 και Εικόνα 6.3.4) αντίστοιχα.



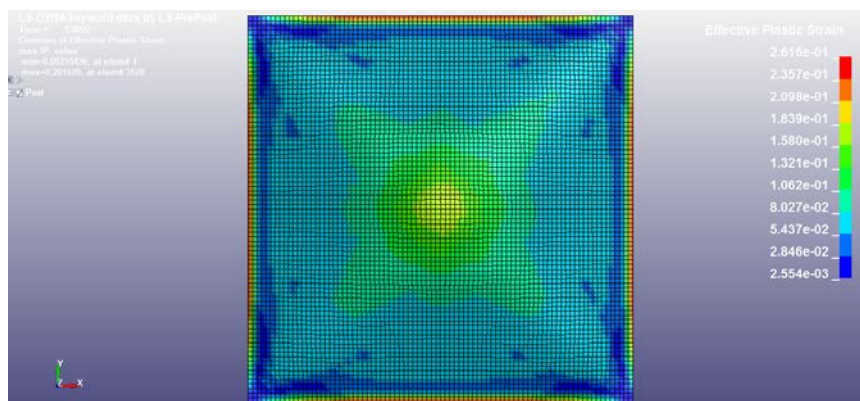
Εικόνα 6.3.1: Τελική μορφή ελασματος για 1000 μs με χάλυβα AH36 για το πείραμα με κωδικό S01



Εικόνα 6.3.2: Πλαστική παραμόρφωση ελάσματος για 1000 μs με χάλυβα ΑΗ36 για το πείραμα με κωδικό S01



Εικόνα 6.3.3: Τελική μορφή ελάσματος για 1000 μs με χάλυβα ΑΗ36 για το πείραμα με κωδικό S56



Εικόνα 6.3.4: Πλαστική παραμόρφωση ελάσματος για 1000 μs με χάλυβα ΑΗ36 για το πείραμα με κωδικό S56

Παρατηρούμε ότι η τελική μορφή ελάσματος για τον χάλυβα υψηλής αντοχής μοιάζει με αυτή του κοινού χάλυβα με μόνη διαφορά τη μόνιμη μετατόπιση, δηλαδή δεν είναι τόσο έντονη η κορυφή που δημιουργείται. Παράλληλα παρατηρούμε ότι η μέγιστη παραμόρφωση εμφανίζεται στα μέσα των πλευρών των ελασμάτων για το χάλυβα υψηλής αντοχής, όπως ακριβώς έγινε και στον κοινό χάλυβα. Το φαινόμενο αυτό στη προκειμένη περίπτωση είναι πιο έντονο για το πείραμα με κωδικό S56 σε σχέση με το πείραμα με κωδικό S01

Κεφάλαιο 7 Τελικά συμπεράσματα

Η συνεχής αύξηση της υπολογιστικής ισχύος των Η/Υ δίνει συνεχώς νέες δυνατότητες να χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων στην επίλυση προβλημάτων που είναι είναι πολύ δύσκολο έως αδύνατον να επιλυθούν αναλυτικά. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκε αρκετές δεκαετίες πριν, πλέον χρησιμοποιείται ευρέως για μεγάλης κλίμακας μη γραμμικά προβλήματα, ενώ όσο αυξάνεται το μέγεθος και η πολυπλοκότητα της κατασκευής που αναλύεται, τόσο απαιτούνται ισχυρότεροι υπολογιστές. Ακόμα περισσότερη ισχύ απαιτείται για δυναμικά προβλήματα που εμπλέκουν μη γραμμικότητες λόγω γεωμετρίας και υλικού, ως αυτό που εξετάζεται σε αυτή την εργασία.

Ανακεφαλαιώνοντας, λοιπόν, στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετήθηκε η απόκριση των ελασμάτων του πυθμένα του πλοίου σε φορτία σφυρόκρουσης. Τα φορτία της σφυρόκρουσης θεωρήθηκαν ως κρουστικά και αυτό αποτέλεσε τη βάση για τη σύνδεσή που πραγματοποιήθηκε με τα πειραματικά δεδομένα, τα οποία προέρχονται από δοκιμές που έγιναν σε εργαστήρια με τη χρήση εκρηκτικών μηχανισμών. Ως εκ τούτου, γίνεται μία απόπειρα προσομοίωσης του φαινομένου της σφυρόκρουσης των πλοίων με έναν διαφορετικό τρόπο, καθώς αφενός παραλείπεται το υδροδυναμικό κομμάτι του φαινομένου και αφετέρου τα ελάσματα, τα οποία μελετώνται, αποτελούν ελάσματα μικρών διαστάσεων και όχι κανονικών διαστάσεων πλοίου.

Η ανάλυση του προβλήματος γίνεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Για τους υπολογισμούς στον Ηλεκτρονικό Υπολογιστή χρησιμοποιείται το υπολογιστικό πακέτο πεπερασμένων στοιχείων *LS – DYNA* της *LSTC*. Πρόκειται για ένα ευρέως διαδομένο, για τέτοιου είδους προβλήματα, πακέτο, το οποίο επιλέχθηκε με κριτήριο τη δυνατότητα που έχει στην επίλυση δυναμικών προβλημάτων. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν συγκρίθηκαν με τα πειραματικά δεδομένα.

Κατά το μεγαλύτερο μέρος της εν λόγω εργασίας, η μελέτη έγινε πάνω στο υλικό που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία, το οποίο είναι ο κοινός χάλυβας, ένα υλικό που χρησιμοποιείται ευρέως και κατά τη ναυπήγηση των πλοίων. Ωστόσο, στο τέλος της εργασίας πραγματοποιήθηκε μία μικρή διερεύνηση και για έναν ακόμα τύπο υλικού, αυτόν του χάλυβα υψηλής αντοχής.

Το πρώτο κομμάτι της ανωτέρω έρευνας αφορούσε ελάσματα χωρίς ενίσχυση. Στο σημείο αυτό, πρέπει να επισημανθεί ότι η μοντελοποίηση των ελασμάτων στο περιβάλλον του *LS – DYNA* επαληθεύτηκε, καθώς η σύγκριση των αποτελεσμάτων του κώδικα με τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρουσίαζε πολύ μικρές αποκλίσεις. Στο ίδιο κομμάτι διερευνήθηκε, ακόμη, η επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης καθώς και η επίδραση του σχήματος του παλμού στη διαμόρφωση του τελικού αποτελέσματος. Τα συμπεράσματα που διεξήχθησαν ήταν τα εξής: αφενός είναι απαραίτητη η χρήση του ρυθμού παραμόρφωσης στην διαδικασία της μοντελοποίησης ενώ αφετέρου το σχήμα του παλμού δεν επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό το αποτέλεσμα μας.

Στη συνέχεια, η μελέτη επεκτάθηκε σε ελάσματα με ενισχύσεις, σε μία προσπάθεια προσομοίωσης των νομέων και των σταθμίδων που διαθέτουν τα πλοία στο εσωτερικό της γάστρας τους για την στήριξη των ελασμάτων αυτής. Τα ελάσματα με τις ενισχύσεις προέρχονταν από την ίδια πειραματική διαδικασία και ήταν τριών ειδών: μονής ενίσχυσης,

ενίσχυσης σε σχήμα σταυρού και ενίσχυσης σε σχήμα διπλού σταυρού. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το ίδιο με αυτό της περίπτωσης των ελασμάτων χωρίς ενίσχυση. Τα αποτελέσματά του δεν ήταν στην ολότητά τους σύμφωνα με τα πειραματικά. Υπήρχαν αποκλίσεις αποδεκτές, μερικώς αποδεκτές αλλά και αποκλίσεις μη αποδεκτές. Ωστόσο, η μοντελοποίηση δεν άλλαξε καθώς θεωρήθηκε σκόπιμο να μην υπάρχουν διαφορές στον κώδικα ανάμεσα στα ελάσματα με και χωρίς ενίσχυση. Επίσης, όσον αφορά τα αποτελέσματα κατέστη σαφές ότι η μετατόπιση των κεντρικών κόμβων ελαττώθηκε με την παρουσία των ενισχύσεων, κυρίως για τις ενισχύσεις σε σχήμα σταυρού σε σχήμα διπλού σταυρού ενώ η μονή ενίσχυση δεν επηρέασε σε μεγάλο βαθμό το τελικό αποτέλεσμα.

Στο τέλος, όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, διεξήχθη σχετική έρευνα πάνω σε έναν διαφορετικό τύπο χάλυβα, τον ναυπηγικό χάλυβα ΑΗ36 υψηλής αντοχής. Η μελέτη αφορούσε μόνο τα ελάσματα χωρίς ενισχύσεις καθώς στόχος μας ήταν να επιβεβαιώσουμε ότι η μετατόπιση των κεντρικών κόμβων και η παραμόρφωση των ελασμάτων θα ήταν μικρότερη από την περίπτωση του κοινού χάλυβα. Τα αποτελέσματά επαλήθευσαν την αρχική μας ιδέα.

Πιο αναλυτικά, επιμέρους συμπεράσματα και παρατηρήσεις αναφέρονται σε όλη την έκταση της εργασίας.

Η συνέχεια της παραπάνω μελέτης, θα μπορούσε μελλοντικά να εφαρμοστεί με παρόμοιο τρόπο σε μεγαλύτερης κλίμακας ελάσματα τα οποία θα έχουν σχεδιαστεί με βάση τις προδιαγραφές των πλοίων, με νομείς και σταθμίδες, οι οποίες με τη σειρά τους θα πληρούν τις προδιαγραφές που επιβάλλουν οι νηογνώμονες. Ως εκ τούτου, η παρούσα εργασία θα μπορούσε να αποτελέσει μία αφετηρία για την επιβολή πραγματικών φορτίων σφυρόκρουσης πάνω στα προαναφερθέντα ελάσματα, για να γίνει μία πιο αντιπροσωπευτική μελέτη του φαινομένου της σφυρόκρουσης.

Παρόλα ταύτα, το ζήτημα της σφυρόκρουσης των πλοίων παραμένει από τη φύση του ένα ιδιαίτερο πρόβλημα προς επίλυση και προς ερμηνεία λόγω της περιπλοκότητάς του και της δυσκολίας της πρόβλεψής του. Θα αποτελεί πάντα πόλο έλξης τόσο για τους επιστήμονες όσο και για τους φοιτητές, κατά το μέτρο που αφορά τη διεξαγωγή εργασιών όχι μόνο σε επίπεδο διπλωματικής, αλλά και σε επίπεδο μεταπτυχιακής και διδακτορικής διατριβής.

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση

- [1] Joint Accident Investigation Commission, 1997. *Final report on the capsizing on 28 September 1994 in the Baltic sea of the ro-ro passenger vessel MV Estonia*. Helsinki, Finland: Edita books.
- [2] Marine Accident Investigation Branch (MAIB), 2008. *Report on the investigation of the structural failure of MSC Napoli, English Channel on 18 January 2007*. Southampton, UK: MAIB.
- [3] T. Von Karman, 1929. *The Impact on Seaplane Floats during Landing*. Washington: NACA TN321 .
- [4] H. Wagner, 1932. *Über Stoß- und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten*, *Zeitsch. Angew. Math. Mech.* 12 (4) pp.193–235.
- [5] Dobrovól'skaya, Z. N, 1969. *On some problems of similarity flow of fluid with a free surface*. *J. Fluid Mech.* **36**, pp. 805–829.
- [6] Cointe, R. & Armand, J. L, 1987. *Hydrodynamic impact analysis of a cylinder*. *J. Offshore Mech. Arctic Eng.* **109**, pp.237–243
- [7] Greenhow, M. & Lin, W.-M. 1985 Numerical simulation of non-linear free surface flows generated by wedge entry and wavemaker motions. In *Proc. 4th Int. Conf. on Numerical Ship Hydrodynamics, Washington, DC, 24–27 September 1985*.
- [8] Zhao, R. & Faltinsen, O. M, 1993. *Water entry of 2-dimensional bodies*. *J. Fluid Mech.* **246**, pp.593–612.
- [9] Zhao, R., Faltinsen, O. M. & Aarsnes, J. V, 1996. *Water entry of arbitrary 2-dimensional sections with and without flow separation*. In *Proc. 21th Symp. on Naval Hydrodynamics, Trondheim, Norway, 24–28 June 1996*. Washington, DC: National Academy Press.
- [10] Kvålvold, J., Svenson, T. & Hovem, L, 1996. *Bow impact loads on ro-ro vessels*. In *Proc. RINA Spring Meeting, London, UK, 24 April 1996*. London, UK: RINA
- [11] Shan Wang, 2011. *Assessment of slam induced loads on two dimensional wedges and ship sections*. Lisbon
- [12] Ochi, M. K, 1964. *Prediction of occurrence and severity of ship slamming at sea*. In *Proc. 5th Symp. on Naval Hydrodynamics, Bergen, Norway*. Washington, DC: National Academy Press.
- [13] Ochi, M. K, 1964. *Extreme behavior of a ship in rough seas: slamming and shipping of green water*. In *SNAME Annual Meeting, New York, NY*.
- [14] Ochi, M. K. & Motter, L. E, 1971. *A method to estimate slamming characteristics for ship design*. *Mar. Technol.* **8**, pp.219–232.
- [15] Ochi, M. K. & Motter, L. E, 1973. *Prediction of slamming characteristics and hull responses for ship design*. *Trans. SNAME* **81**, pp.144–176.
- [16] Lewis, S. G., Hudson, D. A., Turnock, S. R. & Taunton, D. J, 2010, *Impact of a free-falling wedge with water: synchronized visualization, pressure and acceleration measurements*. *Fluid Dyn. Res.* **42**, pp.1–30.
- [17] S.Chung Kim Yuen, G.N.Nurick, 2005. *Experimental and numerical studies on the response of quadrangular stiffened plates. Part I: subjected to uniform blast load*. *International Journal of Impact Engineering*. Vol 31, pp. 55-83.
- [18] Johnson GR, Cook WH.A. 1983. *Constitutive model and data for metals subjected to large strain, high strain rates and high temperatures*. *Proceedings of the Seventh Symposium on Ballistic*. Hague, Netherlands. pp.541–7.
- [19] LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL
- [20] Shengrun Shi, 2014. *Evaluating the Structural Integrity of High Strength Low Alloy Steels Considered for Shipbuilding Using Acoustic Emission*. Birmingham, England. pp.71-72

Ελληνόγλωσση

- [21] Γιάννης Δ. Χρυσουλάκης, Δημήτρης Ι. Παντέλης, 2008. *Επιστήμη και τεχνολογία των μεταλλικών υλικών*. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου
- [22] Δημήτριος Ε. Μανωλάκος, 2008. *Κατεργασίες Ι. Πρόχειρες σημειώσεις*. Αθήνα: Εκδόσεις Πολυτεχνείου
- [23] Ευάγγελος Στάνιος, 2012. *Μελέτη της απόκρισης ενισχυμένων ελασμάτων πυθμένα πλοίου σε δυναμικά φορτία σφυρόκρουσης*. Αθήνα