



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΜΕΤΑΛΛΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Metallic energy absorbing system

Experimental and numerical study

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, Δ.Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ Ν. ΝΟΤΑΡΑΣ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2015

**Η παρούσα διπλωματική εργασία αφιερώνεται στους γονείς μου,
Νικόλαο και Γεωργία.**

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	1
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	4
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	4
1.1. Γενικά περί αξονικής κατάρρευσης.....	4
1.2. Θεωρητικό υπόβαθρο αξονικής κατάρρευσης ορθογωνικών διατομών.....	6
1.3. Μαθηματικό μοντέλο αξονικής κατάρρευσης.....	8
1.4. Ενεργό μήκος κατάρρευσης.....	11
1.5. Δημιουργία λοβών και είδη παραμορφώσεων.....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	18
2. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	18
2.1. Χρησιμότητα της μεθόδου σε σύγχρονες εφαρμογές.....	18
2.2. Διαδικασία μοντελοποίησης και ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.....	18
2.3. Είδος της ανάλυσης.....	20
2.4. Είδη πεπερασμένων στοιχείων.....	21
2.5. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων και το LS-DYNA.	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	23
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	23
3.1. Πειραματική διαδικασία. Διεξαγωγή των πειραμάτων στο Εργαστήριο.....	23
3.2. Ο κώδικας μοντελοποίησης με πεπερασμένα στοιχεία LS-DYNA 3D.....	25
3.3. Γενικά χαρακτηριστικά, δυνατότητες και τυπικές χρήσεις του LS-DYNA 3D.....	26
3.4. Βασικές πληροφορίες για τη διακριτοποίηση και τη δημιουργία του μοντέλου.....	27
3.5. Αποθήκευση, εξαγωγή και επεξεργασία του υπολογιστικού μοντέλου. Εξαγωγή αποτελεσμάτων.....	30

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	31
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	31
4.1. Εισαγωγικά στοιχεία και παρουσίαση των διαφόρων διατάξεων.....	31
4.2. Γενικά συγκριτικά χαρακτηριστικά του πειράματος με την προσομοίωση. Προσεγγίσεις και παραδοχές.....	33
4.3. Πείραμα και προσομοίωση για το μονό δοκίμιο (1).....	34
4.4. Πείραμα και προσομοίωση για την διάταξη τεσσάρων σωλήνων τοποθετημένων σε ορθή θέση (2).....	42
4.5. Πείραμα και προσομοίωση για την διάταξη τεσσάρων σωλήνων τοποθετημένων υπό γωνίες 0^0 και 10^0 (3).....	52
4.6. Πείραμα και προσομοίωση για την διάταξη τεσσάρων σωλήνων τοποθετημένων υπό γωνίες 0^0 και 20^0 (4).....	61
4.7. Πείραμα και προσομοίωση για την διάταξη τεσσάρων σωλήνων τοποθετημένων υπό γωνίες 0^0 και 30^0 (5).....	71
4.8. Πείραμα και προσομοίωση για την διάταξη τεσσάρων σωλήνων τοποθετημένων υπό γωνίες 10^0 και 10^0 (6).....	81
4.9. Πείραμα και προσομοίωση για την διάταξη τεσσάρων σωλήνων τοποθετημένων υπό γωνίες 20^0 και 20^0 (7).....	91
4.10. Πείραμα και προσομοίωση για την διάταξη τεσσάρων σωλήνων τοποθετημένων υπό γωνίες 30^0 και 30^0 (8).....	101
4.11. Σύγκριση μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών τιμών για το μέσο, μέγιστο φορτίο και ενέργειας που καταναλώθηκε. Σχόλια και συμπεράσματα.....	110
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	113
5. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ,,113	
5.1. Εισαγωγικά στοιχεία.....	113
5.2. Παρουσίαση των τελικών στιγμιότυπων των διατάξεων (2),(3),(4),(5),(6)(7),(8).....	114
5.3. Παρουσίαση και σύγκρισή των φορτίων και της ενέργειας απορρόφησης των διατάξεων (2-3-4-5-6-7-8).....	120
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	123

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, τον Ιούλιο του 2015, με σκοπό την απόκτηση του διπλώματος του Μηχανολόγου Μηχανικού του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Η εργασία αυτή ασχολείται με την πειραματική και αριθμητική προσομοίωση της αξονικής κατάρρευσης συστημάτων (διατάξεων) από τέσσερεις χαλύβδινους σωλήνες ορθογωνικής διατομής με τοιχώματα λεπτού πάχους, τοποθετημένους κάθε φορά σε διαφορετικές γωνίες ως προς τον κατακόρυφο άξονα της διάταξης. Στα πλαίσια της εργασίας μελετάται η επίδραση της αλλαγής της γωνίας τοποθέτησης στα αξονικά θλιπτικά φορτία που αναπτύσσονται.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία γενική αναφορά στη θεωρία, στο μαθηματικό υπόβαθρο και στους βασικούς όρους που σχετίζονται με την αξονική κατάρρευση λεπτότοιχων κελυφών τετραγωνικής και ορθογωνικής διατομής.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται βασικά θεωρητικά στοιχεία, που αφορούν τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, πάνω στην οποία βασίζεται η αριθμητική προσομοίωση που διεξάγεται στην παρούσα εργασία.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση της διεξαγωγής των πειραμάτων. Στη συνέχεια αναφέρετε η διαδικασία που ακολουθήθηκε για να επιτύχουμε την προσομοίωση της αξονικής κατάρρευσης και να εξάγουμε τα απαραίτητα αποτελέσματα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας κατάρρευσης με τα αντίστοιχα υπολογιστικά μοντέλα, για όλες τις διατάξεις δοκιμίων που εξετάζονται. Η σύγκριση γίνεται ως προς τον τρόπο κατάρρευσης και την εξέλιξη του αξονικού φορτίου θλίψης, εστιάζοντας στη μέση και στη μέγιστη τιμή που αυτό εμφανίζει.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται συγκριτική ανάλυση κατάρρευσης μεταξύ όλων των διατάξεων. Μέσα από αυτή τη σύγκριση, επιδιώκουμε να εξετάσουμε το πώς αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν το αξονικό φορτίο θλίψης. Στο τέλος του κεφαλαίου συμπεριλαμβάνονται ορισμένα απαραίτητα σχόλια και συμπεράσματα.

Ακολουθεί, στο τέλος της εργασίας, το σύνολο των πηγών βιβλιογραφίας που χρησιμοποιήθηκαν και περιλαμβάνουν το γνωστικό υλικό του αντικειμένου που εξετάζεται.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Δημήτριο Ε. Μανωλάκο, για την εμπιστοσύνη και εκτίμηση που επέδειξε προς το πρόσωπό μου, αναθέτοντάς μου την εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, όπως επίσης και για την πολύτιμη συνεργασία και υποστήριξη που μου παρείχε, στην προσπάθεια που κατέβαλα τόσο για την περάτωση της εργασίας όσο και για την υπερπήδηση των κάθε είδους δυσκολιών που ανέκυψαν κατά την εκπόνησή της.

Επιπλέον, ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζονται προς το διδάκτορα και μέλος Ε.Ε.ΔΙ.Π. κ. Πρωτεσίλαο Κωστάζο, ο οποίος επέδειξε, καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, απεριόριστη συμπαράσταση σε θέματα που αφορούν την πειραματική διαδικασία, τη χρήση του λογισμικού, αλλά και την ανάλυση και το σχολιασμό των αποτελεσμάτων από το πείραμα και τη διαδικασία μοντελοποίησης.

Τέλος, ευχαριστώ το μέλος Ι.Δ.Α.Χ. του τομέα κ. Μελισσά Νικόλαο, καθώς βοήθησε στη διαμόρφωση των δοκιμίων και στη διεξαγωγή των πειραμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.

1.1. Γενικά περί αξονικής κατάρρευσης.

Βρισκόμαστε πλέον στην εποχή, όπου η γρήγορη και ασφαλής μεταφορά αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας μας. Στις ανεπτυγμένες χώρες ο άνθρωπος προσπαθώντας να γλυτώσει χρόνο από οποιαδήποτε δραστηριότητα του, έχει βάλει τα μέσα μεταφοράς (ατομικά ή μαζικά) στον τρόπο ζωής του και γι' αυτό τον λόγο η επιστήμη και η τεχνολογία ακολουθούν αυτή την ανάγκη και την εξελίσσουν. Αυτή η ανάγκη, για μεταφορές με χαμηλό κόστος και ασφάλεια έχει οδηγήσει σε επενδύσεις και νέες καινοτομίες στις μεταφορές. Μια απ' αυτές είναι και η χρήση των ελασμάτων στον τομέα των μεταφορών, τα οποία χρησιμοποιούνται μεταξύ άλλων σε πλοία, αεροσκάφη, σιδηροδρομικές συγκοινωνίες και βέβαιος στα μηχανοκίνητα οχήματα.

Τα ατυχήματα πληθύνουν και δίστιχος όσο και να προχωράει η τεχνολογία είναι πολύ δύσκολο να τα περιορίσεις ή να τα αποτρέψεις καθώς σχεδόν πάντα εμπλέκεται στα αίτια ο παράγοντας του ανθρωπίνου λάθους, ο οποίος είναι σχεδόν απρόβλεπτος. Γι' αυτό τον λόγο υπάρχουν μηχανικοί που εργάζονται και παράγουν νέες ιδέες και τεχνολογίες, έχοντας ως δεδομένο πως το λάθος θα γίνει και θα εκτεθούν σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές καθώς και το περιβάλλον. Οπότε βασικός στόχος, εξαρτημένος πάντα απ' το κόστος, το βάρος την πολυπλοκότητα κατασκευής είναι η ασφάλεια στις μεταφορές. Πιο συγκεκριμένα τα θέματα ασφάλειας έχουν οδηγήσει τους μηχανικούς στην έρευνα και στην ανάπτυξη των απορροφητών ενέργειας με σκοπό την μείωση των επιπτώσεων της κρούσης σε ανθρώπους και δομές.

Τι είναι λοιπόν οι απορροφητές ενέργειας; Είναι δομικές διατάξεις οι οποίες έχουν την δυνατότητα μερικής ή ολικής απορρόφησης ενέργειας και μετατροπής της σε κάποιο άλλο είδος ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα στον τομέα των μεταφορών οι απορροφητές έχουν την δυνατότητα μερικής ή ολικής μετατροπής της κινητικής ενέργειας κατά την κούρση σε άλλη μορφή ενέργειας. Αυτή η διαδικασία μετατροπής ενέργειας μπορεί να είναι είτε αναστρέψιμη είτε μη αναστρέψιμη. Στην πρώτη περίπτωση αναφερόμαστε σε ελαστικές παραμορφώσεις ενώ στην δεύτερη σε πλαστικές παραμορφώσεις. Στόχος μας είναι να επιτυγχάνουμε όσο το δυνατό μη αναστρέψιμες παραμορφώσεις κατά την κούρση ώστε να ελαχιστοποιούνται οι ανθρωπίνι τραυματισμοί. Για να το καταφέρουν αυτό οι μηχανικοί χρησιμοποιούν σύνθετες διαμορφώσεις, γεωμετρίες, διατάξεις και υλικά με μεγάλη παραμορφωσιμότητα όπως για παράδειγμα ο χάλυβας [1],[2],[8],[9],[10].

Κατά την κατασκευή ενός μεταφορικού μέσου παρατηρούμε πως ο σκελετός δεν αποτελείτε μόνο από σωλήνες κυκλικής διατομής αλλά και από κελύφη ορθογωνικής και τετραγωνικής διατομής, τα οποία θα μας απασχολήσουν στην παρούσα εργασία, αφού κατά την μελέτη της απορρόφησης ενέργειας στα μεταφορικά μέσα μας ενδιαφέρει κατά κύριο λόγο ο σκελετός ο οποίος σχηματίζετε από μεταλλικά ελάσματα με κατάλληλη διαμόρφωση.

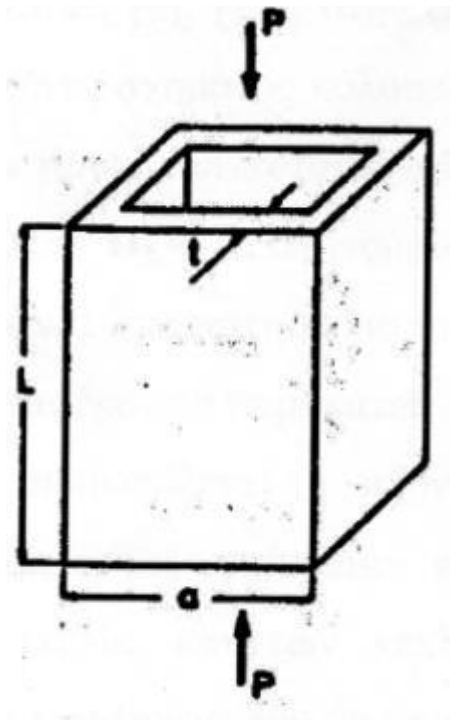
Τα κελύφη αυτά σχετίζονται σε μεγάλο βαθμό με τα χαρακτηριστικά απορρόφησης ενέργειας που παρουσιάζουν οι σωματοδομές των οχημάτων, των τρένων και των λεωφορείων. Για τον παραπάνω λόγο αξίζει να εξετάσουμε τον τρόπο με τον οποίο οι σωλήνες ορθογωνικής και τετραγωνικής διατομής συμπεριφέρονται όταν υποβληθούν σε μονοαξονική καταπόνηση.[11][12]

Οι σωλήνες ορθογωνικής και τετραγωνικής διατομής έπειτα από την διεξαγωγή μεγάλου αριθμού πειραμάτων, μας οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι ο εν γενεί πιο αποτελεσματικός τρόπος απορροφήσεις ενέργειας είναι η αξονική προοδευτική κατάρρευση ,επειδή η εφαρμογή της στους λεπτότοιχους σωλήνες εξασφαλίζει υψηλή ειδική απορρόφηση ενέργειας και με σχετικά ομαλή ελάττωση της παραμόρφωσης μετά την διαρροή. Η αξονική προοδευτική κατάρρευση επιτυγχάνεται κατά την κρούση μιας στιβαρής επιφάνειας πάνω στο σωλήνα η στο σύστημα σωλήνων, οι οποίοι, λόγω της κρούσης αυτής υφίστανται θλίψη. Η κρούση αυτή γίνεται κατά συγκεκριμένο άξονα , ο οποίος συνήθως είναι αυτός που είναι παράλληλος στην δύναμη της βαρύτητας (άξονας z). Οι ολοένα αυξανόμενες απατήσεις σε πιο ελαφριά και περισσότερο αποτελεσματικά δομικά στοιχεία ικανά να απορροφήσουν ενέργεια αποτελούν τον λόγο για τον οποίο οι συμπεριφορές αξονικής κατάρρευσης σε μεταλλικούς σωλήνες και κυρίως χαλύβδινους, όπως θα εξετάσουμε στην συνέχεια, έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον πολλών μηχανικών. [8]

Οι μεγάλες ταχύτητες των συγχρόνων μεταφορικών μέσων κάνουν εντονότερη την ανάγκη για εστίαση τόσο στην δυναμική πλαστική συμπεριφορά των απορροφητών ενέργειας όσο και στο φαινόμενο της αξονικής προοδευτικής κατάρρευσης. Πρόσφατες έρευνες σχετικά με τις μεταβατικές διαδικασίες παραμόρφωσης σε κυλινδρικά κελύφη, καθώς αυτά υπόκεινται σε αξονικά φορτία, έδειξαν πως αυτές οι διαδικασίες παραμόρφωσης παίζουν σημαντικό ρόλο στο σχηματισμό του αρχικού μοτίβου αστάθειας αυτών των κελυφών για ταχύτητες κρούσης πάνω από ένα ορισμένο όριο, το οποίο είναι πάντα εξαρτημένο από τη γεωμετρία του κελύφους και τις ιδιότητες του υλικού. Αποδείχτηκε στην πορεία ότι συγκεκριμένοι συνδυασμοί των αδρανειακών ιδιοτήτων του κελύφους και τα χαρακτηριστικά σκλήρυνσης του υλικού προκαλούν την ανάπτυξη μιας μορφής δυναμικού λογισμού, πλαστικού ή προοδευτικού , κάτω από αξονική κρούση. Αυτή η ανάπτυξη οφείλεται στην αξονική εξάπλωση μιας πλαστικής ζώνης και στην αδριάνεια των πλευρών του κελύφους. Το φαινόμενο της δυναμικής πλαστικής κατάρρευσης μπορεί να αναπτυχθεί μόνο στα πλαίσια μιας ομοιόμορφης πλαστικής ροής καθώς ολόκληρο το μήκος του κελύφους συμπίεζεται αξονικά πέρα από το όριο διαρροής του υλικού. Με αυτόν τον τρόπο, η ταχύτητα διάδοσης πλαστικών κυμάτων στο κέλυφος γίνεται ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζουν τον τρόπο της κατάρρευσης.[13]

1.2. Θεωρητικό υπόβαθρο αξονικής κατάρρευσης ορθογωνικών διατομών.

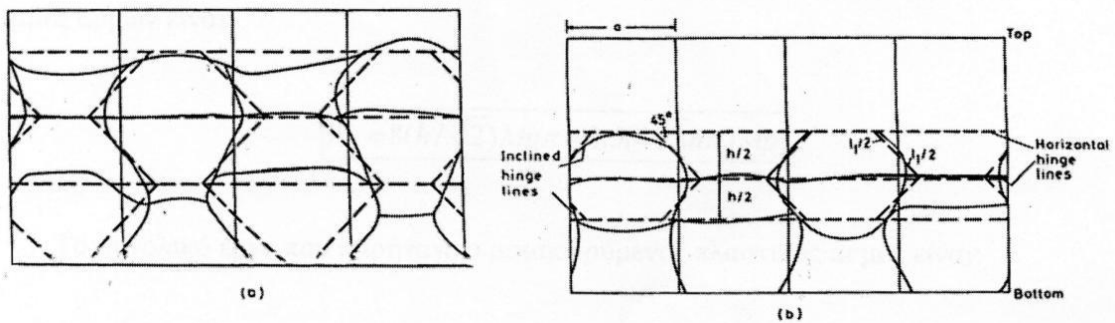
Κρίνεται απαραίτητη η θεωρητική ανάλυση του φαινομένου της αξονικής κατάρρευσης σε μια λεπτότοιχη ορθογωνική διατομή, αφού στην παρούσα εργασία μας απασχολούν διατάξεις αποτελούμενες από δοκίμια τέτοιου είδους διατομών. Ειδική περίπτωση της ορθογωνικής διατομής αποτελεί η τετραγωνική, προφανώς επειδή είναι μία ορθογωνική διατομή με ίδιες οριζόντιες και κάθετες πλευρές. Αυτό μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε τη θεωρία των τετραγωνικών διατομών για να εξηγήσουμε καλύτερα το φαινόμενο της αξονικής κατάρρευσης και τους μηχανισμούς με τους οποίους αυτή επιτυγχάνεται. Η αξονική κατάρρευση ενός ορθογωνικού σωλήνα είναι αποτέλεσμα της άσκησης μίας θλιπτικής δύναμης στο σωλήνα, επομένως είναι απαραίτητο να εστιάσουμε στο πώς συμπεριφέρεται ένας ορθογωνικός σωλήνας όταν υφίσταται θλίψη. Στο παρακάτω Σχήμα 1.1. παριστάνεται ένας λεπτότοιχος τετραγωνικός σωλήνας, μήκους a , ύψους E και πάχους l , στον οποίο ασκείται μία θλιπτική δύναμη P . [4]



Σχήμα 1.1: Λεπτότοιχος σωλήνας τετραγωνικής διατομής, ο οποίος υποβάλλεται σε αξονική θλίψη.

Πολλά αντιπροσωπευτικά πειράματα πάνω στην αξονική κατάρρευση σωλήνων τετραγωνικής και ορθογωνικής διατομής έγιναν πάνω σε σωλήνες κατασκευασμένους από τη συνθετική ύλη πολυ-βινυλο-χλωρίδιο, γνωστή σε όλους μας ως PVC. Παρά το γεγονός ότι τα πειράματα που θα κάνουμε στα πλαίσια της εργασίας αφορούν χαλύβδινους σωλήνες, η παράθεση τύπων, σχεδίων κ.ο.κ. σχετικά με την κατάρρευση PVC σωλήνων μπορεί τουλάχιστον να μας δώσει κάποιες πολύ χρήσιμες πληροφορίες για το πώς καταρρέει ένας σωλήνας καθώς θλίβεται.

Για τον παραπάνω λόγο, θα παραθέσουμε το παρακάτω Σχήμα 1.2., στο οποίο εμφανίζεται η αξονική κατάρρευση ενός τετραγωνικού σωλήνα από PVC. Το σχήμα αυτό περιλαμβάνει τις ιδανικές θέσεις των οριζόντιων πλαστικών αρμών (hinges), καθώς και των κεκλιμένων αρμών υπό γωνία $\pm 45^\circ$. Στο σχήμα βλέπουμε την υποτιθέμενη παραμορφωμένη κατάσταση του σωλήνα τετραγωνικής διατομής, στον οποίο εμφανίζονται μη εκτατοί λοβοί, όρος που θα εξηγηθεί στη συνέχεια. Οι παχιές γραμμές δηλώνουν τις πειραματικές θέσεις των σταθερών και κινητών αρμών καθώς το δοκίμιο καταρρέει, ενώ οι διακεκομμένες γραμμές παριστάνουν τις ιδεατές θέσεις των αρμών.[4]



Σχήμα 1.2: Αναπαράσταση του μηχανισμού αξονικής κατάρρευσης σωλήνων τετραγωνικής διατομής.

1.3. Μαθηματικό μοντέλο αξονικής κατάρρευσης.

Στα πλαίσια της περιγραφής του μαθηματικού μοντέλου αξονικής κατάρρευσης τετραγωνικών σωλήνων θα χρησιμοποιήσουμε τους ακόλουθους συμβολισμούς:

- α : Γωνία κωνικότητας του δοκιμίου, σχήματος κόλουρης πυραμίδας. Αν $\alpha = 0$ η διατομή του υπό μελέτη μοντέλου είναι τετραγωνική.
- B, B', K : Λοιπές παράμετροι.
- Y ή σ_y : Όριο διαρροής για το υλικό του δοκιμίου.
- h_i, h_i' : Μέγεθος των άνω και κάτω χειλών για την i -οστή πτύχωση.
- L : Ύψος δοκιμίου (αρχικό αξονικό μήκος του κελύφους).
- M : Ροπή κάμψης πλαστικής παραμόρφωσης δοκιμίου. Είναι ανηγμένη ανά μονάδα μήκους και αφορά δεδομένο πάχος τοιχώματος.
- P : Αξονικό φορτίο.
- P_m : Μέσο φορτίο θραύσης για την i -οστή πτύχωση.
- P_0 : Αρχικό μέγιστο φορτίο.
- P_Y : Φορτίο διαρροής.
- t : Πάχος τοιχώματος.
- $W_{b,i}$: Πλαστική ενέργεια παραμόρφωσης για την i -οστή πτύχωση.
- $W_{c,i}$: Αποδιδόμενη ενέργεια κατά την περιφερειακή παραμόρφωση, για την i -οστή πτύχωση.
- $W_{tot,i}$: Ολική πλαστική ενέργεια παραμόρφωσης για την i -οστή πτύχωση.
- z : Θλιβόμενη απόσταση κατά τη διεύθυνση της αξονικής φόρτισης.
- h : Συνολικό ύψος λοβού, με $H = h/2$ το ήμισυ του ύψους του λοβού.
- l_h : Μήκος κεκλιμένου πλαστικού αρμού.
- n : Συνολικός αριθμός συνδετικών αρμών.
- r : Ακτίνα καμπυλότητας πλαστικού αρμού.
- a ή D : Μήκος πλευράς δοκιμίου τετραγωνικής διατομής. Για ορθογωνική διατομή με ανόμοιες πλευρές, οι πλευρές αυτές θα συμβολιστούν με D_1 και D_2 , όπου $D_1 = D_2 = D$ αν η διατομή είναι τετραγωνική.
- b : Μήκος ημιλοβού κατά τη διεύθυνση του άξονα συμμετρίας του κελύφους.
- d : Απόσταση των απέναντι επιπέδων τετραγωνικών κελυφών
- m : Αριθμός ημιλοβών κατά την αξονική διεύθυνση.

Οι σχέσεις που θα χρησιμοποιηθούν για την περιγραφή του φαινομένου της αξονικής κατάρρευσης των σωλήνων θα βασίζονται στις αντίστοιχες εκφράσεις που αφορούν σωλήνες σχήματος κόλουρης πυραμίδας, όπου η γωνία κωνικότητας α θα λάβει την τιμή μηδέν. Η γωνία κωνικότητας δίνεται σε γενικές γραμμές από τη σχέση:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{D_1 - D_2}{L} \right)$$

Αυτό σημαίνει ότι, για το μηδενισμό της γωνίας έχουμε εξίσωση των πλευρών D_1 και D_2 , δηλαδή $D_1 = D_2 = D$. Η παραπάνω διαπίστωση θα μας οδηγήσει σε αντίστοιχες εκφράσεις για το μέσο φορτίο θλίψης που πρέπει να εφαρμόσουμε για την πλαστική κατάρρευση των σωλήνων που θα χρησιμοποιηθούν.

Η πλαστική ενέργεια παραμόρφωσης για μηδενική γωνία κωνικότητας θα δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$W_{bi} = 2\pi \cdot M_p \left[(1+A) \frac{\pi}{2} \right] D + 2h_i$$

όπου A μία παράμετρος που λαμβάνει την τιμή 0 για την πρώτη πτύχωση και 1 για τις υπόλοιπες. Η παραπάνω σχέση μπορεί να αναπτυχθεί εάν θεωρήσουμε ότι γίνεται εφαρμογή του κριτηρίου Von Mises.

$$M_p = \frac{1}{2\sqrt{3}} \sigma_y t_0^2$$

όπου t_0 το αρχικό πάχος του τοιχώματος. Τελικά καταλήγουμε στην μορφή:

$$W_{bi} = \frac{\pi^2 D}{2\sqrt{3}} (1+A) \sigma_y t_0^2 + 2h_i$$

Όσον αφορά την ενέργεια που αποδίδεται κατά την περιφερειακή παραμόρφωση, αυτή θα δίνεται, για τυχαία γωνία κωνικότητας α , από την παρακάτω σχέση, της οποίας η απόδειξη περιγράφεται αναλυτικά στη βιβλιογραφία [7]:

$$W_{ci} = \frac{\pi \sigma_y t_0 h_i}{2 \sin \alpha} \left[\left(\frac{1 + \cos 2\alpha}{2} \right) (-B + KB') + h_i (K - 1) \right] - 2 \sin \alpha [(B - KB') + (B + KB') \sin \alpha]$$

όπου οι τιμές των B , B' και K αναφέρονται στην παραπάνω βιβλιογραφία και εξαρτώνται από τη γωνία α . Η παραπάνω σχέση, για $\alpha = 0$, δεν μπορεί να δώσει αποτέλεσμα που να ορίζεται μαθηματικά, λόγω της ύπαρξης μηδενικής ποσότητας στον παρονομαστή. Εναλλακτικά, η τιμή της W_{ci} μπορεί να προσδιοριστεί από πειραματικές μετρήσεις.

Το ολικό πλαστικό έργο κατά την οριζόντια διεύθυνση, καθώς σχηματίζεται ένας λοβός, θα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

- Για οριζόντιους πλαστικούς αρμούς:

$$W_1 = \underbrace{(4D \cdot M_p) \frac{\pi}{2}}_{\text{Ανω γραμμή}} + \underbrace{(4D \cdot M_p) \frac{\pi}{2}}_{\text{Κάτω γραμμή}} + \underbrace{(4D \cdot M_p) \pi}_{\text{Μέσος πλαστικός αρμός}} = 8D\pi M_p$$

- Για κεκλιμένους πλαστικούς αρμούς:

$$W_2 = 8 \left(\frac{h\sqrt{2}}{4} \right) M_p \cdot \pi = (2h\pi\sqrt{2}) M_p$$

Η ενέργεια για την πλάτυνση των αρχικών γωνιών δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$W_3 = 4 \left(\frac{h}{2} \right) \cdot M_p \cdot \pi = 2hM_p\pi$$

Μπορούμε να προβλέψουμε κατά προσέγγιση τη μέση τιμή του φορτίου θλίψης κατά την κατάρρευση ενός κελύφους, εξισώνοντας την ολική εσωτερική ενέργεια W_{int} με την εξωτερική ενέργεια W_{ext} όπως αυτές δίνονται παρακάτω,. Για την πρόβλεψη, θα κάνουμε την παραδοχή ότι το ύψος h του λοβού είναι περίπου ίσο με την πλευρά D (ή a) του σωλήνα.

Αν δ η προοδευτική αλλαγή του θλιπτικού φορτίου και P η μέση τιμή του, τότε η εξωτερική ενέργεια θα ισούται με:

$$W_{\text{ext}} = \bar{P} \cdot \delta$$

Η σύνθεση της W_3 με τις W_1 και W_2 θα μας δώσει τη συνολική εσωτερική ενέργεια πλαστικής παραμόρφωσης κατά την κατάρρευση. Συγκεκριμένα, θα ισχύει $W_{\text{int}} = W_1 + W_2 + W_3$. Μετά από πράξεις, η ολική εσωτερική ενέργεια θα ισούται με:

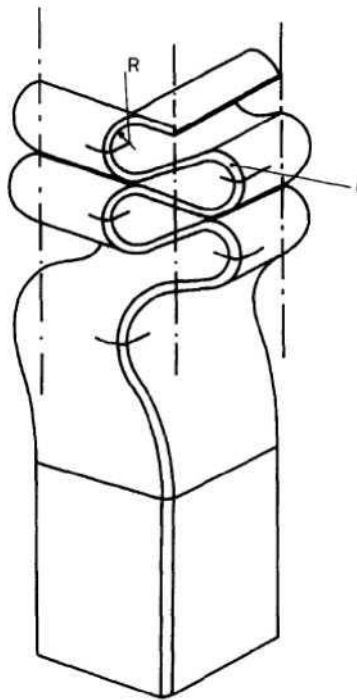
$$W_{\text{int}} = 2h \cdot M_p \cdot \pi \cdot (5 + 2\sqrt{2})$$

Εξισώνοντας τώρα τις σχέσεις και επιλύοντας την εξίσωση που θα προκύψει ως προς P , θα καταλήξουμε στο εξής:

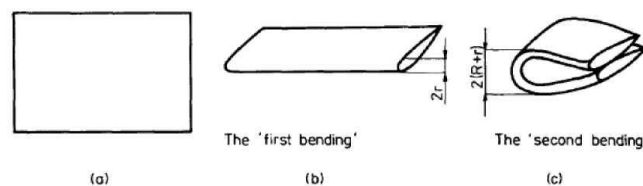
$$\begin{aligned} 2h \cdot M_p \cdot \pi \cdot (5 + 2\sqrt{2}) &= \bar{P} \cdot \delta \Rightarrow \\ \Rightarrow \bar{P} &= \frac{2\pi h}{\delta} \cdot M_p \cdot (5 + 2\sqrt{2}) \end{aligned}$$

1.4. Ενεργό μήκος κατάρρευσης.

Η διαδικασία κατάρρευσης του δοκιμίου προχωράει πάντα προοδευτικά κατά ένα επαρκές μικρό μήκος. Αφού διαμορφωθεί η πρώτη πτύχωση, τότε είτε από καθαρή πλαστική αναδίπλωση, είτε από διαδικασία πρίν την αναδίπλωση, το δοκίμιο συνεχίζει να καταρρέει κατακόρυφα κατά την αξονική διεύθυνση, κατά το ίδιο μήκος επόμενων λοβών. Ο πλαστικός αρμός φαίνεται να παραμένει σε επίπεδο κεκλιμένο κατά 45° , ως προς τα δυο επίπεδα συμμετρίας της ημιτομής του τετραγωνικού μας δοκιμίου. Η διαδικασία δίπλωσης του κάθε λοβού τερματίζεται όταν έρθουν σε επαφή - όταν συμπίπτουν - οι άνω και κάτω ακμές του λοβού. Στις παρακάτω εικόνες (Σχ.1.3 και Σχ.1.4), φαίνεται καθαρά αυτή η διαδικασία κατάρρευσης ενός δοκιμίου τετραγωνικής διατομής:[4]

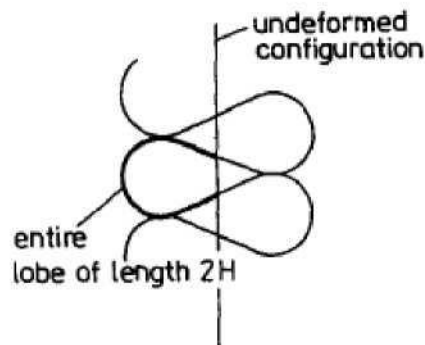


Σχήμα 1.3: Διαδικασία κατάρρευσης ενός δοκιμίου τετραγωνικής διατομής
Στη συνέχεια παρουσιάζεται η αναδίπλωση ενός λεπτού ελάσματος και η δημιουργία λοβού σε αυτό:



Σχήμα 1.4: Αναδίπλωση ενός λεπτού ελάσματος και η δημιουργία λοβού

Αξιόλογο είναι ότι ο πλαστικός αρμός διαμορφώνεται ως μια κυψέλη με διπλή καμπύλωση. Η μικρή ακτίνα της καμπύλωσης είναι η r , όπως φαίνεται παραπάνω, και είναι σταθερή σε όλο τον αρμό, και συνήθως είναι ίσο με το πάχος του τοιχώματος του πλέγματος (Σχ.1.3). Η δεύτερη ακτίνα της καμπύλωσης R , είναι κατά πολύ μεγαλύτερη, ενώ και οι τέσσερις πλευρές του δοκιμίου υπόκεινται σε κυλινδρικού τύπου αναδίπλωση. Είναι προφανές ότι η παρουσία αυτών των ακτίνων έχει σημαντική επίδραση στο ενεργό μήκος αναδίπλωσης του δοκιμίου, και συνεπώς στην δύναμη που εμφανίζεται σε όλη τη διάρκεια της κατάρρευσης του δοκιμίου. Η πλειοψηφία των μοντέλων που πραγματευόμαστε θεωρούνται ότι είναι κατασκευασμένα από υλικό πλήρους πλαστικής συμπεριφοράς με μεγάλη ακαμψία. Τέτοιο υλικό παρουσιάζει ασυνέχειες υπό κλίση στους σταθερούς πλαστικούς αρμούς. Θεωρώντας τους πλαστικούς αρμούς φιξαρισμένους με το υλικό, η ακτίνα του αρμού μηδενίζεται και το ενεργό μήκος κατάρρευσης, είναι ίσο με το μήκος της κυματοροής του τύπου αναδίπλωσης.



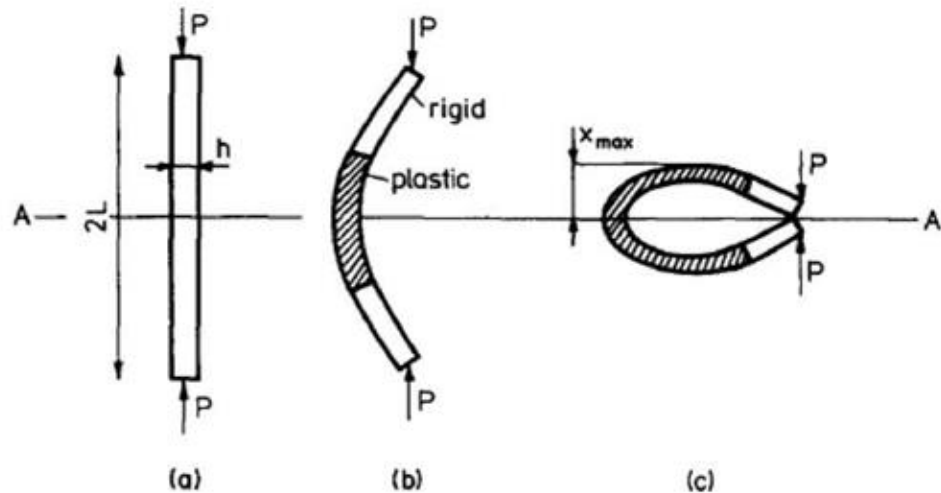
Σχήμα 1.5: Εμφάνιση λοβών και συμμετρία αυτών ως προς θεωρητικά απαραμόρφωτη έδρα του δοκιμίου τετραγωνικής διατομής (πλάγια όψη).

Η πραγματική αξονική κατάρρευση των δοκιμίων με λεπτά τοιχώματα τετραγωνικής διατομής, είναι πολύ πιο περίπλοκη από ότι φαίνεται στις παραπάνω απλουστευμένες εικόνες. Παρατηρώντας τους πλαστικούς αρμούς, βλέπουμε ότι η τελική θέση του παραμορφωμένου άκρου του δοκιμίου προκύπτει από δυο συνακόλουθα τσακίσματα ενός αρχικά επίπεδου ελάσματος. Κατά την πρώτη αναδίπλωση, το αρχικά επίπεδο έλασμα διπλώνει κατά μια γωνία ελαφρά μεγαλύτερη και σχηματίζει τη μορφή (b) που φαίνεται παραπάνω, και το μέγιστο καθ' ύψος μήκος λοβού είναι $2r$. Ύστερα, το παραμορφωμένο έλασμα διπλώνεται ξανά σε διεύθυνση κάθετη προς την αρχική αναδίπλωση. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται δεύτερη αναδίπλωση, και απεικονίζεται παραπάνω στο (c).

Το μέγιστο καθ' ύψος μήκος αυτού του λοβού είναι $2r + 2R$.

Στην πραγματικότητα, στην κατάρρευση του δοκιμίου τα γεγονότα ακολουθούν διαφορετική διαδικασία. Και οι δυο ακτίνες εμφανίζονται από το ξεκίνημα της κατάρρευσης του δοκιμίου, καθώς η τομή της τοροειδούς κυλινδρικής επιφάνειας, μεταφέρεται σε όλο το υλικό. Είναι μάλλον δύσκολο να αναλύσουμε το φαινόμενο αυτό της δεύτερης αναδίπλωσης κοντά στον αρμό. Ωστόσο, κοντά στο κέντρο των πλευρών του δοκιμίου, η δεύτερη αναδίπλωση είναι απλά μια αναδίπλωση ενός επίπεδου μεταλλικού ελάσματος.

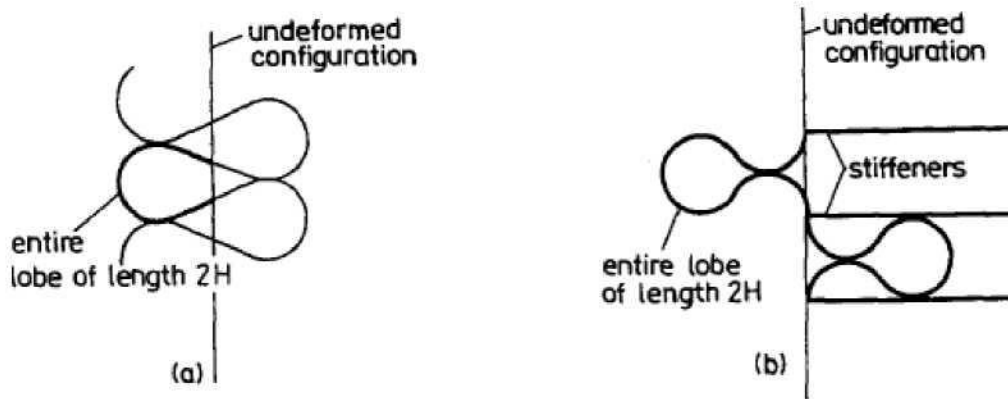
Επομένως, θεωρείται ότι η ακτίνα της κυλινδρικής αναδίπλωσης διαμορφώνεται από τις πλαϊνές έδρες του δοκιμίου, αντί από τις γωνιακές ακμές του δοκιμίου. Τότε το μέγιστο καθ' ύψος μήκος λοβού ελέγχεται και εξαρτάται από τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Ακόμα, κατά την δημιουργία ενός λοβού, η πλαστική παραμόρφωση εξαπλώνεται σε όλο το μήκος του λοβού προσδίδοντάς του ένα τελικό σχήμα, το οποίο έχει συμμετρία ως προς επίπεδο A-A, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα το οποίο αντιστοιχεί σε θλιπτική φόρτιση επίπεδου ελάσματος με τις φάσεις αναδίπλωσης αφού το φορτίο θλίψης πάρει την κρίσιμη τιμή και το έλασμα αρχίσει την αναδίπλωση:



Σχήμα 1.6: Θλιπτική φόρτιση επίπεδου ελάσματος.

Ακόμα, τα δοκίμιά μας αναδιπλώνουν κατά τρόπο τέτοιο ώστε πάντα οι επόμενοι σχηματιζόμενοι λοβοί να είναι συμμετρικοί και στις δυο πλευρές τους ως προς την θεωρητική απαραμόρφωτη ακμή του δοκιμίου, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (α), καθώς και η μετάβαση από τον ένα λοβό προς τον επόμενο γειτονικό του λοβό, να είναι ομαλή.

Αντίθετα, εάν είχαμε δοκίμια με εγκάρσια ενισχυτικά ελάσματα (stiffeners), τα οριζόντια ενισχυτικά ελάσματα εμποδίζουν την περιστροφή των άκρων του κάθε λοβού, με αποτέλεσμα να έχουμε ένα διαφορετικό τελικό σχήμα στο λοβό, όπως φαίνεται στην εικόνα παρακάτω (b). Και στις δυο περιπτώσεις το ολικό μήκος του λοβού είναι $2H$, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω.



Σχήμα 1.7: Εμφάνιση λοβών και θέση αυτών ως προς τη θεωρητικά απαραμόρφωτη έδρα του δοκιμίου τετραγωνικής διατομής (πλάγια όψη), (α) για απλά δοκίμια, (β) για δοκίμια με ενισχυτικά ελάσματα.

Ακόμα, ενώ η αρχική αναδίπλωση είναι ανάλογη και προς τα δυο είδη παραμόρφωσης, και το ισοδύναμο (ενεργό) μήκος L της κατάρρευσης του ελάσματος είναι ίσο με:

$$L = \sqrt{2}H$$

κατά την δεύτερη αναδίπλωση, τα ισοδύναμα μήκη είναι:

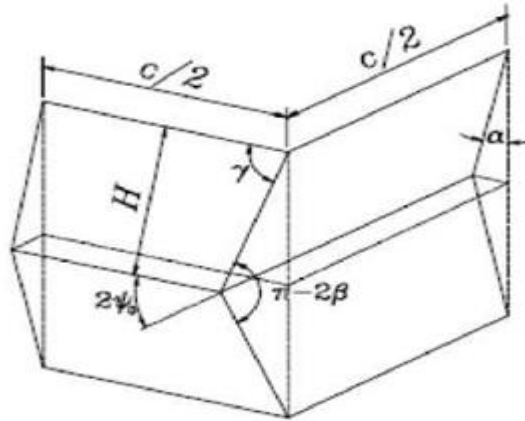
$$L = \sqrt{2}H$$

για τα δοκίμιά μας που δεν έχουν ενισχυτικά ελάσματα, ενώ για τα δοκίμια που έχουν ενισχυτικά ελάσματα, θα είναι:

$$L = \frac{1}{2} \sqrt{2}H$$

Έτσι, το ενεργό μήκος κατάρρευσης των δοκιμών τετραγωνικής διατομής, είναι περίπου 70% του αρχικού ύψους δοκιμίου χωρίς ενισχυτικά ελάσματα, και γύρω στο 60% για δοκίμια με οριζόντια ενισχυτικά ελάσματα. Βασικό ρόλο για την πρώτη αναδίπλωση (για εμφάνιση μη εκτατού λοβού), παίζει η τριβή και οι γεωμετρικές ανωμαλίες του δοκιμίου, καθώς και κάποια τυχόν ανομοιογένεια στο υλικό (πχ οπή διαμετρής ή μη στο δοκίμιο). Καθώς συνθλίβεται το δοκίμιο, έχει την τάση να δημιουργήσει λοβό προς τα έξω, εξαιτίας της επίδρασης του λόγου του Poisson, και λόγω της αξονικής σύνθλιψης, όμως η κίνηση προς τα έξω των ακμών του δοκιμίου, εμποδίζεται από τις δυνάμεις λόγω τριβής που αναπτύσσονται στις διεπιφάνειες επαφής, μεταξύ του κινούμενου εμβόλου και των άκρων του δοκιμίου.[4]

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τα άκρα του δοκιμίου να υστερούν του υπόλοιπου δοκιμίου, και έτσι δημιουργείται ο πρώτος εξωτερικός λοβός, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, όπου οι δυο απέναντι έδρες του δοκιμίου τετραγωνικής διατομής μπαίνουν προς τα μέσα με γωνία α , ενώ οι άλλες δυο απέναντι έδρες βαίνουν προς τα έξω με γωνία $(\pi-2\beta)/2$.

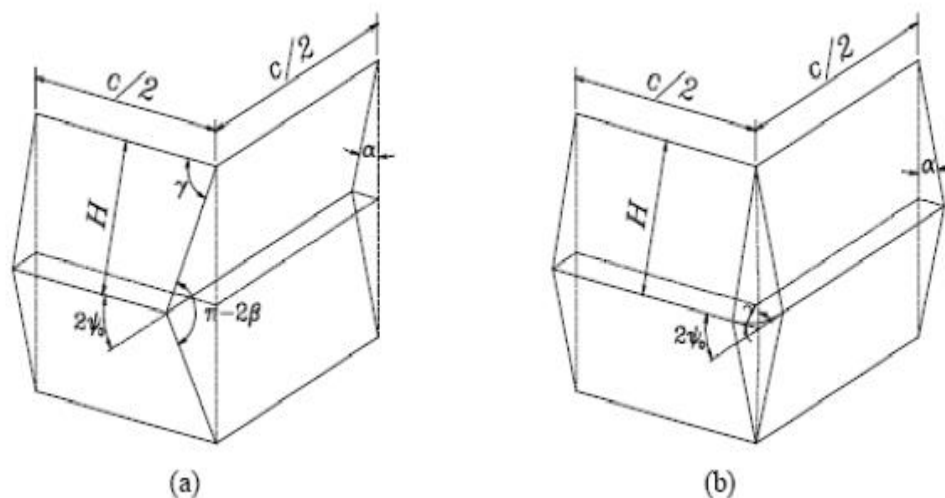


Σχήμα 1.7: Δημιουργία μη εκτατού λοβού σε δοκίμιο τετραγωνικής διατομής.

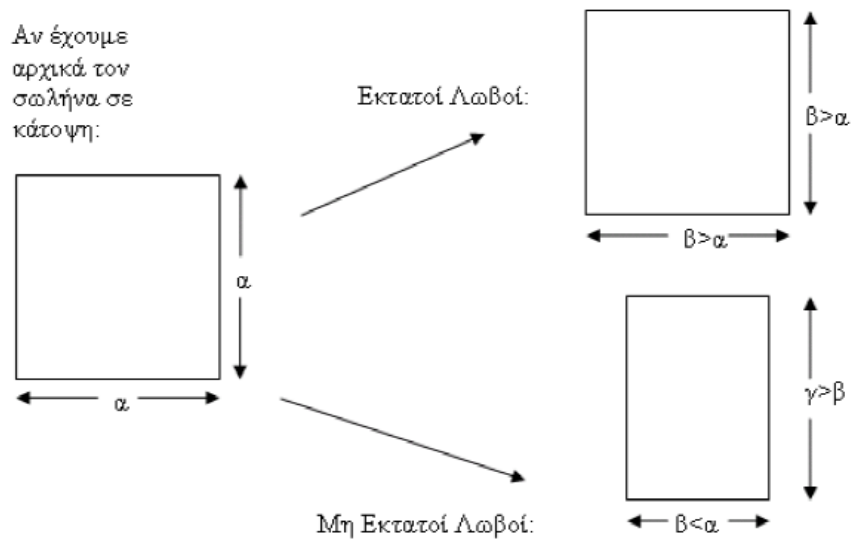
1.5. Δημιουργία λοβών και είδη παραμορφώσεων.

Οι λοβοί χρίζονται στις εξής τρεις κατηγορίες:

- **Μη εκτατοί λοβοί:** σύμφωνα με αυτό το είδος παραμόρφωσης, το δοκίμιο που καταρρέει περιέχει δυο είδη αρμών: τα σταθερά οριζόντια, και τα κεκλιμένα μετατοπισμένα. Οι οριζόντιοι πλαστικοί αρμοί στις δυο απέναντι πλευρές στη δημιουργία κάθε λοβού, κινούνται προς τα έξω μειώνοντας το αρχικό τους μήκος, ενώ ταυτόχρονα οι πλαστικοί αρμοί στις άλλες δυο παράπλευρες έδρες κινούνται προς τα μέσα αυξάνοντας το μήκος τους. Συνεπώς, κατά τη διάρκεια της κατάρρευσης του δοκιμίου, όμοιοι λοβοί διαμορφώνονται ανά επίπεδο στραμμένοι κατά $\pi/2$ των προηγούμενων και ούτω καθ' εξής. Οι κεκλιμένοι πλαστικοί αρμοί ξεκινούν από τις γωνίες του δοκιμίου, και καταλήγουν σε $\pm 45^\circ$ ως προς τους οριζόντιους πλαστικούς αρμούς.
- **Εκτατοί λοβοί:** αυτό το είδος παραμόρφωσης χαρακτηρίζεται από το σχηματισμό τετραγωνικού τύπου αναδίπλωσης συμμετρικό ως προς κάθετο άξονα συμμετρίας/περιστροφής του δοκιμίου. Είναι παρόμοιο με τους κυλινδρικούς δακτυλίους που σχηματίζονται κατά την εκτατή κατάρρευση των κυλινδρικών δοκιμίων.
- **Ανάμικτου τύπου λοβοί:** Αυτός ο τύπος κατάρρευσης, αποτελεί συνδυασμό ενός ή περισσότερων αρχικά σχηματισμένων εκτατών λοβών, οι οποίοι ακολουθούνται από μη εκτατούς λοβούς καθώς προχωράει η κατάρρευση του δοκιμίου. Αν συνδυαστούν κατάλληλα οι δυο προηγούμενοι τύποι θα επιφέρουν το αποτέλεσμα των ανάμικτων λοβών. Τα παραπάνω φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 1.8: Απεικόνιση (α) μη εκτατών λοβών, (β) εκτατών λοβών.



Σχήμα 1.9: Σχηματική παράσταση εκτατών και μη εκτατών λοβών.

Το είδος κατάρρευσης που παρατηρήθηκε στα περάματα ήταν ο τύπος της παραμόρφωσης με εμφάνιση μη εκτατών λοβών, όπου ο σωλήνας αρχίζει να καταρρέει σε κάποια θέση του καθ' ύψος και να εμφανίζει δυο είδη αρμών: το σταθερό οριζόντιο και το κεκλιμένο μετατοπισμένο αρμό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.

2.1. Χρησιμότητα της μεθόδου σε σύγχρονες εφαρμογές.

Λόγω της ανάγκης για εύρεση προσεγγιστικών λύσεων σε μερικές διαφορικές εξισώσεις και ολοκληρωτικές εξισώσεις που είναι δύσκολο να επιλυθούν με συμβατικές αλγεβρικές μεθόδους, κατά τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να γίνεται ολοένα και εντονότερη η χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων για την ευκολότερη επίλυση των παραπάνω εξισώσεων. Η μέθοδος αυτή, η οποία βρίσκει ευρεία εφαρμογή σε πολλούς τομείς ενασχόλησης ενός μηχανικού, όπως η ανάπτυξη διαφόρων μοντέλων, βασίζεται είτε στην πλήρη εξάλειψη της διαφορικής εξίσωσης είτε στη μετατροπή της μερικής διαφορικής εξίσωσης σε ένα σύστημα συνήθων διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες στη συνέχεια ολοκληρώνονται αριθμητικά με χρήση γνωστών μεθόδων από τη Θεωρία Αριθμητικής Ανάλυσης.

2.2. Διαδικασία μοντελοποίησης και ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.

Στην περίπτωση των διάφορων μηχανολογικών εφαρμογών, με τον όρο *μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων* (αγγλικός όρος: *Finite Element Modeling*) αναφερόμαστε στο σύνολο των απαραίτητων διαδικασιών για την ανάπτυξη ενός πλήρους μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων. Στις διαδικασίες αυτές περιλαμβάνονται η εισαγωγή της γεωμετρίας, η γένεση πλέγματος και η διακριτοποίηση εντός αυτού, καθώς επίσης και η επιβολή αντιδράσεων στήριξης και φόρτισης. Σε παλαιότερες εποχές, η εισαγωγή των δεδομένων που απαιτούνταν για την πραγματοποίηση της μοντελοποίησης δινόταν με γραμμές εντολών με τη βοήθεια ενός αυτόνομου αρχείου δεδομένων (batch file). Όμως στις μέρες μας, η χρήση των batch files έχει εκλείψει και τη θέση αυτών έχει πάρει ο *προεπεξεργαστής* (preprocessor), με τη βοήθεια του οποίου εκτελείται σήμερα η μοντελοποίηση.

Πρώτο μέλημα του προεπεξεργαστή είναι ο καθορισμός της γεωμετρίας του αντικειμένου ή του πεδίου ορισμού του προβλήματος. Τα παραδοσιακά συστήματα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (*Finite Element Analysis - FEA*) διέθεταν μόνο στοιχειώδεις λειτουργίες μοντελοποίησης, αλλά τα πιο σύγχρονα συστήματα μπορούν και επιτυγχάνουν πληρέστερη ανάλυση, είτε χάρη στις προηγμένες δυνατότητες που προσφέρουν είτε στους στενούς δεσμούς που τα συνδέουν με συστήματα CAD [Mills 1997]. Συστήματα που στηρίζονται σε γεωμετρική μοντελοποίηση CAD εργάζονται απευθείας με το μοντέλο CAD ή μεταφράζουν και εισάγουν τη γεωμετρία. Ευρύτερη εφαρμογή παρουσιάζει η απευθείας σύνδεση με το μοντέλο CAD, επειδή εξαλείφει τα βήματα μετάφρασης, εξασφαλίζει τη διατήρηση των δεδομένων και μικραίνει τον κύκλο σχεδιασμού - ανάλυσης - αλλαγής. Αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση συστήματος CAD διευκολύνει τη μοντελοποίηση και παρέχει πιο ισχυρές λειτουργίες δημιουργίας και αλλαγής σύνθετης γεωμετρίας. Το παραπάνω πλεονέκτημα είναι εμφανές στην περίπτωση των περισσότερων υβριδικών συστημάτων μοντελοποίησης (με ολοκληρωμένη μοντελοποίηση όγκου, επιφάνειας και wireframe, καθώς επίσης και πληθώρα παραμετρικών μεθόδων) τα οποία μπορούν να κτίσουν οποιαδήποτε γεωμετρία απαιτείται για την ανάλυση. Τα περισσότερα συστήματα FEA δίνουν επίσης έμφαση στη δυνατότητά τους να εισάγουν τη γεωμετρία, είτε απευθείας από συγκεκριμένα συστήματα CAD είτε μέσω διαφόρων τυποποιήσεων, όπως το IGES (*Initial Graphics Exchange Specification*). Όμως, η απευθείας χρήση δεν είναι πάντοτε εφαρμόσιμη άμεσα. Παρ'ότι με γυμνό μάτι μπορεί να διαπιστώσουμε ότι το μοντέλο μας είναι άψογο, το σύστημα FEA μπορεί να αποκαλύψει ορισμένα σφάλματα που το μάτι δεν μπορεί να αντιληφθεί. Αυτά τα σφάλματα δημιουργούνται συχνά κατά τη διαδικασία γένεσης πλέγματος. Ορισμένα συστήματα προσφέρουν μία σειρά λειτουργιών που μπορούν να «καθαρίσουν» την εισαγόμενη γεωμετρία. Επιπλέον, ακόμα και αν η γεωμετρία CAD δεν περιέχει σφάλματα, δεν απαιτείται η εισαγωγή όλων των λεπτομερειών κατά την ανάλυση, επομένως μερικές από αυτές, όπως για παράδειγμα ένα fillet, θα μπορούσαν να απαλειφθούν, χωρίς να μεταβληθεί η ποιότητα της ανάλυσης. Ορισμένα συστήματα διαθέτουν τέτοιες αυτόματες δυνατότητες απενεργοποίησης γεωμετρικών οντοτήτων.

Το επόμενο στάδιο στην ανάλυση είναι η γένεση πλέγματος και κατανομής κόμβων, ένα στάδιο που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη δυσκολία αλλά και στο οποίο πρέπει να δοθεί η μέγιστη σημασία κατά τη μοντελοποίηση. Για τη διευκόλυνση της γένεσης πλέγματος, όλα τα σύγχρονα συστήματα FEA προσφέρουν δυνατότητες αυτόματης γένεσης πλέγματος. Τα περισσότερα από αυτά τα συστήματα προσφέρουν ένα αυτόματο πλέγμα τετραεδρικών στοιχείων για στερεή γεωμετρία και τετραπλευρικά ή τριγωνικά στοιχεία για επιφάνεια στον τρισδιάστατο χώρο (κελύφη, επίπεδη εντατική ή επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση). Πολλά συστήματα επιτρέπουν στους χρήστες να επέμβουν στις παραμέτρους αυτόματης γένεσης πλέγματος, όπως η πυκνότητα πλέγματος. Αυτές οι παράμετροι επιτρέπουν επιπλέον τοπική επέμβαση σε κρίσιμες περιοχές. Επίσης, πολλά συστήματα επιτρέπουν τη διασύνδεση του πλέγματος με τη γεωμετρία, ώστε κάθε αλλαγή της γεωμετρίας να αντανakλάται ταυτόχρονα στο πλέγμα.

Τα διάφορα στοιχεία που υποστηρίζονται από ένα σύστημα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων βρίσκονται συγκεντρωμένα σε ένα σύνολο που αποκαλείται βιβλιοθήκη στοιχείων (element library). Όσο περισσότερα είναι τα είδη στοιχείων που περιέχει η βιβλιοθήκη, τόσο περισσότερα είδη προβλημάτων μπορούν να επιλυθούν. Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι το ίδιο πλέγμα μπορεί να αντιστοιχεί σε διαφορετικά πεπερασμένα στοιχεία, ανάλογα με τον αριθμό των κόμβων που αποδίδονται σε αυτό. Τέλος, κατά τα γνωστά από τη θεωρία διακριτοποίησης πλέγματος, οι ζώνες όπου αναμένεται απότομη μεταβολή στη συμπεριφορά των προς επίλυση αγνώστων πρέπει να διακριτοποιηθούν από στοιχεία μεγαλύτερης πυκνότητας πλέγματος, σε σχέση με τις ζώνες στις οποίες η μεταβολή της συμπεριφοράς είναι προοδευτική.

2.3. Είδος της ανάλυσης.

Παρά το γεγονός ότι ο τρόπος ανάλυσης δεν είναι δυνατόν να κωδικοποιηθεί, μπορούμε να δώσουμε κάποιες γενικές κατευθύνσεις τις οποίες μπορούμε να ακολουθήσουμε κατά τη διαδικασία επιλογής του είδους ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Η πλέον αρχική επιλογή είναι ο καθορισμός του φυσικού φαινομένου που καλείται ο μελετητής να προσομοιώσει, όπως π.χ. ελαστική-πλαστική ανάλυση (elastic-plastic analysis) ή πρόβλημα δυναμικού (potential problem). Τα προβλήματα δυναμικού αφορούν την επίλυση των εξισώσεων Laplace και Poisson (η οποία, ως γνωστόν, αποτελεί γενίκευση της εξίσωσης Laplace), σε διάφορα προβλήματα μηχανικής μη συνεκτικού ρευστού, μετάδοσης θερμότητας κλπ.. Αντί για τον καθορισμό του φυσικού φαινομένου, ο μελετητής μπορεί να καθορίσει το πρόβλημα αυτό καθαυτό. Το είδος του προβλήματος που θα καθοριστεί μπορεί να ταξινομηθεί, ανάλογα με το αν υπάρχει εξάρτηση από το χρόνο, στις εξής δύο μεγάλες κατηγορίες:

Στατικό πρόβλημα (static problem), δηλαδή ένα πρόβλημα που δεν εξαρτάται από το χρόνο.

Δυναμικό πρόβλημα (dynamic problem), δηλαδή ένα πρόβλημα που διέπεται από χρονική εξάρτηση, όπως η ταλάντωση μιας μηχανής, η ακολουθία ερπυσμού-χαλάρωσης-επανάταξης ή η διάδοση του ήχου μέσα σε διάφορα μέσα, όπως είναι ο αέρας.

Ένα πρόβλημα μπορεί επίσης να καταταχθεί ανάλογα με τη γραμμικότητά του. Λόγω αυτού του κριτηρίου, υπάρχουν οι δύο παρακάτω τύποι προβλημάτων:

Γραμμικό πρόβλημα (linear problem), στο οποίο το μέγεθος του αποτελέσματος (π.χ. μετατοπίσεις) αυξάνεται ευθέως ανάλογα με το μέγεθος των εξωτερικών δράσεων (π.χ. δυνάμεων). Τα περισσότερα προβλήματα που χρησιμοποιούνται σε πρακτικές εφαρμογές είναι είτε γραμμικά είτε σχεδόν γραμμικά.

Μη-γραμμικό πρόβλημα (nonlinear problem), στο οποίο δεν ισχύει η αναλογία που αναφέραμε παραπάνω. Σε ελαστικά προβλήματα, η ύπαρξη μη-γραμμικότητας μπορεί να οφείλεται είτε στο ελαστοπλαστικό υλικό, οπότε η μη-γραμμικότητα χαρακτηρίζεται ως υλική (material nonlinearity), είτε στη μεταβαλλόμενη επαφή μεταξύ δύο ή περισσότερων σωμάτων, οπότε η μη-γραμμικότητα χαρακτηρίζεται ως γεωμετρική (geometrical nonlinearity). Και στις δύο αυτές περιπτώσεις, το μητρώο δυσκαμψίας δεν είναι σταθερό αλλά είναι συνάρτηση των μετατοπίσεων. Μη-γραμμικότητες υπάρχουν και σε προβλήματα δυναμικού, π.χ. όταν ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας.

2.4. Είδη πεπερασμένων στοιχείων.

Ανάλογα με το είδος του προβλήματος που καλείται να επιλύσει ο μηχανικός, ενδείκνυται κάθε φορά η χρήση ενός διαφορετικού είδους πεπερασμένων στοιχείων. Ο μηχανικός μπορεί να επιλέξει ανάμεσα σε μία πληθώρα πεπερασμένων στοιχείων, εκ των οποίων τα 12 βασικότερα είναι:

1. S Ράβδος (2 κόμβοι).
2. S Σύρμα - σχοινί.
3. S Δοκός (2 κόμβοι).
4. S Επίπεδη εντατική κατάσταση (3 έως 9 κόμβοι).
5. S Επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση (3 έως 9 κόμβοι).
6. S Αξονοσυμμετρικό με αξονοσυμμετρική φόρτιση (3 έως 9 κόμβοι).
7. S Αξονοσυμμετρικό με τυχαία φόρτιση (που αναλύεται σε αρμονικές).
8. S Πλάκα (3 έως 9 κόμβοι).
9. S Μεμβράνη.
10. S Κέλυφος.
11. S Ορθοτροπικό - πολυστρωματικό υλικό.
12. S Τετράεδρο (3 κόμβοι).

2.5. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων και το LS-DYNA.

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων χωρίζεται σε δύο επιμέρους κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο που χρησιμοποιείται για την επίλυση των αντίστοιχων προβλημάτων διακριτοποίησης. Οι κατηγορίες αυτές είναι η implicit (εσωτερική) και η explicit (εξωτερική) μέθοδος.

Η φύση των δύο παραπάνω μεθόδων χαρακτηρίζεται ως προσαυξητική (incremental) και απαιτεί μία σειρά από διαδοχικές προσαυξήσεις φορτίου ή μετατόπισης. Στο τέλος της κάθε προσαύξησης η γεωμετρία της δομής μεταβάλλεται και, κατά πάσα πιθανότητα, το υλικό είτε αποκτά μη-γραμμικό χαρακτήρα είτε διαρρέει. Κατά συνέπεια, οι αλλαγές στη γεωμετρία ή στις ιδιότητες του υλικού πρέπει στη συνέχεια να ληφθούν υπόψη καθώς ανανεώνουμε την τιμή του μητρώου δυσκαμψίας για την καινούργια προσαύξηση κατά τη διάρκεια της ανάλυσης.

- Explicit ανάλυση: Η ανάλυση αυτή αναλαμβάνει τη διαδικασία προσαύξησης και, στο τέλος της κάθε προσαύξησης, ανανεώνει την τιμή του μητρώου δυσκαμψίας με βάση τις αλλαγές στη γεωμετρία και τις ιδιότητες του υλικού. Στη συνέχεια, αναλαμβάνει την κατασκευή ενός νέου μητρώου δυσκαμψίας, πριν εφαρμοστεί στο σύστημα μία νέα προσαύξηση φορτίου ή μετατόπισης. Με πιο απλά λόγια, η explicit ανάλυση επιτρέπει την πρόβλεψη μίας λύσης σε μία χρονική στιγμή $t+At$, χρησιμοποιώντας τη λύση που αφορά τη χρονική στιγμή t . Σε αυτή τη διατύπωση, το At παριστάνει το χρονικό βήμα ή τη χρονική προσαύξηση. Η μέθοδος αυτή είναι ικανοποιητική μόνο όταν χρησιμοποιείται πολύ μικρό βήμα At κατά την ανάλυση. Αυτό σημαίνει ότι, για την επίτευξη ακρίβειας στα αποτελέσματα, απαιτείται η χρήση πολύ μεγάλου αριθμού μικρών βημάτων, πράγμα που καθιστά την explicit μέθοδο πολύ χρονοβόρα. Προφανώς αν το πλήθος των χρησιμοποιούμενων βημάτων είναι ανεπαρκές, τότε η λύση τείνει να αποκλίνει από την πραγματική, ενώ επίσης είναι ασταθής. Επειδή η ευστάθεια εξασφαλίζεται μόνο για μεγάλο αριθμό μικρών βημάτων, η μέθοδος χαρακτηρίζεται ως ευσταθής υπό συνθήκες (conditionally stable). Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο της μεθόδου αυτής είναι ότι δεν επιβάλλει ισορροπία των δυνάμεων των εσωτερικών δομών με τα εξωτερικά εφαρμοζόμενα φορτία.

- Implicit ανάλυση: Η ανάλυση αυτή είναι παρόμοια με την explicit, με τη διαφορά ότι, μετά την κάθε προσάυξηση, η implicit ανάλυση πραγματοποιεί επαναληπτική διαδικασία Newton-Raphson για την επιβολή ισορροπίας μεταξύ των εσωτερικών δυνάμεων και των εξωτερικά εφαρμοζόμενων φορτίων. Η implicit ανάλυση μας δίνει τη δυνατότητα επίλυσης μιας εξίσωσης κατά τη χρονική στιγμή $t+\Delta t$, τόσο βασιζόμενοι στην ίδια την εξίσωση, όσο και χρησιμοποιώντας τη λύση που αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή t . Η φύση των χρησιμοποιούμενων εξισώσεων απαιτεί την αναστροφή του μητρώου δυσκαμνίας, κάτι που δεν απαιτείται να γίνει αν χρησιμοποιηθεί η explicit μέθοδος [33]. Η implicit ανάλυση είναι πάντοτε ευσταθής και μπορεί να εξασφαλίσει ικανοποιητική ακρίβεια στα αποτελέσματα ακόμα κι αν γίνει χρήση μεγαλύτερων βημάτων προσάυξης. Η ανάλυση αυτή μπορεί να διαχειριστεί καλύτερα διάφορα προβλήματα όπως η κυκλική φόρτιση, καθώς η ανάλυση χρησιμοποιεί εξειδικευμένες μεθόδους ελέγχου όπως τον έλεγχο μήκους τόξου ή γενικευμένης μετατόπισης. Ένα μειονέκτημα της ανάλυσης αυτής είναι η ανάγκη για συνεχή ανανέωση και ανακατασκευή του μητρώου δυσκαμνίας για κάθε μία επανάληψη της μεθόδου Newton-Raphson, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο απαιτούμενος χρόνος για την επίλυση του εκάστοτε προβλήματος. Για την αποφυγή αυτού του μειονεκτήματος ενδείκνυται η χρήση διάφορων τροποποιημένων μεθόδων Newton-Raphson. Αν η επαναληπτική διαδικασία πραγματοποιηθεί σωστά, οι επαναλήψεις Newton-Raphson θα χαρακτηρίζονται από τετραγωνικό ρυθμό σύγκλισης, πράγμα πολύ επιθυμητό, καθώς ελαττώνει σημαντικά το χρόνο επίλυσης.

Ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA χαρακτηρίζεται ως explicit. Χρησιμοποιεί τη μέθοδο της κεντρικής διαφοράς. [28][32]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.

3.1. Πειραματική διαδικασία. Διεξαγωγή των πειραμάτων στο Εργαστήριο.

Κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας διεξήχθη η αξονική θλίψη συστημάτων από ευθείς σωλήνες ορθογωνικής διατομής λεπτού πάχους. Τα συστήματα αυτά, πλην ενός, προέκυψαν με συγκόλληση τεσσάρων διαδοχικών σωλήνων σε βάσεις στήριξης του ίδιου υλικού με τους σωλήνες και κάθε φορά τοποθετημένα υπό κάποια συγκεκριμένη γωνία ως προς το κατακόρυφο άξονα της διάταξης. Οι γωνίες που τοποθετήθηκαν οι σωλήνες στις διατάξεις είναι 0° , 10° , 20° και 30° . Πιο συγκεκριμένα η στήριξη των σωλήνων έγινε με χρήση μαλακής κασσιτεροκόλλησης (καλάι) περιμετρικά των επιφανειών των σωλήνων που εφάπτονται στις βάσεις στήριξης. Τονίζεται εδώ ότι η εφαρμογή της συγκόλλησης σωλήνων-βάσεων αποσκοπεί στο να κρατήσει σταθερή την διάταξη και να εξασφαλίσει ότι θα αλληλοεπιδράσουν τα στοιχεία της κατά τη θλίψη. Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε η υδραυλική πρέσα που βρίσκεται στο Μηχανουργείο (κτίριο Ξ) που ανήκει στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.

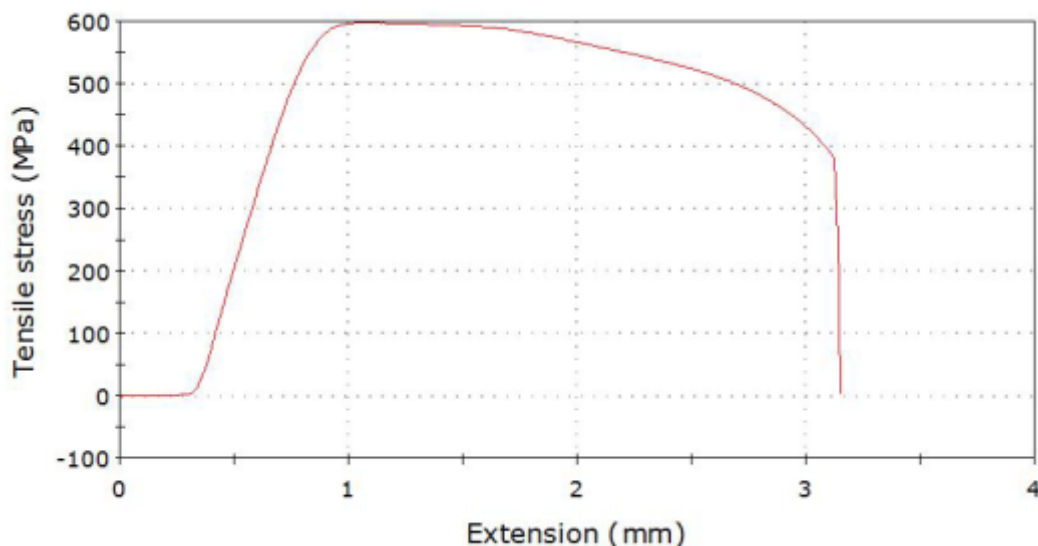
Πρόκειται για υδραυλική πρέσα διπλής ενεργείας και ονομαστικού φορτίου 100 tn (1000 kN). Κατασκευάστηκε από την εταιρεία SMG στη Γερμανία, είναι πρέσα ορθού πλαισίου (τύπου Ο) και διαθέτει μετασκευή CNC και εξυπηρέτηση από ρομποτικό βραχίονα V. Το κύριο έμβολο στηρίζεται στην κεφαλή της εργαλειομηχανής, κινείται από πάνω προς τα κάτω και έχει μέγιστη διαδρομή 600 mm. Το σεπόρτι της εργαλειομηχανής οδηγείται από ειδικές πρισματικές γλίστρες και διαθέτει μηχανικό εξολκέα. Η πρέσα που περιγράψαμε απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.1.)



Σχήμα 3.1: Η υδραυλική πρέσα, ονομαστικού φορτίου 100 tn, του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών.

Η ελάττωση του μεγέθους των δοκιμίων, (όλες οι διατάξεις πατήθηκαν κατά 80mm, με ταχύτητα εμβόλου 12m/min) δηλαδή το πόσο αναδιπλώθηκαν κατά αξονική διεύθυνση με εμφάνιση μη εκτατών λοβών, μετρήθηκε και καταγράφηκε σε Η/Υ από ειδική συσκευή καταγραφής και ανάλυσης δεδομένων, η οποία είναι συνδεδεμένη με την πρέσα. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την αριθμητική και γραφική αποτύπωση των αποτελεσμάτων της διαδικασίας είναι το LabVIEW8.6. της εταιρείας National Instruments. Επιπλέον πραγματοποιήθηκε λήψη μιας σειράς από φωτογραφίες, οι οποίες εξυπηρετούν περαιτέρω μοντελοποίηση των διατάξεων με χρήση του λογισμικού προσομοίωσης LS-DYNA. Ύ Επίλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων και δημιουργία θεωρητικής προσομοίωσης αυτών, την καταγραφή αποτελεσμάτων για το κάθε στάδιο της θλίψης σε όλα τα δοκίμια, καθ'όλη τη διάρκεια της φόρτισης και λεπτομερή οπτική ανάλυση των διατάξεων μετά την κατάρρευση, δίνοντας έμφαση στην επίδραση που ασκεί η πάροδος του χρόνου στην τελική μορφή των διατάξεων.

Για την κατασκευή των δοκιμίων χρειάστηκε η κατεργασία των λεπτότοιχων ορθογωνικών σωλήνων. Οι σωλήνες αυτοί χαρακτηρίζονται από διαστάσεις 30mm x 30mm και πάχος τοιχώματος $t = 1.4\text{mm}$. Επειδή οι σωλήνες πωλούνται σε καθορισμένο μήκος 6m, χρειάστηκε αρχικά να κοπούν σε δοκίμια. Στα πλαίσια του πειράματος διεξήχθη η αξονική θλίψη ενός δοκιμίου από μόνο του, καθώς επίσης και 7 τετράδων από σωλήνες. Το ύψος των διατάξεων διαφέρει μερικές εκατοντάδες μm του 120mm(σχεδιαστική διάσταση) καθώς διαφέρει ελάχιστα και από διάταξη σε διάταξη. Για να διαπιστώσουμε τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού των δοκιμίων και για να τις διακρίνουμε από τις ιδιότητες άλλων παρεμφερών υλικών, διεξαγάγαμε πείραμα εφελκυσμού στο μηχάνημα δοκιμών INSTRON 4482 του Εργαστηρίου του Τομέα από το οποίο προέκυψαν τα ζεύγη τιμών τάσης - παραμόρφωσης.



Σχήμα 3.2: Διάγραμμα εφελκυσμού του χάλυβα από τη δοκιμή στην INSTRON 4482.

Στον Πίνακα 3.1. παριστάνεται η πραγματική τάση και πραγματική παραμόρφωση που έχουν προέλθει από τη μηχανική τάση και παραμόρφωση του διαγράμματος, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Η παράθεση του πίνακα αυτού είναι αναγκαία επειδή ο κώδικας προσομοίωσης απαιτεί την εισαγωγή των τιμών πραγματικής τάσης (true stress) και πραγματικής παραμόρφωσης (true strain) για τη σωστή μοντελοποίηση της κατάρρευσης. Με άλλα λόγια, τα αριθμητικά δεδομένα του Πίνακα 3.1. βασίζονται στα δεδομένα που μας παρέχει η καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης του Σχήματος 3.2.:

Τάση (MPa)	Παραμόρφωση
500	0
540,3	0,0005
575,5	0,0008
601	0,0016
602	0,0031
603	0,0045
604,2	0,0069
607	0,0114

Πίνακας 3.1: Ζεύγη τιμών τάσης-παραμόρφωσης όπως προκύπτουν από το παραπάνω διάγραμμα.

3.2. Ο κώδικας μοντελοποίησης με πεπερασμένα στοιχεία LS-DYNA 3D.

Η ολοένα και αυξανόμενη ανάγκη για την επίλυση περίπλοκων προβλημάτων, τα οποία απαιτούν την όσο δυνατό πιο λεπτομερή και αξιόπιστη διακριτοποίηση γίνεται, με παράλληλη εξοικονόμηση χρόνου αλλά και ανθρώπινης εργασίας, οδήγησε στη δημιουργία κωδικών που επιτρέπουν τη μοντελοποίηση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων μέσω H/Y.

Ο κώδικας LS-DYNA 3D χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών στο Εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών (Κτίριο Ξ). Πρόκειται για ένα εξειδικευμένο πακέτο λογισμικού προσομοίωσης γενικής χρήσης, το οποίο αναπτύχθηκε από την εταιρεία Livermore Software Technology Corporation (LSTC). Καθώς περνά ο καιρός, το πρόγραμμα περιλαμβάνει ολοένα και περισσότερες δυνατότητες για την επίλυση πολλών περίπλοκων καθημερινών προβλημάτων. Η βασικότερη δυνατότητα για την οποία ξεχωρίζει αφορά την ανάλυση μη-γραμμικών μεταβατικών δυναμικών τρισδιάστατων προβλημάτων (προβλήματα πλαστικής παραμόρφωσης), χρησιμοποιώντας explicit χρονική ολοκλήρωση. Το LS-DYNA χρησιμοποιείται ευρέως, μεταξύ άλλων, από τις βιομηχανίες αυτοκινήτων, κατασκευών, κατεργασιών και εμβιομηχανικής. Η έκδοση του LS-DYNA 3D που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, για τη μοντελοποίηση της κατάρρευσης των συστοιχιών (τριάδων) των σωλήνων τετραγωνικής διατομής, είναι η έκδοση 970.

Ο κώδικας LS-DYNA έχει τις ρίζες του στο πρόγραμμα τρισδιάστατης ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων DYNA3D, το οποίο αναπτύχθηκε από τον Dr. John O. Hallquist στο Εθνικό Εργαστήριο Lawrence Livermore, στην California των ΗΠΑ. Το πρόγραμμα δημιουργήθηκε για την προσομοίωση της κρούσης μιας πυρηνικής βόμβας με δυνατότητα πλήρους σύντηξης, για ρίψη από χαμηλό ύψος, ώστε να προσκρούσει στο έδαφος με ταχύτητα περίπου ίση με 40 m/s.

Για μία τέτοια προσομοίωση, υπήρχε η ανάγκη ανάπτυξης ενός 3D κώδικα επειδή η 2D ανάλυση κρίθηκε ανεπαρκής. Το DYNA3D χρησιμοποιούσε explicit χρονική ολοκλήρωση για τη μελέτη μη-γραμμικών δυναμικών προβλημάτων, κυρίως σε εφαρμογές ανάλυσης τάσεων για δομές που υφίσταντο διάφορες μορφές κρούσης. Ο κώδικας κυκλοφόρησε για πρώτη φορά το 1978 για χρήση στο ευρύ κοινό. Αρχικά ήταν πολύ ογκώδης λόγω της μη ύπαρξης επαρκών υπολογιστικών πηγών εκείνη την εποχή, αλλά στη συνέχεια άρχισε να αναπτύσσεται και να γίνεται πιο εύκολος στη χρήση του. Συγκεκριμένα, το 1982 εισήχθησαν 9 πρόσθετα μοντέλα υλικών για χρήση σε νέες προσομοιώσεις, το 1986 εισήχθησαν οι δυνατότητες για μοντελοποίηση κελυφών (shells), στερεών σωμάτων (rigid bodies), επαφή απλής επιφάνειας (single surface contact), τριβή διεπιφάνειας (interface friction) και συμβατότητας με τα λειτουργικά συστήματα VAX/VMS, IBM, UNIX και COS. Εκείνη την εποχή, το DYNA3D έγινε ο πρώτος κώδικας που χρησιμοποίησε ποτέ ένα γενικό αλγόριθμο για επαφή απλής επιφάνειας. Το LS-DYNA έλαβε τη σημερινή του μορφή το 1988, οπότε και η εταιρεία LSTC, για την οποία έγινε λόγος παραπάνω, ανέλαβε τη συνέχιση της εξέλιξης του DYNA3D με μεγαλύτερη λεπτομέρεια. Από τότε, η LSTC επέκτεινε σημαντικά τις δυνατότητες του κώδικα προκειμένου για τη δημιουργία ενός πολυεργαλείου για τις περισσότερες ανάγκες προσομοίωσης.

3.3.Γενικά χαρακτηριστικά, δυνατότητες και τυπικές χρήσεις του LS-DYNA 3D

Το LS-DYNA 3D αποτελείται από ένα μόνο εκτελέσιμο αρχείο που οδηγείται εξ ολοκλήρου από μία γραμμή εντολών (command line). Όλα τα αρχεία εισόδου είναι σε απλή μορφή ASCII και, επομένως, μπορούν να δημιουργηθούν με τη χρήση οποιουδήποτε επεξεργαστή κειμένου, ή ενός γραφικού προ-επεξεργαστή (pre-processor), όπως αυτού της εταιρείας ETA για τον οποίο θα γίνει λόγος στη συνέχεια. Γενικά διατίθενται πολλά εξωτερικά λογισμικά για την προ-επεξεργασία αρχείων εισόδου του LS-DYNA, ενώ η εταιρεία LSTC έχει αναπτύξει και το δικό της προ-επεξεργαστή (LS-PrePost). Η εφαρμογή του κώδικα LS-DYNA δεν περιορίζεται μόνο σε ένα συγκεκριμένο είδος προσομοίωσης. Σε μία οποιαδήποτε προσομοίωση, οποιεσδήποτε από τις πολυάριθμες δυνατότητες του LS-DYNA μπορούν να συνδυαστούν για τη μοντελοποίηση διάφορων φυσικών φαινομένων. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα προσομοίωσης, το οποίο περιλαμβάνει ένα συνδυασμό πολλών χαρακτηριστικών, είναι η εφαρμογή *JPS Mars Pathfinder Landing*, η οποία αναπτύχθηκε από τη NASA για την προσομοίωση της χρήσης αεροσάκων σε ένα διαστημικό όχημα προκειμένου για την υποβοήθηση στην προσγείωσή του. Το LS-DYNA διαθέτει πλήρεις δυνατότητες 2D και 3D προσομοίωσης, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές όπως μη-γραμμική δυναμική ανάλυση, ανάλυση στερεών σωμάτων, θερμική ανάλυση, ρευστομηχανική ανάλυση, δυναμική σύζευξη πολλών σωμάτων (με τη βοήθεια και των κωδίκων MADYMO και Cal3D), ακουστική πραγματικού χρόνου, προσαρμοστική αναδιατύπωση πλέγματος, μεταφορά ακτινοβολίας, ηλεκτρομαγνητισμό και *ανάλυση κατάρρευσης*, η οποία είναι η εφαρμογή που μας απασχολεί κατά βάση στην παρούσα εργασία.

Οι τυπικές χρήσεις του κώδικα αφορούν γενικά τη *μη-γραμμική ανάλυση* και τη *μεταβατική δυναμική ανάλυση*. Η μη-γραμμική ανάλυση είναι σε θέση να αντιμετωπίσει τις ακόλουθες επιπλοκές:

- ✓ Μεταβλητές οριακές συνθήκες, όπως π.χ. επαφή μεταξύ στοιχείων του μοντέλου, η οποία μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου.
- ✓ Μεγάλες παραμορφώσεις, όπως π.χ. το τσαλάκωμα μεταλλικών φύλλων.

Μη-γραμμικά υλικά που δεν παρουσιάζουν ιδανική ελαστική συμπεριφορά (π.χ. θερμοπλαστικά πολυμερή).

Η μη-γραμμική ανάλυση στον κώδικα αφορά κυρίως γεγονότα μικρής διάρκειας και μεγάλης ταχύτητας, όπου παίζουν ιδιαίτερο λόγο οι αδρανειακές δυνάμεις. Η ανάλυση αυτή χρησιμοποιείται κυρίως στις εξής εφαρμογές:

- ✓ Πρόσκρουση οχημάτων (π.χ. παραμόρφωση του σασί, εξαγωγή των αεροσάκων, τάνυση της ζώνης ασφαλείας κλπ.).
- ✓ Εκρήξεις (π.χ. υποβρύχιες νάρκες).
- ✓ Κατεργασίες (π.χ. σφράγιση μεταλλικών φύλλων).

3.4. Βασικές πληροφορίες για τη διακριτοποίηση και τη δημιουργία του μοντέλου.

Για την έναρξη της μοντελοποίησης με τη χρήση του LS-DYNA 3D, θα χρησιμοποιήσουμε αρχικά τον προ-επεξεργαστή (Pre-Processor) του προγράμματος, ο οποίος προέρχεται από την εταιρεία ETA. Η έκδοση που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του μοντέλου είναι η έκδοση 28.0. Αρχικά δηλώνουμε πλήρως τη γεωμετρία του μοντέλου, με τις ακριβείς διαστάσεις του. Στη συνέχεια δηλώνουμε τα υλικά από τα οποία αποτελείται, μαζί με τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του καθενός. Ακολουθεί η διακριτοποίηση σε πλέγμα, με χρήση πεπερασμένων στοιχείων, για τα οποία καθορίζονται οι ιδιότητες. Αμέσως μετά ορίζονται οι διεπιφάνειες μεταξύ των σωμάτων που πρόκειται να έρθουν σε επαφή κατά την προσομοίωση, κάτι που είναι απαραίτητο προκειμένου να μην παρατηρηθεί εισχώρηση ενός τμήματος του μοντέλου εντός του άλλου καθώς εκτελείται η προσομοίωση. Τέλος, προσδιορίζονται τυχόν εξωτερικά φορτία που επιδρούν σε ολόκληρο το σύστημα, όπως επίσης και οι αρχικές συνθήκες (π.χ. αρχική ταχύτητα και/ή επιτάχυνση).

Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενες σελίδες, τα δοκίμιά μας έχουν εξωτερικές ονομαστικές διαστάσεις 30mm x 30mm x 1.4mm. Καθώς όμως μετρήσαμε τις διαστάσεις στο Εργαστήριο με χρήση παχυμέτρου, παρατηρήσαμε ότι οι πραγματικές διαστάσεις διέφεραν, έστω και σε πολύ μικρό βαθμό, από τις ονομαστικές. Με βάση τα παραπάνω, η προσομοίωση στο LS-DYNA 970 έγινε με τις εσωτερικές διαστάσεις 28.6 mm x 28.6 mm, ενώ στη συνέχεια ορίστηκε κοινό πάχος τοιχώματος 1.4 mm, μέσω του μενού Property στον Pre-Processor, για τα χαλύβδινα δοκίμια. Το πλέγμα διακριτοποίησης που επιλέξαμε για τα δοκίμια είναι Shell Element, ενώ προφανώς ορίσαμε σε αυτά την ιδιότητα (Property) Shell. Η μέθοδος επίλυσης με πεπερασμένα στοιχεία για τα δοκίμια επιλέχθηκε να είναι η Belytschko- Tsay (Element Formulation = 2), η οποία αποτελεί την προεπιλεγμένη (default) μορφολογία που χρησιμοποιεί το LS-DYNA για πεπερασμένα στοιχεία κελύφους (Shell Elements).

Η μέθοδος αυτή χαρακτηρίζεται από μεγάλη αποτελεσματικότητα και αποδοτικότητα στην επίλυση ενώ απαιτεί λιγότερο υπολογιστικό χρόνο σε σχέση με τις περισσότερες μορφολογίες. Σε ορισμένες περιπτώσεις, υπάρχει επίσης η δυνατότητα επίλυσης του προβλήματος με χρήση πλήρως ενσωματωμένων πεπερασμένων στοιχείων κελύφους (Fully Integrated Shell Elements, ELFORM = 16), τα οποία αυξάνουν τη στιβαρότητα της διάταξης και, κατά συνέπεια, την αντοχή της. Βέβαια, σε ορισμένες περιπτώσεις μοντελοποίησης, η χρήση πλήρως ενσωματωμένων πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια της λύσης και εμφάνιση «ταχυτήτων εκτός πεδίου» (out-of-range velocities) σε συγκεκριμένους κόμβους, όσο εκτελείται ο κώδικας στο Solver. Η επιλογή της μορφολογίας Belytschko - Tsay (2) φαίνεται να λύνει αυτό το πρόβλημα, αλλά ενδέχεται να παρουσιαστούν ορισμένες διαφοροποιήσεις στη μοντελοποίηση μετά την πλήρη εκτέλεση του κώδικα. Για να διαπιστωθεί το μέγεθος αυτών των διαφοροποιήσεων, έγινε δοκιμή εκτέλεσης ενός τυχαίου μοντέλου κατάρρευσης με συγκόλληση, στο Solver του LS-DYNA, με μορφολογίες Fully Integrated Shell Element (16) και Belytschko - Tsay (2). Επειδή δε λαμβάνει χώρα στρέβλωση των κόμβων κατά την κατάρρευση, τα φορτία που αναπτύσσονται καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας είναι παραπλήσια και το μέσο φορτίο όλης της διαδικασίας διαφέρει κατά το πολύ 1 kN από τη μία μορφολογία στην άλλη. Αυτό σημαίνει ότι η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων δεν επηρεάζεται, όποια μορφολογία και αν επιλέξουμε.

Ένα βασικό θέμα που κρίζει συζήτησης αφορά τη διακριτοποίηση του πλέγματος. Είναι ένα ζήτημα σημαντικό, προκειμένου να δίνει σωστά αποτελέσματα το πρόγραμμα αλλά και να μην απαιτείται μεγάλος χρόνος για την επίλυση του εκάστοτε προβλήματος. Αρχικά, με δεδομένο το είδος της καταπόνησης και της αναμενόμενης παραμόρφωσης, η οποία είναι αξονική και είναι πιθανό να δημιουργηθούν λοβοί σε όλο το μήκος του δοκιμίου, είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθεί σχετικά πυκνό πλέγμα σε όλο το μήκος του δοκιμίου. Για να γίνει ακριβής μοντελοποίηση της κατάρρευσης των δοκιμίων, απαιτείται η διακριτοποίηση των διαστάσεων του κάθε δοκιμίου σε πλέγμα διάστασης περίπου 2 mm ανά πεπερασμένο στοιχείο. Αυτό σημαίνει ότι η διάσταση του μήκους και του πλάτους (28.6 mm) θα διακριτοποιηθεί σε 14 πεπερασμένα στοιχεία και του ύψους (120 mm) σε 60 στοιχεία. Εδώ αξίζει να αναφέρουμε ότι οι θέσεις όπου μπορούν να σχηματιστούν λοβοί, καθώς επίσης και ο αριθμός των λοβών που μπορούν να σχηματιστούν, αυξάνονται καθώς ελαττώνεται πάχος της διατομής.

Κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, οι διάφορες διατάξεις χαλύβδινων δοκιμίων βρίσκονται τοποθετημένες ανάμεσα σε δυο σταθερές βάσεις και ένα έμβολο το οποίο κατέρχεται με ταχύτητα 12 m/min, πιέζει την κάθε διάταξη κατά 80 mm. Η σταθερή βάση μοντελοποιείται στο LS-DYNA ως μία πλάκα σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου, στην οποία οι διαστάσεις δεν παίζουν ρόλο αλλά θα πρέπει να είναι επαρκώς μεγάλες προκειμένου να μην εξέχουν τα δοκίμια από τις πλάκες κατά την εκτέλεση του κώδικα, επηρεάζοντας ενδεχομένως το αποτέλεσμα της μοντελοποίησης. Για να εξασφαλίσουμε ότι σε καμία διάταξη δε θα υπάρχει κίνδυνος να εξέχει υλικό από τις πλάκες, σχεδιάσαμε τις πλάκες με διαστάσεις 500mm x 500mm x 20 mm.

Οι τιμές για το μήκος και το πλάτος επελέγησαν κατά τέτοιον τρόπο, ώστε να υπερκαλύπτεται σε κάθε περίπτωση το συνολικό μήκος όλων μαζί των δοκιμίων, αφήνοντας πάντα ένα περιθώριο ασφαλείας για οποιοδήποτε ενδεχόμενο.

Στη συνέχεια, ορίσαμε τις ιδιότητες των υλικών τόσο της διάταξης χαλύβδινων δοκιμίων όσο και των δύο πλακών ανάμεσα στις οποίες βρίσκεται η διάταξη αυτή. Χάριν απλότητας, θεωρήσαμε ότι όλα τα στοιχεία του μοντέλου είναι κατασκευασμένα από ασημένιο χάλυβα, του οποίου η καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης παριστάνεται στο Σχήμα 4.2. σε μορφή γραφήματος ή στον Πίνακα 4.1. σε πινακοποιημένη μορφή. Οι ιδιότητες του χάλυβα αυτού, οι οποίες αντικαταστάθηκαν στο μενού Material του LS-DYNA, τόσο για τα δοκίμια όσο και για τις πλάκες, παρατίθενται παρακάτω, με μονάδες μέτρησης ίδιες με αυτές στις οποίες θα πρέπει να εισαχθούν τα αριθμητικά δεδομένα στο Material Module:

Μέτρο ελαστικότητας Young (Young's Modulus): $E = 207000\text{MPa}$

Πυκνότητα υλικού (Mass Density): $\rho = 0.00783\text{ gr/mm}^3$

Όριο διαρροής (Yield Stress): $\sigma_A = 500\text{MPa}$

Λόγος Poisson (Poisson's Ratio): $\nu = 0.3$

Ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιήσαμε τις πλάκες, οι οποίες προφανώς παίζουν το ρόλο στερεών σωμάτων, ήταν ο MAT_RIGID. Οι πλάκες αυτές δε διακριτοποιήθηκαν, αλλά θεωρήθηκαν ότι αποτελούνται από μόνο ένα στοιχείο solid element με 8 κόμβους. Επίσης, ο χάλυβας μοντελοποιήθηκε με χρήση της ιδιότητας MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY, παριστάνοντας ένα υλικό στο οποίο, κάποια στιγμή μετά την έναρξη της εφαρμογής φορτίου πάνω σε αυτό, αρχίζει να επενεργεί πλαστική παραμόρφωση. Για να προσομοιώσουμε σωστά τη συμπεριφορά του υλικού, αντικαταστήσαμε, στο μενού Material, τις τιμές των ζευγών τάσης - παραμόρφωσης για τον ασημένιο χάλυβα, από τον Πίνακα 4.1. Όσον αφορά τις δύο πλάκες, ορίσαμε σταθερή ταχύτητα πρόωσης του εμβόλου, ή αλλιώς κίνησης της άνω πλάκας, ίση με $u = -1\text{m/sec}$, όπου το αρνητικό πρόσημο δηλώνει φορά προς τα κάτω, δηλαδή κατά τα αρνητικά του άξονα z. Ορίσαμε επίσης, ως περιορισμό, να μην κινείται η πλάκα κατά τους άξονες x και y, αλλά και να μην περιστρέφεται. Τέλος, ζητήσαμε από τον κώδικα να μοντελοποιήσει την κάτω πλάκα (σταθερή βάση) κατά τέτοιον τρόπο, ώστε να μην μπορεί ούτε να κινηθεί αλλά ούτε και να περιστραφεί. Για την προσομοίωση καθενός από τα μοντέλα, ορίσαμε τρεις διεπιφάνειες μεταξύ των σωμάτων που επρόκειτο να έρθουν σε επαφή:

(α) Διεπιφάνεια επαφής μεταξύ της κάτω επιφάνειας (segment) της άνω πλάκας και του κελύφους. Για τη μοντελοποίηση της επαφής αυτής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος τρισδιάστατης επαφής CONTACT_NODES_TO_SURFACE.

(β) Διεπιφάνεια επαφής μεταξύ της άνω επιφάνειας (segment) της κάτω πλάκας και του κελύφους. Χρησιμοποιήθηκε η ίδια μέθοδος τρισδιάστατης επαφής με τη διεπιφάνεια (α) για τη μοντελοποίηση.

(γ) Διεπιφάνεια επαφής μεταξύ των διαφόρων τμημάτων του κελύφους με το ίδιο το κέλυφος (self-contact). Για τη μοντελοποίηση της επαφής αυτής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος επαφής AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE.

Για όλες τις διεπιφάνειες (α) έως (γ) ορίστηκε συντελεστής στατικής τριβής $F_s = 0.30$ και δυναμικής τριβής $F_D = 0.25$.

3.5. Αποθήκευση, εξαγωγή και επεξεργασία του υπολογιστικού μοντέλου. Εξαγωγή αποτελεσμάτων.

Αφότου έχει καταστρωθεί πλήρως το μοντέλο στον Pre-Processor του LS-DYNA, τα δεδομένα που το αποτελούν σώζονται σε μορφή ψηφιακού αρχείου *.fmb. Σε αυτό το αρχείο περιέχεται ουσιαστικά ολόκληρο το μοντέλο το οποίο καλείται να επιλύσει το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Ανά πάσα στιγμή μπορούμε να επέμβουμε σε αυτό και να τροποποιήσουμε εκ νέου τη γεωμετρία του μοντέλου και τα υπολογιστικά στοιχεία που είναι απαραίτητα για να επιλυθεί το πρόβλημα. Το LS-DYNA δίνει τη δυνατότητα εξαγωγής του ψηφιακού αρχείου *.fmb σε αρχείο με την επέκταση *.dyn, το οποίο περιέχει κείμενο που μπορεί να τροποποιηθεί ανοίγοντας οποιονδήποτε επεξεργαστή κειμένου, όπως το Σημειωματάριο (Notepad) των Windows. Στην πραγματικότητα, το παραπάνω αρχείο περιέχει, σε κωδικοποίηση ASCII, όλα τα στοιχεία που χρειάζεται ο κώδικας προκειμένου να προσομοιώσει την αξονική κατάρρευση κάθε διάταξης. Αυτή η δυνατότητα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, επειδή απαλλάσσει το χρήστη από επίπονη διαδικασία, όταν οι αλλαγές που επιθυμεί να πραγματοποιήσει είναι τόσο απλές ώστε να μπορούν να πραγματοποιηθούν μέσα από τον επεξεργαστή κειμένου και όχι μέσα από τον Pre-Processor και το αντίστοιχο αρχείο *.fmb. Αφότου έχει γίνει η πλήρης επεξεργασία του μοντέλου, το τελικό αρχείο *.dyn εισάγεται στο εργαλείο επίλυσης (Solver) του LS-DYNA, το οποίο ουσιαστικά επιλύει το πρόβλημα με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Ουσιαστικά ο Solver αποτελεί τον κυρίως κώδικα όλου του προγράμματος. Ανάλογα με το πλήθος και την πολυπλοκότητα των στοιχείων και των συνθηκών που περιλαμβάνονται, καθορίζεται και ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος. Για την κατανόηση της τάξης μεγέθους του χρόνου επίλυσης, αναφέρουμε χαρακτηριστικά ότι η ανάλυση της αξονικής κατάρρευσης μίας συστοιχίας από 3 λεπτότοιχους σωλήνες ορθογωνικής διατομής, με χρήση τυπικού Η/Υ σύγχρονης τεχνολογίας, διαρκεί περίπου 2 ώρες. Το χρονικό αυτό διάστημα μειώνεται σε περίπου 80 λεπτά όταν πρόκειται να εξετάσουμε την αξονική θλίψη ενός μόνο σωλήνα.

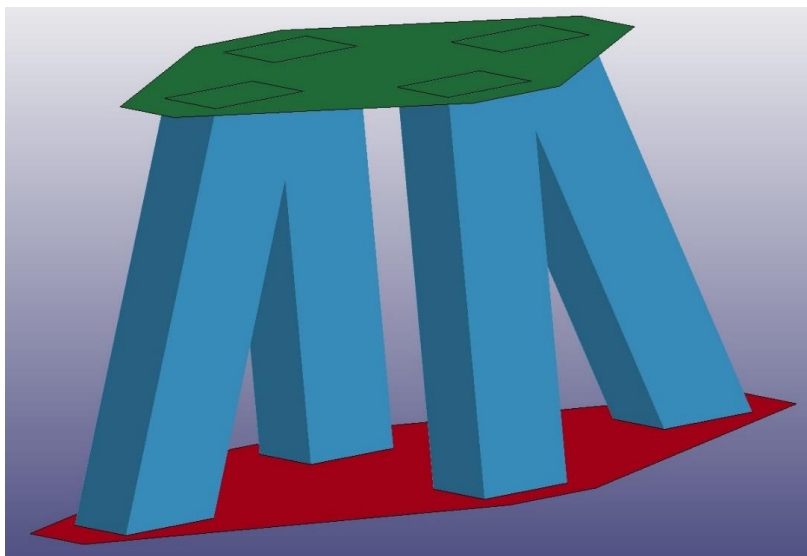
Όταν ο Solver ολοκληρώσει την επίλυση του προβλήματος, το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζει τα απαραίτητα αρχεία στα οποία έχουν καταγραφεί τα αποτελέσματα της επεξεργασίας. Το μεν αρχείο d3plot χρησιμοποιείται από τον Post-Processor για την ακριβή προσομοίωση της θεωρητικής κατάρρευσης των μοντέλων μας, σε μορφή animation, δίνοντας επίσης τη δυνατότητα προσομοίωσης της μεταβολής όλων των αναπτυσσόμενων τάσεων κατά την κατάρρευση. Το δε αρχείο rcforg χρησιμοποιείται από τον επεξεργαστή γραφημάτων (Graph-Processor) προκειμένου για την απεικόνιση της εξέλιξης του φορτίου κατά την κατάρρευση, με τη μορφή γραφημάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

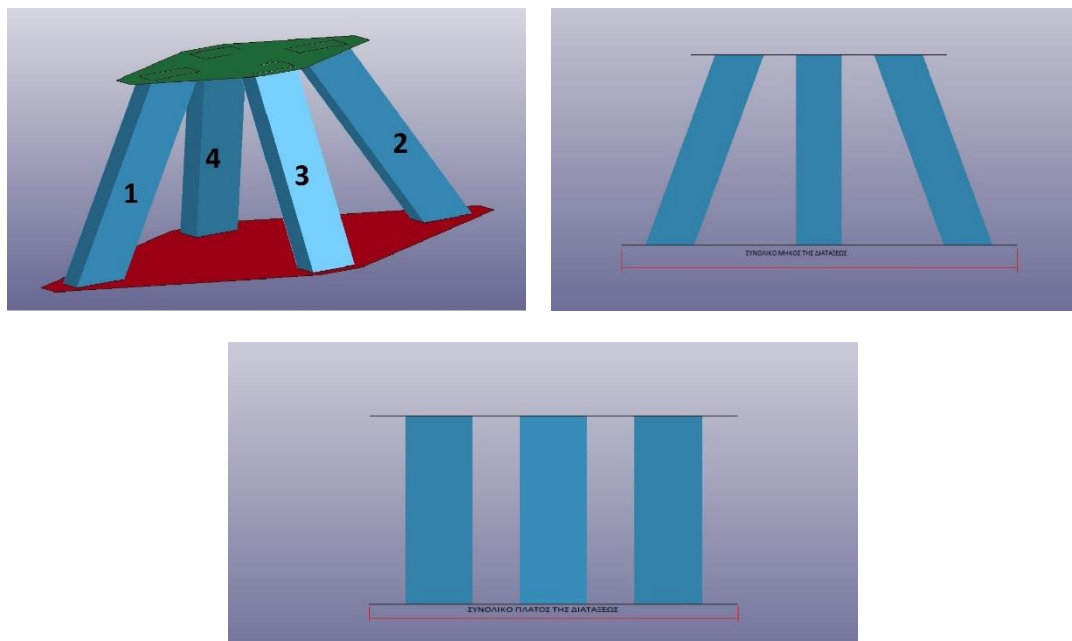
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.

4.1. Εισαγωγικά στοιχεία και παρουσίαση των διαφόρων διατάξεων.

Όλες οι διατάξεις με τις οποίες θα ασχοληθούμε στην παρούσα εργασία, και στις οποίες θα εξετάσουμε τη συμπεριφορά τους κατά την αξονική κατάρρευση, όπως αυτή παρουσιάζεται τόσο μέσω της πειραματικής διαδικασίας στο Εργαστήριο όσο και μέσω της μοντελοποίησης με πεπερασμένα στοιχεία στο LS-DYNA 3D, αποτελούνται από χαλύβδινους λεπτότοιχους σωλήνες ορθογωνικής διατομής. Το εξωτερικό μήκος του καθενός είναι 30mm, το εξωτερικό πλάτος 30mm και το πάχος τοιχώματος 1.4mm. Το ύψος κάθε σωλήνα έχει τιμή περί τα 120 mm, με πολύ μικρές αποκλίσεις, τάξης μεγέθους 100 μm, από σωλήνα σε σωλήνα. Οι χαλύβδινοι λεπτότοιχοι σωλήνες σταθεροποιούνται σε κάθε διάταξη σε δυο πλάκες, του ίδιου υλικού με τις σωλήνες και διαστάσεων ανάλογων των γωνιών τοποθέτησης των σωλήνων, διαστάσεων εξαρτώμενων των γωνιών τοποθέτησης, αλλά σταθερού πάχους 3mm, το οποίο πάντα προστίθεται στο ύψος των σωλήνων. Σε κάθε περίπτωση το πάχος τους παραμένει σταθερό και ίσο με 3mm. Κατά τη διάρκεια της πειραματικής και αριθμητικής μελέτης μας, θα ασχοληθούμε με συνολικά οχτώ (8) διατάξεις. Η μία θα αφορά ένα μονό σωλήνα, ενώ οι άλλες 7 θα αφορούν τετράδες σωλήνων. Ανάλογα τη διάταξη, οι σωλήνες τοποθετήθηκαν σε διαφορετικές γωνίες (οι απέναντι πάντα υπό την ίδια γωνιά κάνοντας ζευγάρια των δυο), προσδίδοντας έτσι ένα διαφορετικό συνολικό μήκος και συνολικό πλάτος στη διάταξη. Μία τυπική διάταξη των δοκιμών όπως αυτή προσομοιώνεται στο LS-DYNA 3D, εμφανίζεται στο παρακάτω Σχήμα 4.1:



Σχήμα 4.1: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης σωλήνων ορθογωνικής διατομής, όπως προσομοιώνεται στο πρόγραμμα ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία LS-DYNA3D.



Σχήμα 4.2: Σχηματικός προσδιορισμός σημείων των διατάξεων και συνολικών διαστάσεων.

Παρακάτω παρουσιάζεται πίνακας με τα βασικά χαρακτηριστικά που καθορίζουν την ταυτότητα της κάθε διάταξης. Σε αυτόν περιλαμβάνονται οι αριθμητικές τιμές της γωνίας τοποθέτησης των σωλήνων καθώς και το συνολικό μήκος και πλάτος των διατάξεων. Εδώ θα σημειωθεί πως το συνολικό ύψος κάθε διάταξης διατηρείτε σταθερό περί των 120mm. Επίσης στο παρακάτω σχήμα φαίνονται σημεία ώστε να γίνει πιο εύκολη η κατανόηση των διατάξεων και των διαστάσεων τους. Ξεχωριστή αναφορά στον μονό δοκιμαστικό σωλήνα με διαστάσεις 30mm x 30mm x 1.4mm και ύψος 120mm.

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	ΓΩΝΙΑ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΣΩΛΗΝΩΝ (1,2)	ΓΩΝΙΑ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΣΩΛΗΝΩΝ (3,4)	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ(mm)	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΠΛΑΤΟΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ(mm)
1	0 ⁰	0 ⁰	160	160
2	0 ⁰	10 ⁰	198.9	160
3	0 ⁰	20 ⁰	246.8	160
4	0 ⁰	30 ⁰	303.18	160
5	10 ⁰	10 ⁰	198.9	198.9
6	20 ⁰	20 ⁰	246.8	246.8
7	30 ⁰	30 ⁰	303.18	303.18

Πίνακας 4.1: Γενικά χαρακτηριστικά των προς εξέταση διατάξεων.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου, θα παρουσιάσουμε σχηματικά την κάθε διάταξη ξεχωριστά, μαζί με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της καθεμίας.

4.2. Γενικά συγκριτικά χαρακτηριστικά του πειράματος με την προσομοίωση. Προσεγγίσεις και παραδοχές.

Ο σκοπός της προσομοίωσης, με χρήση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA 3D, είναι η προσέγγιση της πειραματικής διαδικασίας κατάρρευσης των διατάξεων. Παρ' όλα αυτά, είναι σαφές ότι υπάρχουν διαφορές μεταξύ της πραγματικής διάταξης και του μοντέλου που καταστρώνεται στον κώδικα. Γενικά, το περιβάλλον ενός κώδικα πεπερασμένων στοιχείων είναι ιδεατό και εξιδανικευμένο. Δε λαμβάνει υπόψη την ύπαρξη τυχόν ατελειών στο πραγματικό δοκίμιο, οι περισσότερες εκ των οποίων δεν μπορούν να μετρηθούν ή να προβλεφθούν. Στη συνέχεια θα περιγράψουμε τα διάφορα χαρακτηριστικά των πραγματικών διατάξεων, τα οποία ο κώδικας μοντελοποίησης δε λαμβάνει υπόψη, με συνέπεια να δίνει, σε κάποιο βαθμό, διαφορετικά αποτελέσματα από αυτά που δίνει η πειραματική διαδικασία.

Αρχικά αναφέρουμε ότι όλα τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν προήλθαν από ελάσματα, άρα είναι ανισότροπα λόγω της έλασης. Κάθε σωλήνας έχει στραντζαριστεί, με αποτέλεσμα η κάμψη του ελάσματος να προκαλέσει αντίστοιχη προένταση. Η παραπάνω κάμψη δημιουργεί μία πολύ μικρή ακτίνα καμπυλότητας, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα την κατά τόπους μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων και του πάχους του σωλήνα κατά μήκος της ακμής. Επίσης, η κάμψη του ελάσματος κάνει τα απέναντι τοιχώματα του σωλήνα να μην είναι εντελώς παράλληλα μεταξύ τους.

Ένας βασικός λόγος για την μη ύπαρξη ομοιόμορφων μηχανικών ιδιοτήτων σε όλη την έκταση κάθε δοκιμίου είναι η ύπαρξη ραφής συγκόλλησης σε αυτό. Επειδή κάθε σωλήνας συγκολλήθηκε, διαφοροποιήθηκαν οι μηχανικές ιδιότητες και αναπτύχθηκαν παραμένουσες τάσεις στη ραφή συγκόλλησης και στη θερμικά επηρεασμένη περιοχή. Η ραφή συγκόλλησης επηρεάζει επίσης το πάχος του τοιχώματος κατά μήκος της, το οποίο διαφέρει από θέση σε θέση, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να μετρηθεί και να προσομοιωθεί στον υπολογιστή. Επίσης, το μοντέλο του κώδικα προσομοίωσης θεωρεί το υλικό ιδεατό, δηλαδή ομοιογενές και ισότροπο σε όλη την έκτασή του. Οι ακμές μοντελοποιούνται τέλειες ορθές γωνίες και το πάχος είναι ίσο με το ονομαστικό σε όλα τα τοιχώματα και σημεία του δοκιμίου.

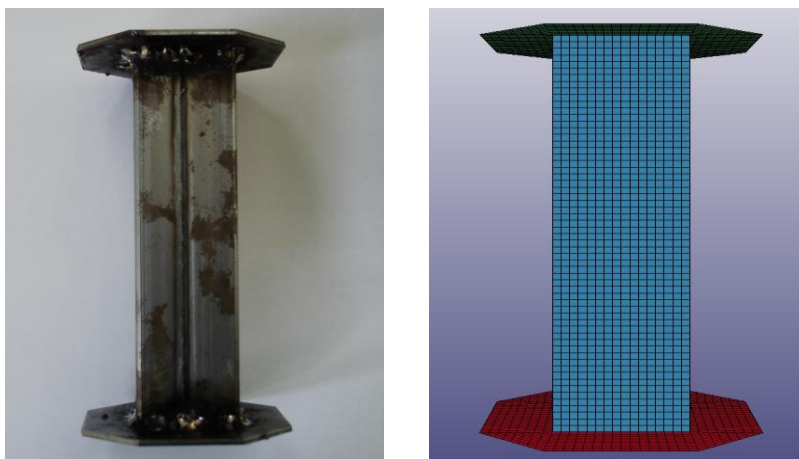
Ένας άλλος λόγος στον οποίο οφείλονται τυχόν διαφορές μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων είναι η κατεργασία του υλικού με σκοπό την κατασκευή των δοκιμίων που θα χρησιμοποιηθούν στα πειράματά μας. Επειδή οι λεπτότοιχες ορθογωνικές διατομές ονομαστικών διαστάσεων 30mm x 30mm πωλούνται στην αγορά σε μήκος 6 μέτρων, και θέλουμε να έχουμε στη διάθεσή μας δοκίμια ύψους περί τα 120 mm, ακολουθήσαμε κατεργασίες κοπής σε πριόνι (κορδέλα), ώστε να προκύψουν τα επιθυμητά δοκίμια. Οι κατεργασίες αυτές προκάλεσαν αποκλίσεις, έστω και πάρα πολύ μικρές, ως προς την παραλληλότητα του μετώπου. Αντίθετα, το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων στο LS-DYNA παρουσιάζει τον κάθε σωλήνα με απολύτως παράλληλα μέτωπα.

Ένα ακόμα στοιχείο που προσεγγίζεται στη μοντελοποίηση είναι οι οριακές συνθήκες, οι οποίες αφορούν την τριβή μεταξύ των πλακών συμπίεσης και των μετώπων των δοκιμίων, αλλά και αυτή που δημιουργείται μεταξύ των πλευρών των δοκιμίων κατά τη δημιουργία των λοβών, όταν αυτές έρχονται σε επαφή. Οι συντελεστές στατικής τριβής $FS = 0.30$ και δυναμικής τριβής $FD = 0.25$, οι οποίοι έχουν εισαχθεί στον κώδικα μοντελοποίησης, αφορούν τις κατεργασμένες επιφάνειες και τα υλικά τους όταν έρχονται σε επαφή. Παρ'όλα αυτά, αυτοί οι συντελεστές είναι πιθανό να μεταβάλλονται καθώς τα δοκίμια καταρρέουν, λόγω της δημιουργίας λοβών και της εφαρμογής φορτίων.

Παρακάτω γίνεται αναλυτική παρουσίαση του μονού σωλήνα (1), πειραματική και μοντελοποιημένη μορφή. Στη συνέχεια ακολουθεί παρουσίαση των υπολοίπων διατάξεων, σύγκριση περάματος και μοντελοποίησης, απαραίτητων υπολογισμών και τέλος συνολική ανάλυση των διατάξεων 2-8.

4.3. Πείραμα και προσομοίωση για το μονό δοκίμιο (1).

Αξίζει αρχικά να ασχοληθούμε με την παρουσίαση αξονικής θλίψης σε ένα λεπτότοιχο μονό σωλήνα, ώστε να παρατηρήσουμε τον τρόπο κατάρρευσης του. Πρόκειται για ένα δοκίμιο με εξωτερικές διαστάσεις 30mm x 30mm ύψους 126mm (ύψος σωλήνα 120mm, πάχος πλακών συγκόλλησης 2x3mm) και πάχους 1.4 mm. Παρακάτω φαίνονται δυο εικόνες, μια για το πραγματικό δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο και μια όπως αυτό μοντελοποιήθηκε στο Pre-Processor, για την ευκολότερη κατανόηση του. Κατά την μοντελοποίηση στον Pre-Processor το δοκίμιο θεωρείται ομοιογενές, χωρίς ραφή συγκόλλησης και ισότροπο.



Σχήμα 4.3: Παρουσίαση πλήρους δοκιμίου, όπως προσομοιώνεται στον Post-Processor του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA καθώς και όπως αυτό φαίνεται στην πραγματικότητα.

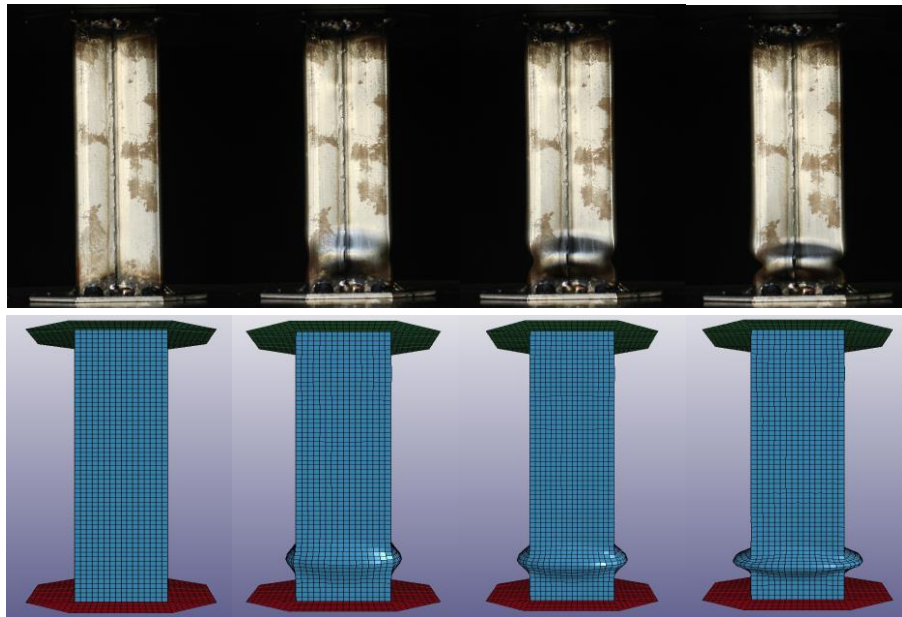
Κατά τη διάρκεια της καταπόνησης του δοκιμίου σε αξονική θλίψη στο Εργαστήριο, ελήφθησαν συνολικά 15 στιγμιότυπα. Προκειμένου να διεξαχθεί όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστη σύγκριση μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης, θα μας είναι πολύ χρήσιμος ο παρακάτω Πίνακας 5.3.. Σε αυτόν παριστάνεται ο αριθμός του κάθε στιγμιότυπου που ελήφθη στο Εργαστήριο και η βράχυνση του δοκιμίου (μετατόπιση του εμβόλου) σε mm που αντιστοιχεί στο στιγμιότυπο, όπως αυτή μετρήθηκε με χρήση της μετρητικής συσκευής που είναι συνδεδεμένη με την πρέσα.

Το πρώτο στιγμιότυπο αντιστοιχεί σε μηδενική βράχυνση, ενώ στο τελευταίο η πλάκα έχει συμπιεστεί κατά 80 mm. Σημειώνουμε εδώ ότι, στη στήλη που παριστάνει τη μετατόπιση του εμβόλου, το αρνητικό πρόσημο δηλώνει κίνηση κατά τα αρνητικά του άξονα z.

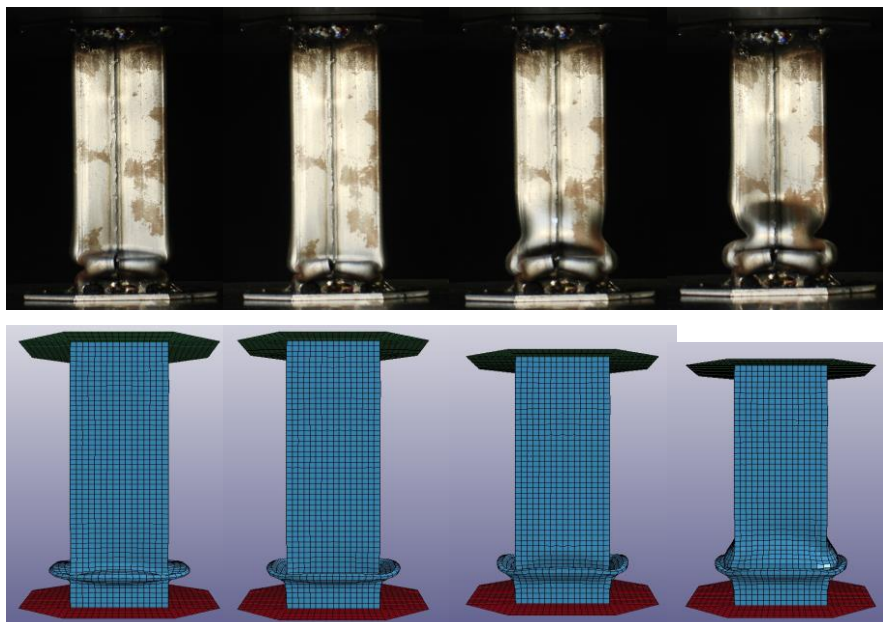
<u>Στιγμιότυπο</u>	<u>Βράχυνση δοκιμίου (μετατόπιση του εμβόλου) (mm)</u>
1	0
2	-5
3	-7.3
4	-10.5
5	-14.5
6	-21
7	-28.1
8	-35.7
9	-41.7
10	-47.5
11	-55.6
12	-62.5
13	-70
14	-75.1
15	-80

Πίνακας 4.2. Παρουσίαση των στιγμιότυπων που ελήφθησαν κατά τη διαδικασία κατάρρευσης του μονού δοκιμίου.

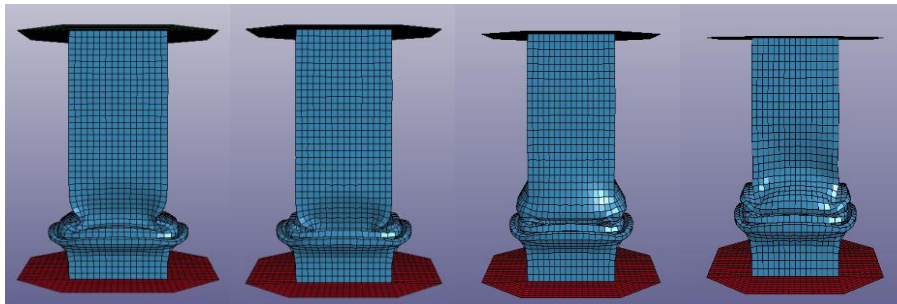
Η παρακάτω απεικόνιση παρουσιάζεται παράλληλα η κατάρρευση του δοκιμίου στα 15 στιγμιότυπα του πειράματος και της προσομοίωσης, για τα οποία έγινε αναφορά, μέσω της βράχυνσης τους, στον παραπάνω πίνακα. Όλα τα στιγμιότυπα παριστάνουν το δοκίμιο σε πλάγια όψη από αριστερά, όπως ακριβώς συμβαίνει και στις υπόλοιπες διατάξεις που θα εξεταστούν. Όπως θα διαπιστώσουμε κατά τη σύγκριση, η κατάρρευση του πειραματικού δοκιμίου ξεκινάει στην ίδια πλευρά καθ' ύψος, σε σχέση με το υπολογιστικό μοντέλο. Με άλλα λόγια, ο κώδικας και το πρόγραμμα θεωρούν ως πιο αδύναμο το κάτω άκρο του σωλήνα, όπου δημιουργούνται οι λοβοί.



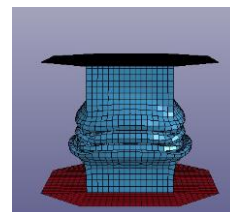
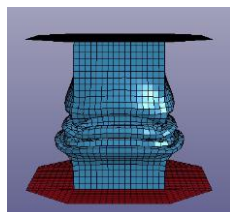
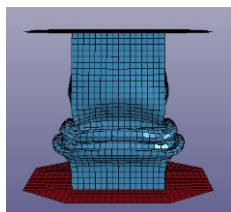
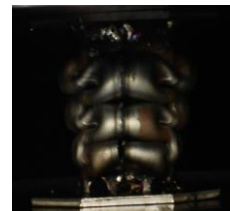
Στιγμιότυπο 1 Στιγμιότυπο 2 Στιγμιότυπο 3 Στιγμιότυπο 4



Στιγμιότυπο 5 Στιγμιότυπο 6 Στιγμιότυπο 7 Στιγμιότυπο 8



Στιγμιότυπο 9 Στιγμιότυπο 10 Στιγμιότυπο 11 Στιγμιότυπο 12

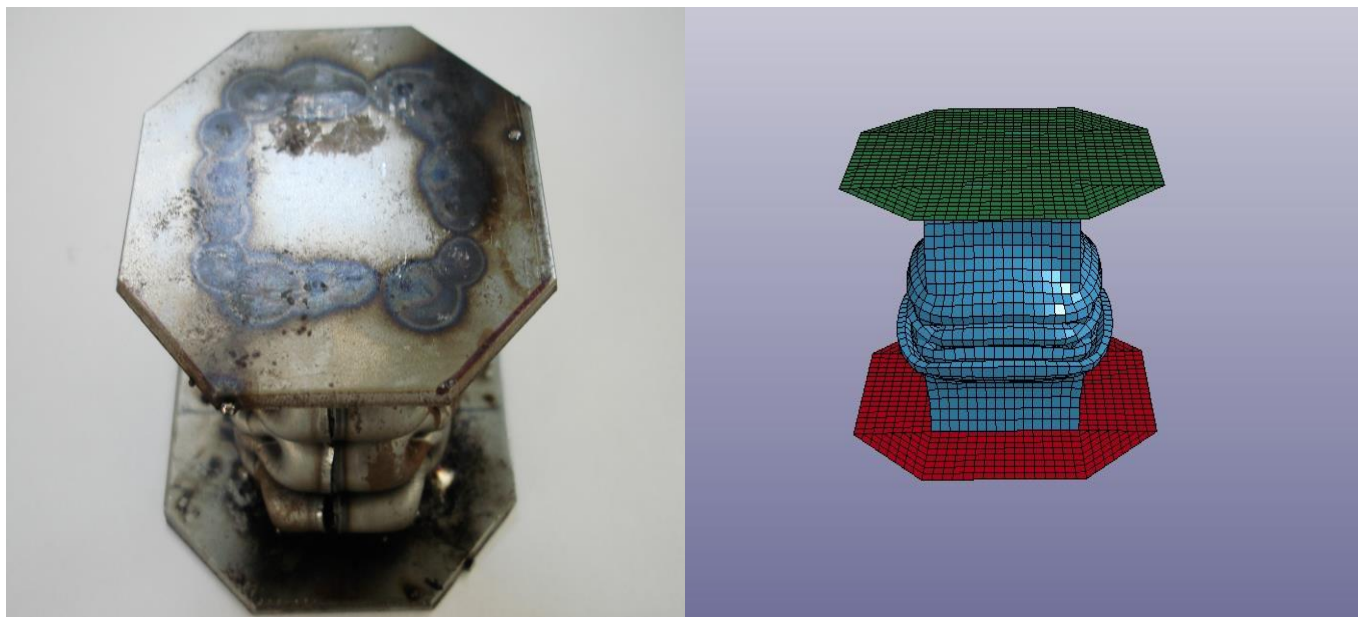


Στιγμιότυπο 13

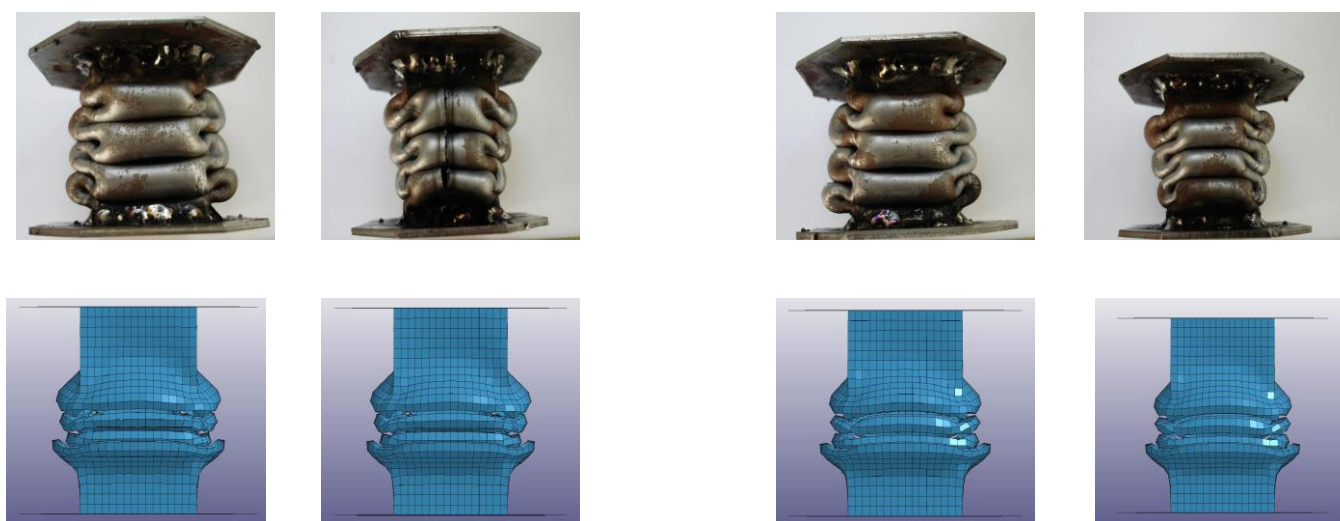
Στιγμιότυπο 14

Στιγμιότυπο 15

Σχήμα 4.4: Στιγμιότυπα του μόνου δοκιμίου από την πειραματική διαδικασία, και αντιστοίχισή τους με στιγμιότυπα (frames) από την προσομοίωση στον υπολογιστή.



Σχήμα 4.5: Αξονομετρική προβολή του τελικού δοκιμίου

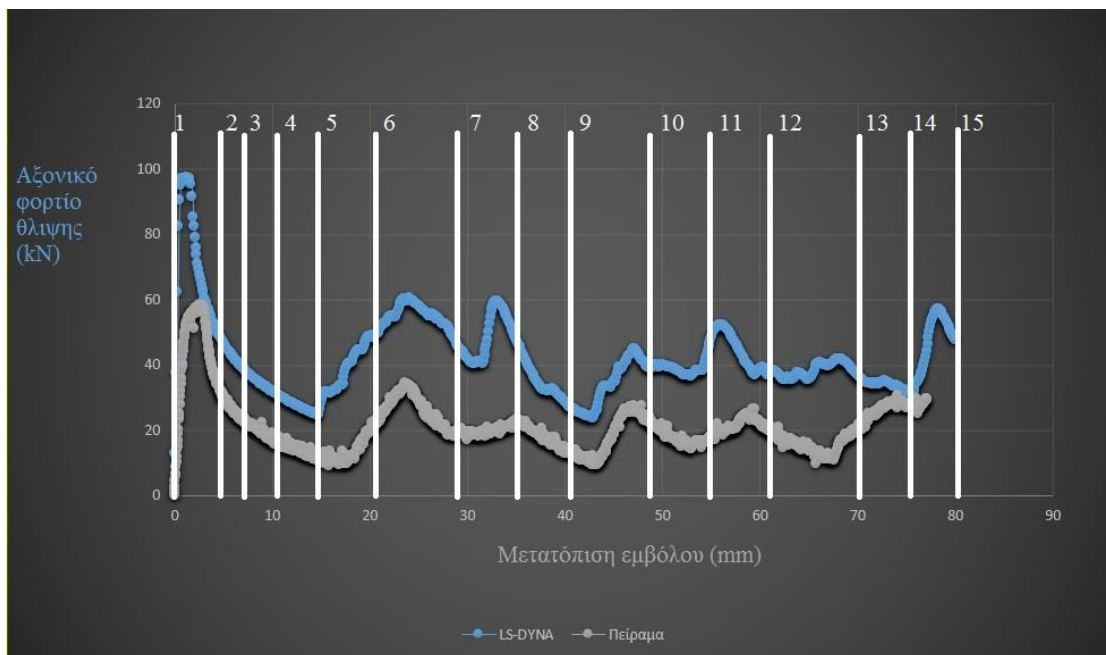


Σχήμα 4.6: Σύγκριση των τελικών μορφών του δοκιμίου, όπως προκύπτει από την πειραματική διαδικασία και την προσομοίωση.

Οι διαφορές στον τρόπο κατάρρευσης οφείλονται σε ατέλειες που διαθέτει ο σωλήνας και για τις οποίες δεν κατέστη δυνατή η προσομοίωση στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Ο σωλήνας είναι στραντζαριστός, με αποτέλεσμα να είναι ανισότροπος λόγω της έλασης και να έχει υποστεί προένταση λόγω της κάμψης του ελάσματος. Επίσης διαθέτει ραφή συγκόλλησης και επιπλέον συγκόλληση με τις πλάκες στήριξης, με αποτέλεσμα οι μηχανικές ιδιότητες στη ραφή και στη θερμικά επηρεασμένη περιοχή να είναι διαφορετικές σε σχέση με το υπόλοιπο δοκίμιο. Οι ατέλειες οφείλονται επίσης και στη διαφοροποίηση του πάχους κατά μήκος του σωλήνα, η οποία δεν μπορεί να προσομοιωθεί στο LS-DYNA 3D.

Είναι προφανές ότι η κατάρρευση ξεκινά δημιουργώντας μη εκτατό λοβό στην περίπτωση του περάματος, ενώ οι σχηματιζόμενοι λοβοί στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων είναι εκτατοί. Οι ατέλειες του πειραματικού δοκιμίου αναγκάζουν τους λοβούς να εμφανιστούν στο κάτω μέρος του δοκιμίου όπως ακριβώς εμφανίζεται στην προσομοίωση. Επίσης, το σχήμα που αποκτά η παραμορφωμένη περιοχή του δοκιμίου, κατά τη δημιουργία του δεύτερου λοβού, είναι λίγο διαφορετικό στο πείραμα από ό,τι στην προσομοίωση. Κάνοντας τη σύγκριση μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης, με βάση το τελικό στιγμιότυπο 15, διαπιστώνουμε ότι στο υπολογιστικό μοντέλο έχουν σχηματιστεί 7 ολοκληρωμένοι λοβοί ενώ στη πειραματική διάταξη έχουν σχηματιστεί 6 πλήρεις λοβοί. Κατά συνέπεια, τίθεται ζήτημα σχετικά με τη διαφορά στο ρυθμό σχηματισμού των λοβών. Το παραπάνω Σχήμα 5.5. παρουσιάζει την τελική μορφή του δοκιμίου, όπως προέκυψε μετά το πέρας της πλήρους διαδικασίας αξονικής κατάρρευσης. Συγκρίνεται η μορφή του δοκιμίου, όπως αυτή προέκυψε μετά τη θλίψη στην υδραυλική πρέσα, με αυτή που προέκυψε από την προσομοίωση της θλίψης στο LS-DYNA 3D.

Για την απεικόνιση της μεταβολής του φορτίου συναρτήσει της βράχυνσης του δοκιμίου, μετά την επεξεργασία των τιμών που κατέγραψε το πρόγραμμα LabVIEW 8.6, το οποίο λειτουργεί σε συνεργασία με την υδραυλική πρέσα καθώς και των τιμών, οι οποίες εξήχθησαν από το αρχείο reforc Post-Processor του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζεται παρακάτω το ζητούμενο διάγραμμα μέσω του Microsoft Excel 2013.



Σχήμα 4.7.: Σύγκριση διαγραμμάτων αξονικού φορτίου - μετατόπισης εμβόλου, για το μονό δοκίμιο. Με γκρι χρώμα παριστάνεται η πειραματική καμπύλη, με μπλε αυτή που προκύπτει από την προσομοίωση στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Οι αριθμοί 1 έως 15 αντιστοιχούν στα στιγμιότυπα που έχουν ληφθεί κατά το πείραμα.

Με μία πρώτη ματιά στα παραπάνω σχήματα παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει σημαντική σύμπτωση μεταξύ των διαγραμμάτων πειράματος και προσομοίωσης. Εξετάζοντας διεξοδικότερα τις καμπύλες αξονικού φορτίου - μετατόπισης, διαπιστώνουμε ξεκάθαρα την επίδραση που έχουν στην εξέλιξη του φορτίου οι ατέλειες και ανομοιομορφίες του δοκιμίου, σε συνδυασμό με όλους τους άλλους παράγοντες για τους οποίους έγινε εκτενέστερος λόγος στην υποενότητα 5.1.2.. Καθώς παρατηρούμε το διάγραμμα του πειράματος, η αρχική αύξηση του φορτίου από τη μηδενική τιμή είναι πολύ πιο απότομη σε σχέση με αυτή που παρουσιάζεται στο διάγραμμα του μοντέλου του LS-DYNA. Επίσης, το ολικό μέγιστο φορτίο που προέκυψε από το πείραμα είναι αρκετά μικρότερο από αυτό που αντιστοιχεί στο υπολογιστικό μοντέλο, κάτι που οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην ιδανική φύση της θεωρητικής κατασκευής.

Οι ατέλειες του πραγματικού δοκιμίου επηρεάζουν επίσης το ρυθμό μετάβασης από τα τοπικά μέγιστα («όρη») στα τοπικά ελάχιστα («κοιλίες») του φορτίου και αντίστροφα. Σημειώνουμε ότι αυτά τα τοπικά μέγιστα και ελάχιστα μαρτυρούν αντίστοιχα την εκκίνηση και τον τερματισμό στην εμφάνιση των λοβών.

Το μέσο αξονικό φορτίο θλίψης μπορεί να υπολογιστεί με δύο τρόπους:

(α) Με εμβαδομέτρηση του χωρίου που περικλείεται από την καμπύλη αξονικού - φορτίου μετατόπισης και τους δύο θετικούς ημιάξονες Ox και Oy .

(β) Με υπολογισμό του μέσου όρου όλων των επιμέρους φορτίων που αντιστοιχούν σε κάθε σημείο της καμπύλης.

Επειδή η καμπύλη που προκύπτει από τα αριθμητικά δεδομένα του Excel απαρτίζεται, και στις δύο περιπτώσεις (πείραμα και προσομοίωση), από τουλάχιστον 2500 σημεία, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ο τρόπος (β) μπορεί να προσεγγίσει, με πολύ μεγάλη ακρίβεια και χωρίς σημαντικό σφάλμα, τον τρόπο (α), προκειμένου για τον υπολογισμό του μέσου φορτίου. Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις καταλήγουμε στα εξής:

Μέγιστο φορτίο μονού δοκιμίου από πείραμα: **58.372 kN**

Μέγιστο φορτίο μονού δοκιμίου από προσομοίωση: **97.259 kN**

Ποσοστιαία διαφορά μέγιστου θεωρητικού φορτίου σε σχέση με το

πειραματικό: **0.66 ή 66%**

Μέσο φορτίο μονού δοκιμίου από πείραμα: **21.154 kN**

Μέσο φορτίο μονού δοκιμίου από προσομοίωση: **42.113 kN**

Ποσοστιαία διαφορά μέσου πειραματικού φορτίου σε σχέση με το θεωρητικό: **0.99 ή 99%**

Η ομοιομορφία φορτίου, δηλαδή ο λόγος του μέγιστου φορτίου προς το μέσο, δίνεται παρακάτω και για τις δύο περιπτώσεις:

Για την πειραματική διάταξη: **2.76**

Για το θεωρητικό μοντέλο: **2.30**

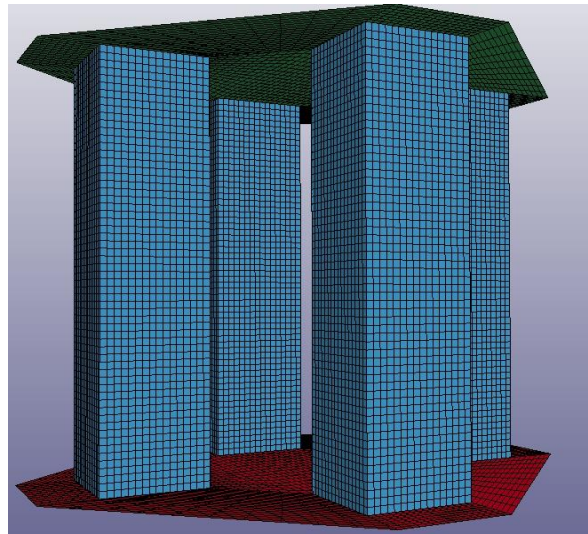
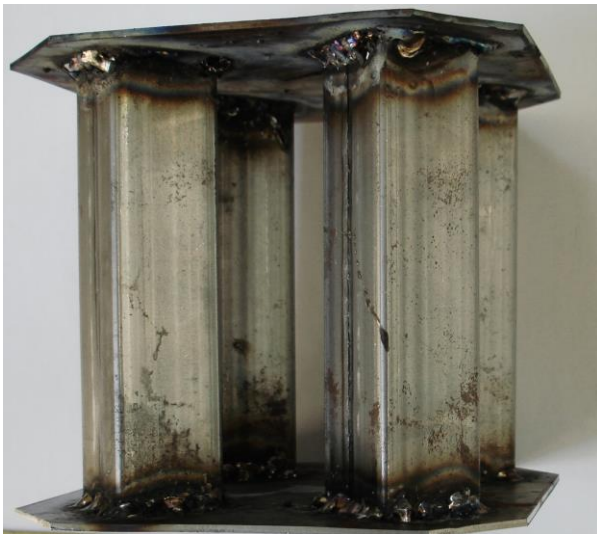
Χωρίς βλάβη της γενικότητας, μπορούμε να πολλαπλασιάσουμε τις παραπάνω τιμές του μέσου φορτίου με τη συνολική μετατόπιση του εμβόλου, προκειμένου να βρούμε τη συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε κατά την αξονική κατάρρευση. Τόσο στο πειραματικό όσο και στο θεωρητικό μοντέλο η μετατόπιση του εμβόλου είναι ίση με 80 mm. Υπενθυμίζουμε εδώ ότι ο πολλαπλασιασμός του φορτίου σε kN με τη μετατόπιση σε mm θα μας δώσει την ενέργεια σε Joule (J).

Για την πειραματική διάταξη: **1692.4 J**

Για το θεωρητικό μοντέλο: **3369.1 J**

4.4. Πείραμα και προσομοίωση για την διάταξη τεσσάρων σωλήνων τοποθετημένων σε ορθή θέση (2).

Η διάταξη αυτή αποτελείται από τέσσερις ορθογωνικής διατομής σωλήνες, διαστάσεων 30mm x 30mm x 1.4 mm και ύψους 120mm, τοποθετημένοι σε ορθή θέση ως προς τον κατακόρυφο άξονα της διάταξης (Oz). Για να επιτευχθεί η στιβαρότητα και η αλληλεπίδραση των σωλήνων μεταξύ τους, οι σωλήνες συγκολλήθηκαν σε δυο λεπτές πλάκες του ίδιου υλικού και με συνολικές διαστάσεις 160mm x 160 mm x 3mm. Παρακάτω παρουσιάζεται η διάταξη όπως κατασκευαστική για το πείραμα καθώς και μοντελοποιημένη.



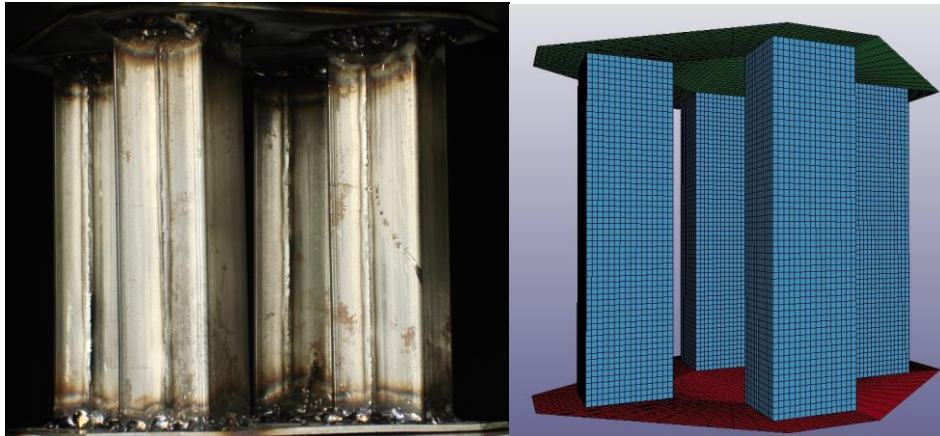
Σχήμα 4.8: Παρουσίαση πλήρους διάταξης, όπως κατασκευάστηκε για το πείραμα καθώς και όπως προσομοιώνεται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA.

Η βασική διαφορά που παρουσιάζει αυτή η διάταξη από την προηγούμενη είναι η παρουσία πλέον τεσσάρων σωλήνων, των ίδιων χαρακτηριστικών, αλλάζοντας έτσι τις συνολικές διαστάσεις της διάταξης. Κατά τη διαδικασία της αξονικής θλίψης στο εργαστήριο, ελήφθησαν συνολικά 14 στιγμιότυπα, τα οποία θα παρουσιαστούν στη συνέχεια. Πολύ χρήσιμος θα μας είναι ο παρακάτω Πίνακας 4.3., στον οποίο θα αντιστοιχίσουμε κάθε στιγμιότυπο του πειράματος με την βράχυνση της διάταξης.

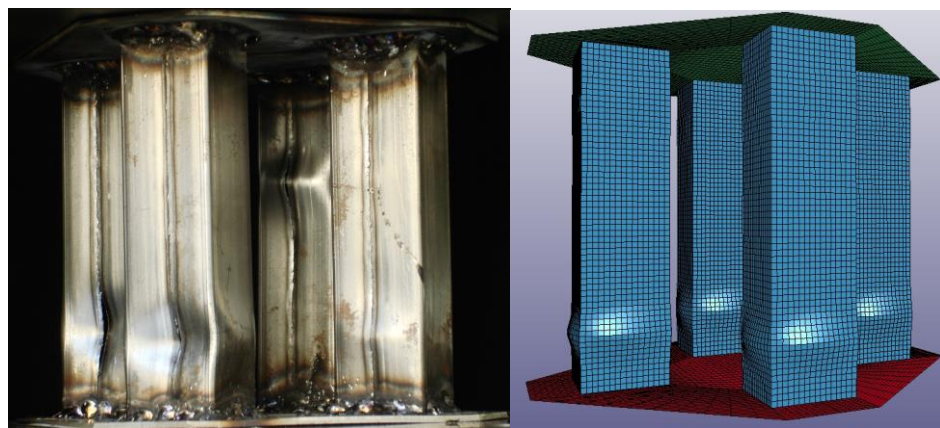
<u>Στιγμιότυπο</u>	<u>Βράχυνση δοκιμίου (μετατόπιση του εμβόλου) (mm)</u>
1	0
2	3.6
3	6.5
4	9.5
5	15.6
6	19.5
7	26
8	33.8
9	39.9
10	47.5
11	54
12	63.8
13	74.5
14	80

Πίνακας 4.3: Παρουσίαση των στιγμιότυπων που ελήφθησαν κατά τη διαδικασία κατάρρευσης της διάταξης.

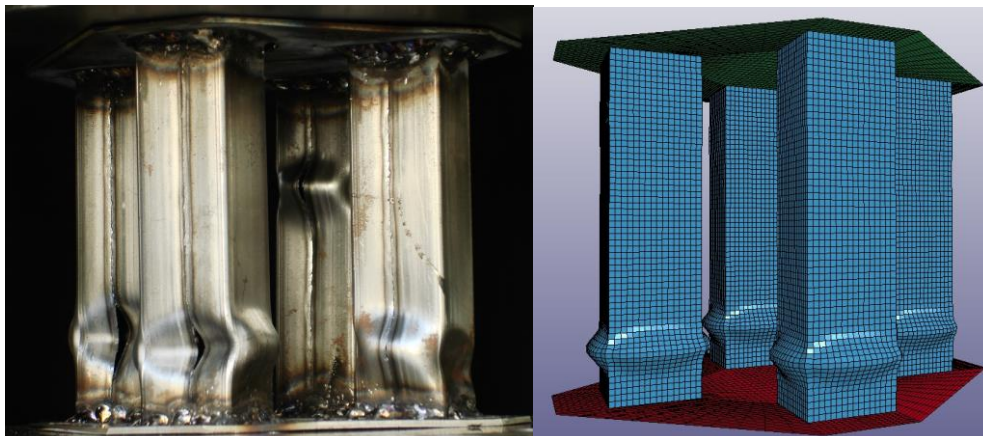
Το παρακάτω Σχήμα 4.9. αποτυπώνει την κατάρρευση της διάταξης δοκιμίων, στα 14 στιγμιότυπα του πειράματος και της προσομοίωσης, για τα οποία έγινε λόγος στον παραπάνω πίνακα.



Στιγμιότυπο 1

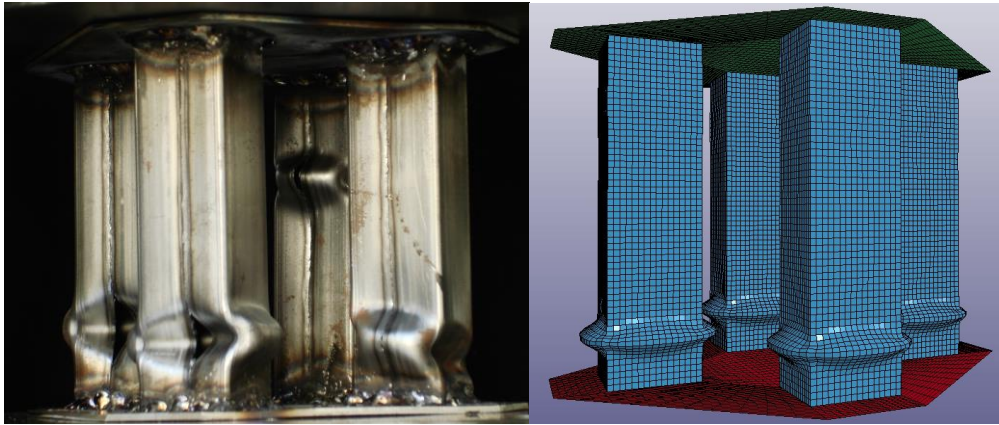


Στιγμιότυπο 2

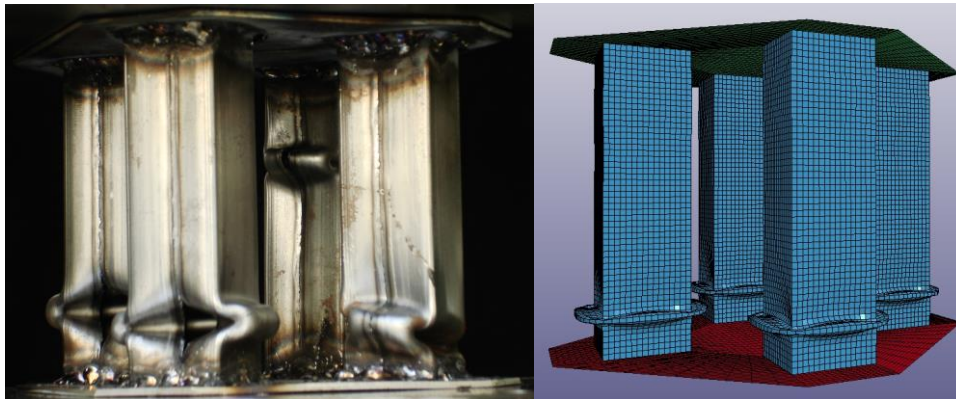


Στιγμιότυπο 3

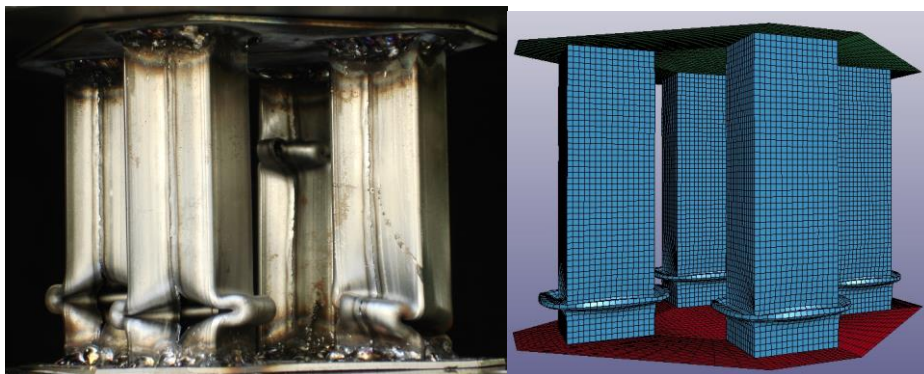
Σχήμα 4.9.1: Στιγμιότυπα της διάταξης από την πειραματική διαδικασία, και αντιστοίχισή τους με στιγμιότυπα (frames) από την προσομοίωση στον υπολογιστή



Στιγμιότυπο 4

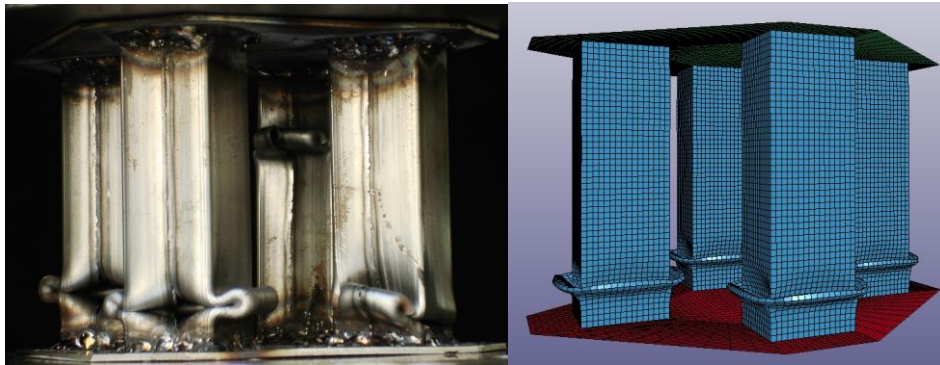


Στιγμιότυπο 5

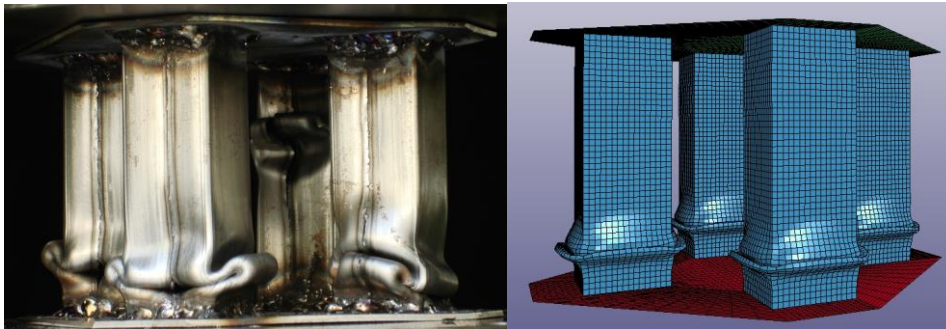


Στιγμιότυπο 6

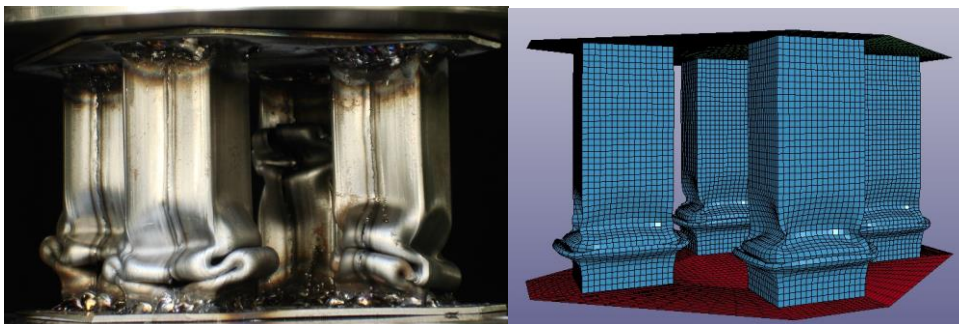
Σχήμα 4.9.2: Στιγμιότυπα της διάταξης από την πειραματική διαδικασία, και αντιστοίχισή τους με στιγμιότυπα (frames) από την προσομοίωση στον υπολογιστή



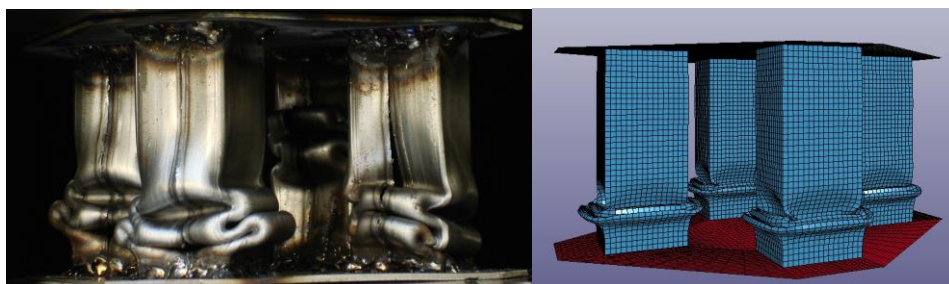
Στιγμιότυπο 7



Στιγμιότυπο 8

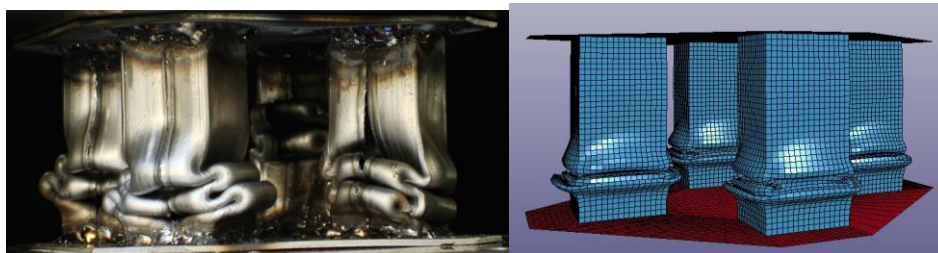


Στιγμιότυπο 9

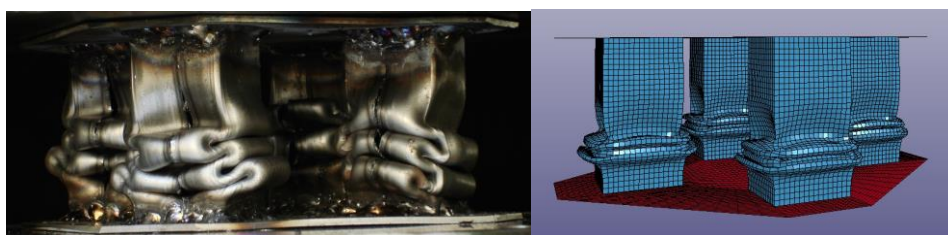


Στιγμιότυπο 10

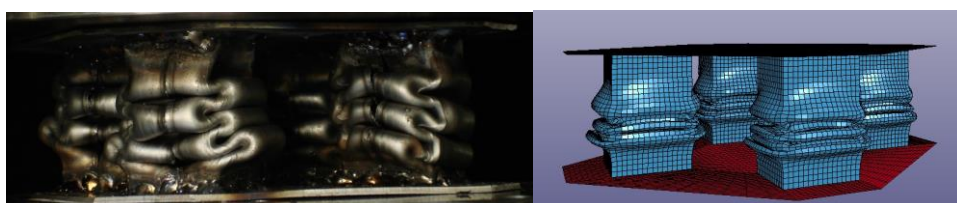
Σχήμα 4.9.3: Στιγμιότυπα της διάταξης από την πειραματική διαδικασία, και αντιστοίχισή τους με στιγμιότυπα (frames) από την προσομοίωση στον υπολογιστή



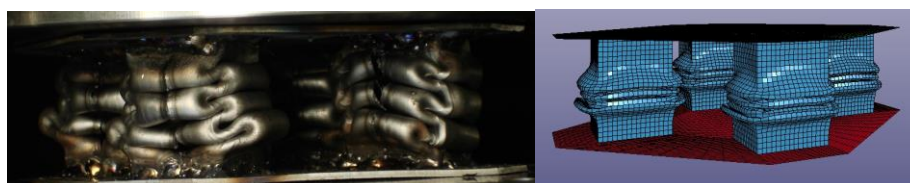
Στιγμιότυπο 11



Στιγμιότυπο 12



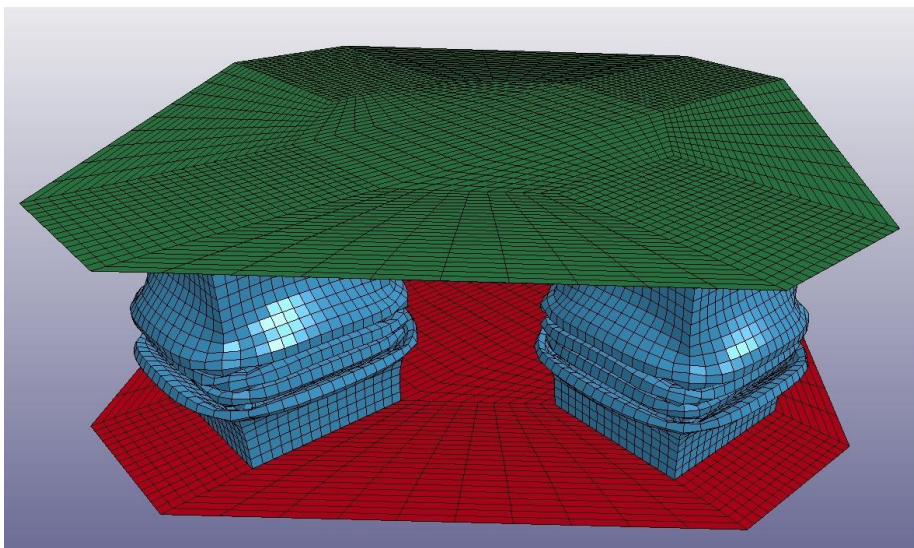
Στιγμιότυπο 13



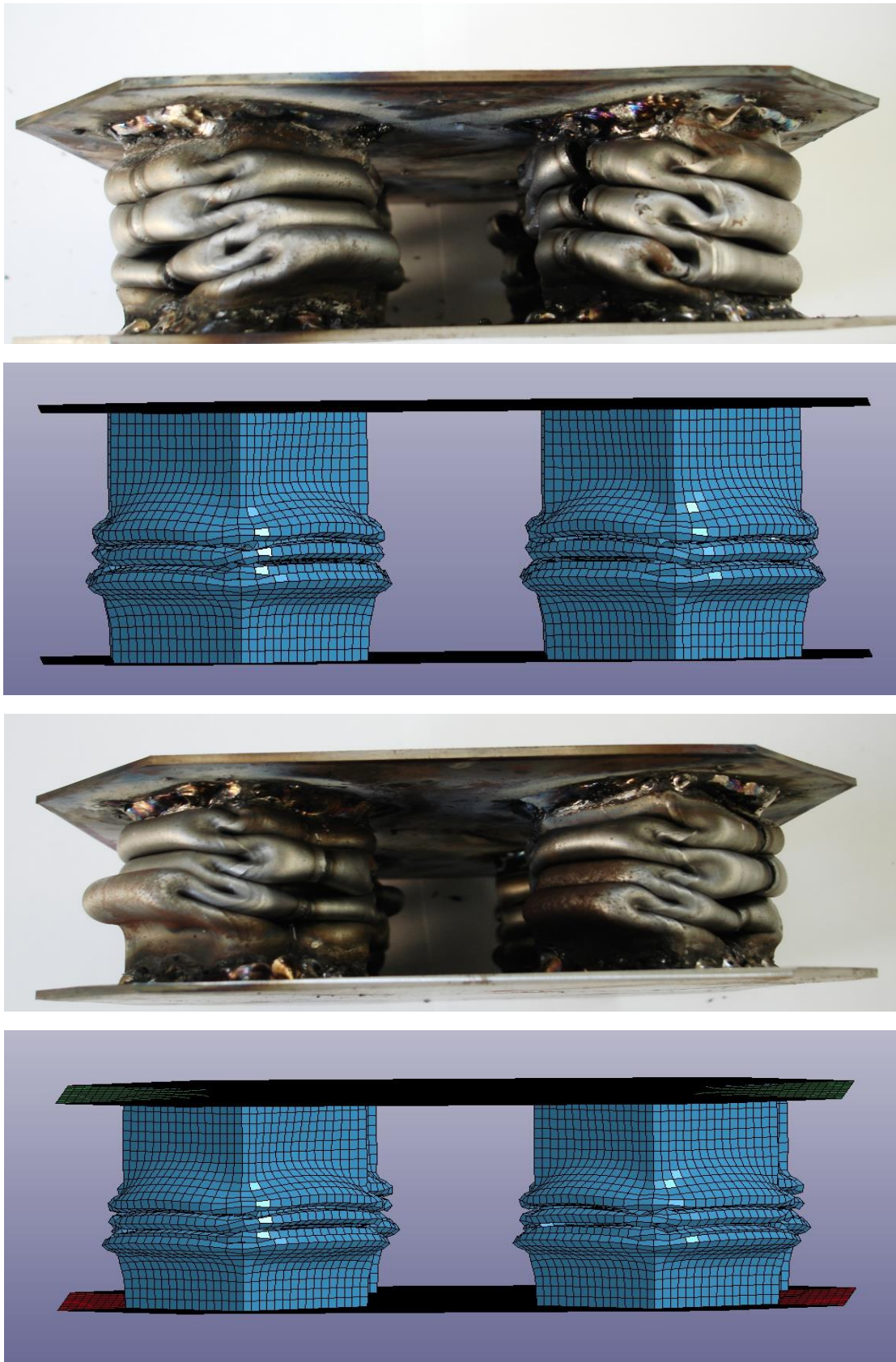
Στιγμιότυπο 14

Σχήμα4.9.4 : Στιγμιότυπα της διάταξης από την πειραματική διαδικασία, και αντιστοίχισή τους με στιγμιότυπα (frames) από την προσομοίωση στον υπολογιστή

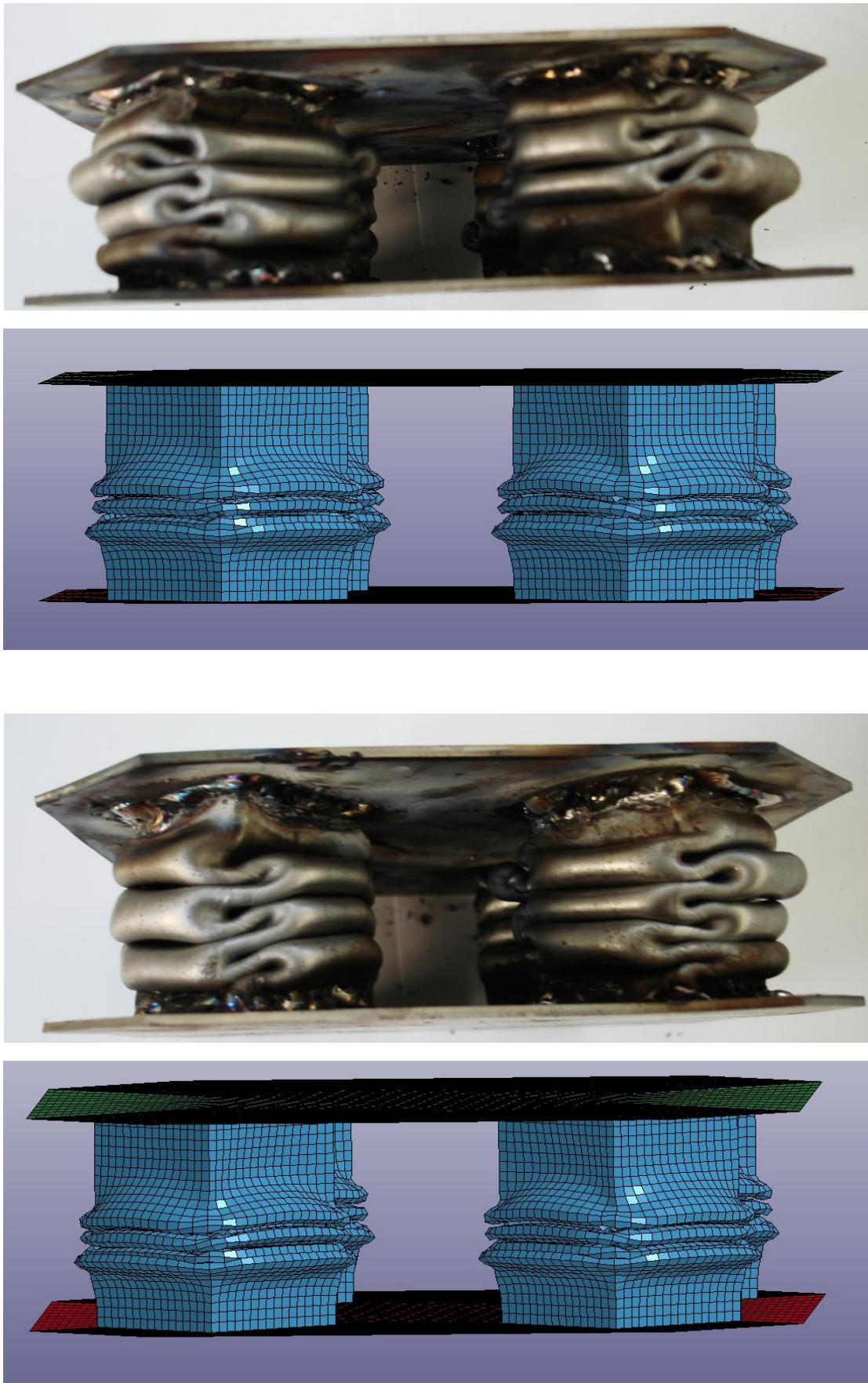
Παρακάτω παρουσιάζεται η διάταξη μετά το πέρας του πειράματος, δηλαδή στην τελική μορφή του και συγκρίνεται με αυτό που προκύπτει από την μοντελοποίηση στο LS-DYNA.



Σχήμα 4.10: Προβολή και σύγκριση πειραματικής και μοντελοποιημένης τελικής μορφής της διάταξης.

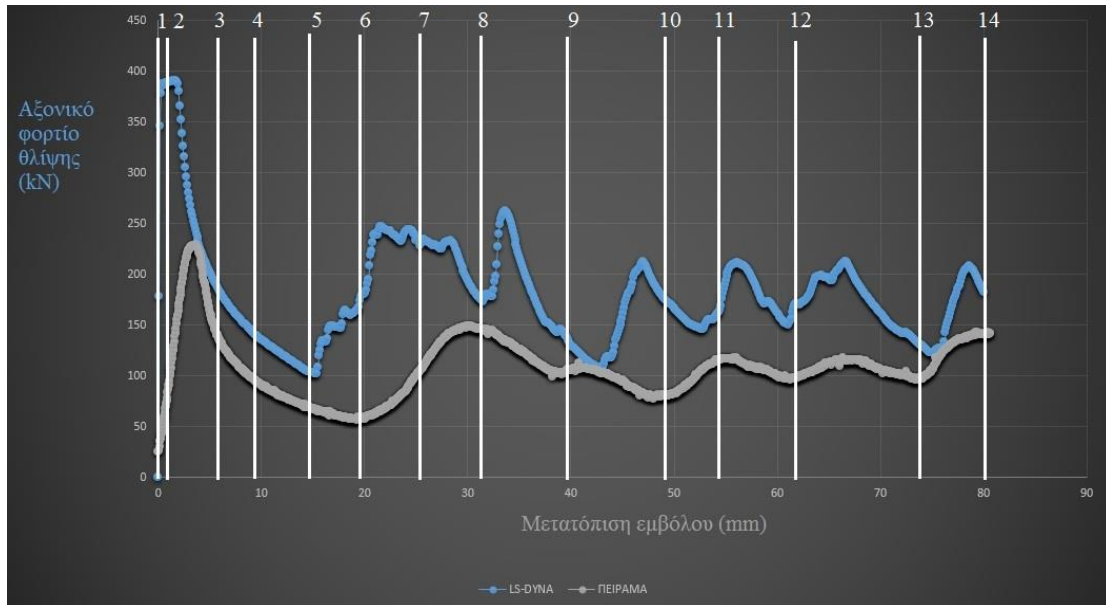


Σχήμα 4.11: Αντιστοιχία όψεων της τελικής μορφής της διάταξης, όπως προκύπτει από την πειραματική διαδικασία και την προσομοίωση.



Σχήμα 4.12: Αντιστοιχία όψεων της τελικής μορφής της διάταξης, όπως προκύπτει από την πειραματική διαδικασία και την προσομοίωση.

Απεικόνιση της μεταβολής του φορτίου συναρτήσει της βράχυνσης της διάταξης, μετά την επεξεργασία των τιμών που κατέγραψε το πρόγραμμα LabVIEW 8.6



Σχήμα 4.13: Σύγκριση διαγραμμάτων αξονικού φορτίου - μετατόπισης εμβόλου, για το μονό δοκίμιο. Με γκρι χρώμα παριστάνεται η πειραματική καμπύλη, με μπλε αυτή που προκύπτει από την προσομοίωση στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Οι αριθμοί 1 έως 15 αντιστοιχούν στα στιγμιότυπα που έχουν ληφθεί κατά το πείραμα.

Υπολογισμός Μέγιστου και Μέσου φορτίού, Ποσοστιαίων διαφορών θεωρητικών και πειραματικών φορτίων, ομοιομορφία φορτίου καθώς και συνολικής ενέργειας που δαπανήθηκε.

- Μέγιστο φορτίο διάταξης από πείραμα: **225.827 kN**
- Μέγιστο φορτίο διάταξης από προσομοίωση: **391.064 kN**
- Ποσοστιαία διαφορά μέγιστου θεωρητικού φορτίου σε σχέση με το πειραματικό: **0.73 ή 73%**
- Μέσο φορτίο μονού δοκιμίου από πείραμα: **107.598 kN**
- Μέσο φορτίο μονού δοκιμίου από προσομοίωση: **181.338 kN**
- Ποσοστιαία διαφορά μέσου πειραματικού φορτίου σε σχέση με το θεωρητικό: **0.68 ή 68%**

Η ομοιομορφία φορτίου, δηλαδή ο λόγος του μέγιστου φορτίου προς το μέσο, δίνεται παρακάτω και για τις δύο περιπτώσεις:

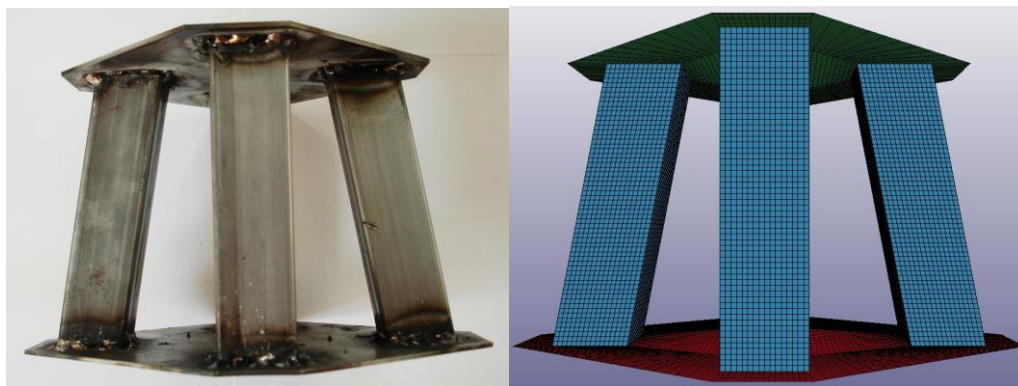
- Για την πειραματική διάταξη: **2.09**
- Για το θεωρητικό μοντέλο: **2.15**

Χωρίς βλάβη της γενικότητας, μπορούμε να πολλαπλασιάσουμε τις παραπάνω τιμές του μέσου φορτίου με τη συνολική μετατόπιση του εμβόλου, προκειμένου να βρούμε τη συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε κατά την αξονική κατάρρευση. Τόσο στο πειραματικό όσο και στο θεωρητικό μοντέλο η μετατόπιση του εμβόλου είναι ίση με 80 mm. Υπενθυμίζουμε εδώ ότι ο πολλαπλασιασμός του φορτίου σε kN με τη μετατόπιση σε mm θα μας δώσει την ενέργεια σε Joule (J).

- ο Για την πειραματική διάταξη: **8607.9 J**
- ο Για το θεωρητικό μοντέλο: **14507.1 J**

4.5. Πείραμα και προσομοίωση για την διάταξη τεσσάρων σωλήνων τοποθετημένων υπό γωνίες 0^0 και 10^0 (3).

Η διάταξη αυτή αποτελείται από τέσσερις ορθογωνικής διατομής σωλήνες, διαστάσεων 30mm x 30mm x 1.4mm (όσοι βρίσκονται σε γωνία 0^0) και 30 mm x 30.44 mm (όσοι βρίσκονται σε γωνία 10^0) και ύψους 120mm. Για να επιτευχθεί η στιβαρότητα και η αλληλεπίδραση των σωλήνων μεταξύ τους, οι σωλήνες συγκολλήθηκαν σε δυο λεπτές πλάκες του ίδιου υλικού, με διαστάσεις 160mm x 160mm x 3mm (πάνω πλάκα) και 198.9mm x 160mm x 3mm (κάτω πλάκα). Παρακάτω παρουσιάζεται η διάταξη όπως κατασκευαστική για το πείραμα καθώς και μοντελοποιημένη.



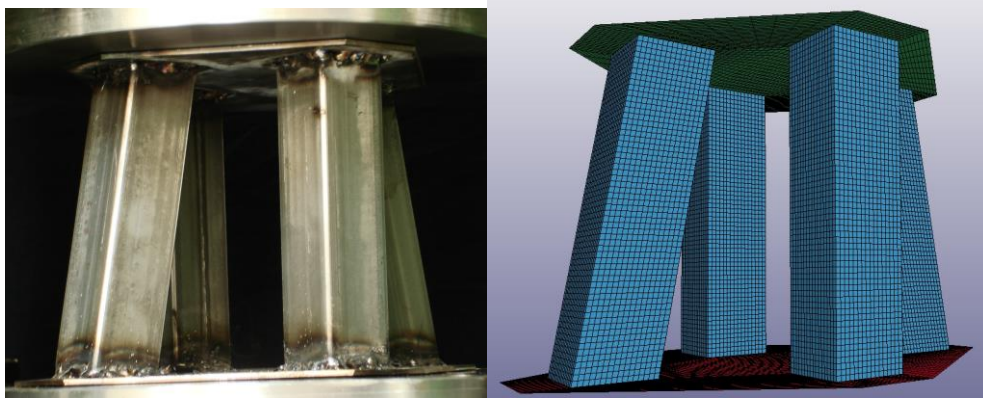
Σχήμα 4.14: Παρουσίαση πλήρους διάταξης, όπως κατασκευάστηκε για το πείραμα καθώς και όπως προσομοιώνεται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA.

Η βασική διαφορά που παρουσιάζει η διάταξη είναι η τοποθέτηση των δυο σωλήνων υπό γωνία 10^0 , αλλάζοντας έτσι τις συνολικές διαστάσεις της διάταξης. Κατά τη διαδικασία της αξονικής θλίψης στο εργαστήριο, ελήφθησαν συνολικά 17 στιγμιότυπα, τα οποία θα παρουσιαστούν στη συνέχεια. Πολύ χρήσιμος θα μας είναι ο παρακάτω Πίνακας 4.4, στον οποίο θα αντιστοιχίσουμε κάθε στιγμιότυπο του πειράματος με την βράχυνση της διάταξης.

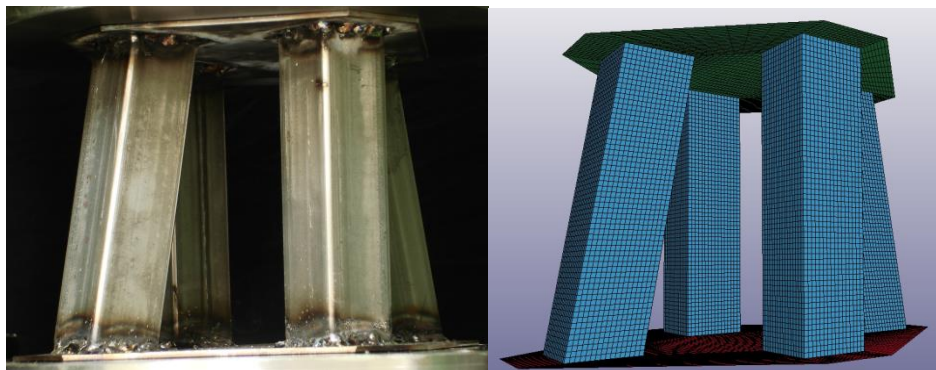
<u>Στιγμιότυπο</u>	<u>Βράχυνση δοκιμίου (μετατόπιση του εμβόλου) (mm)</u>
1	0
2	1
3	5
4	8.5
5	11.5
6	14.5
7	18.5
8	25.3
9	30.9
10	37
11	43.5
12	50.5
13	57.5
14	63.5
15	69.5
16	73.8
17	80

Πίνακας 4.4: Παρουσίαση των στιγμιότυπων που ελήφθησαν κατά τη διαδικασία κατάρρευσης της διάταξης.

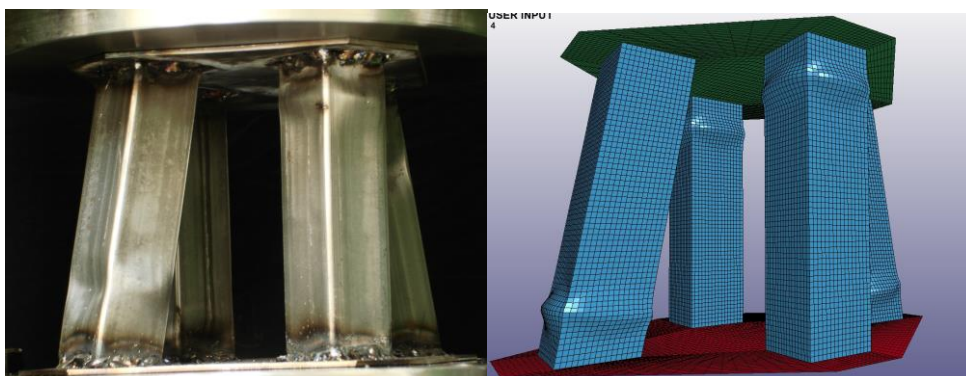
Παρακάτω αποτυπώνονται τα 17 στιγμιότυπα του παραπάνω πίνακα κατά την κατάρρευση της διάταξης του πειράματος και της προσομοίωσης, για τα οποία έγινε λόγος στον παραπάνω πίνακα.



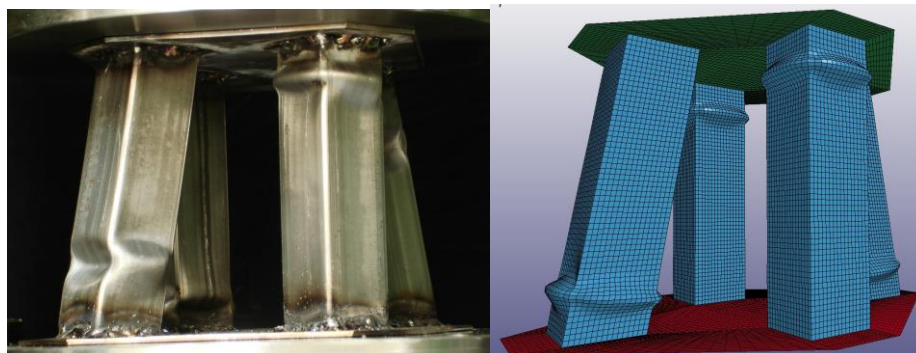
Στιγμιότυπο 1



Στιγμιότυπο 2

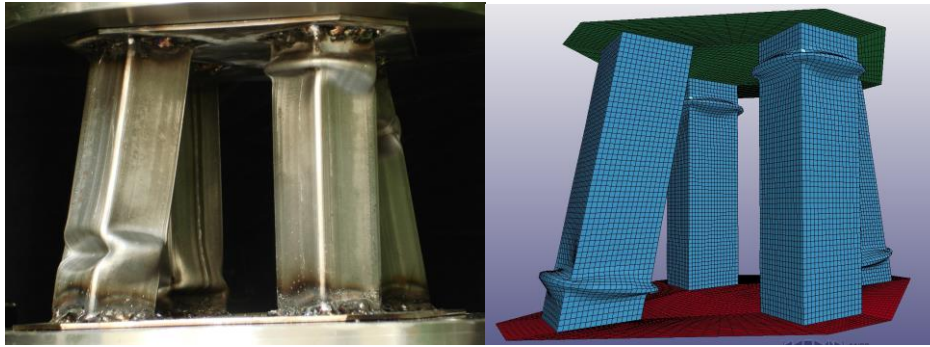


Στιγμιότυπο 3

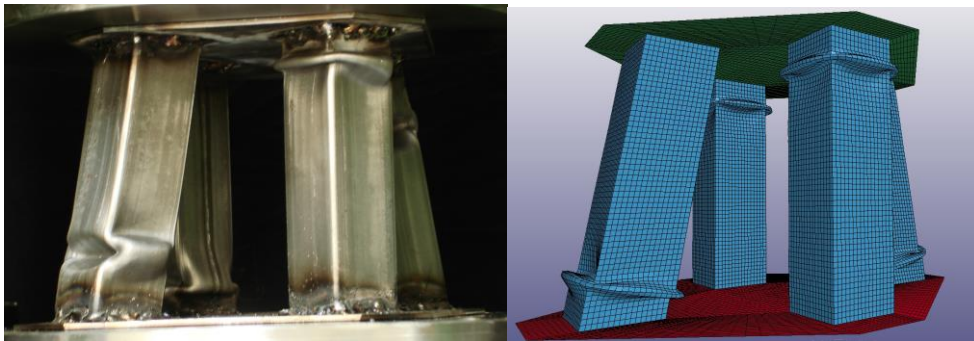


Στιγμιότυπο 4

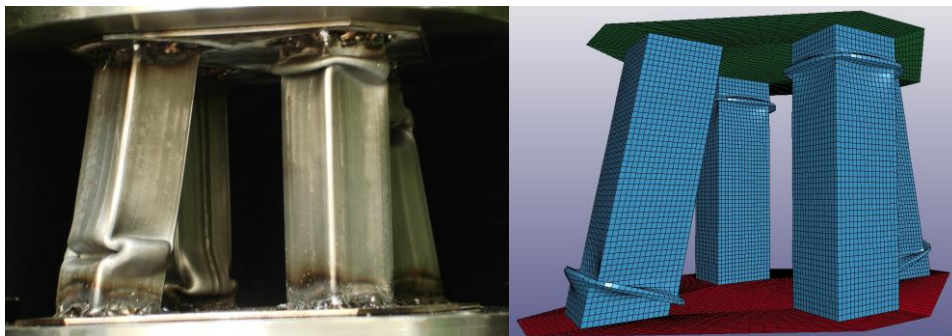
Σχήμα 4.15: Στιγμιότυπα της διάταξης από την πειραματική διαδικασία, και αντιστοίχισή τους με στιγμιότυπα (frames) από την προσομοίωση στον υπολογιστή



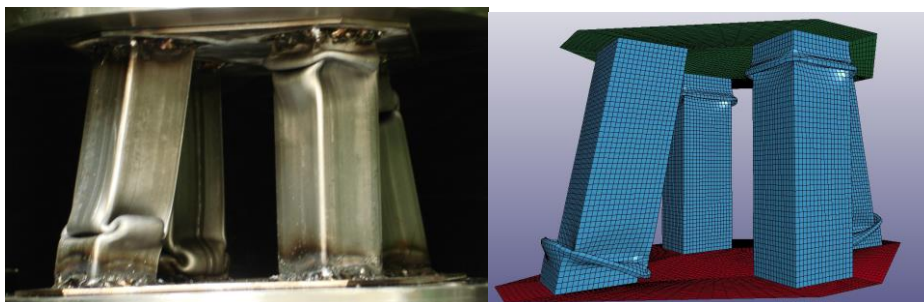
Στιγμιότυπο 5



Στιγμιότυπο 6

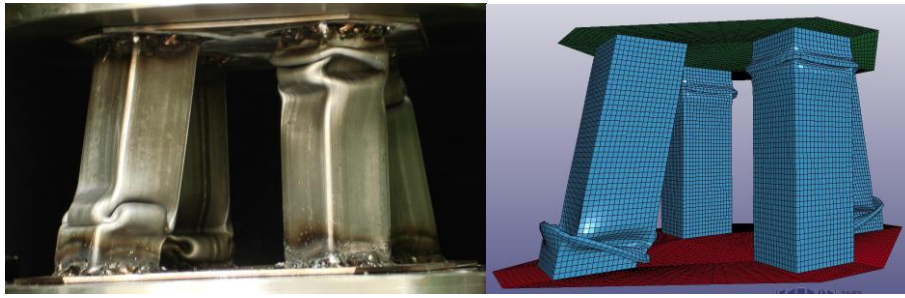


Στιγμιότυπο 7

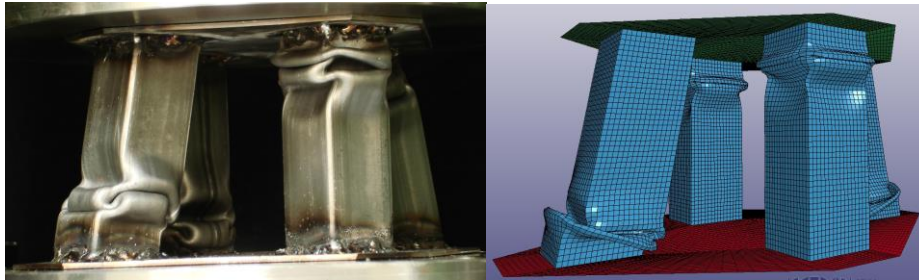


Στιγμιότυπο 8

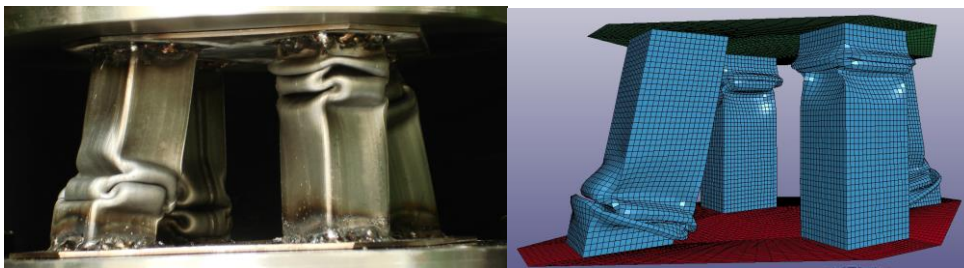
Σχήμα 4.15.1 : Στιγμιότυπα της διάταξης από την πειραματική διαδικασία, και αντιστοίχισή τους με στιγμιότυπα (frames) από την προσομοίωση στον υπολογιστή



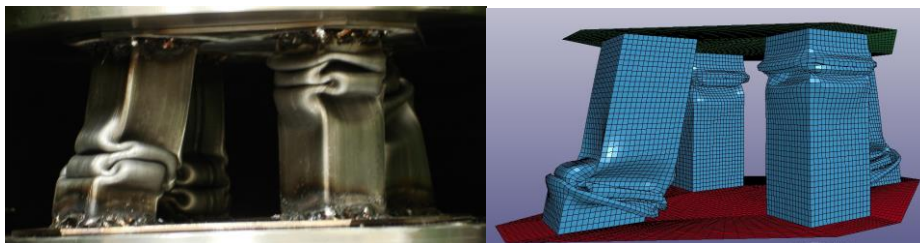
Στιγμιότυπο 9



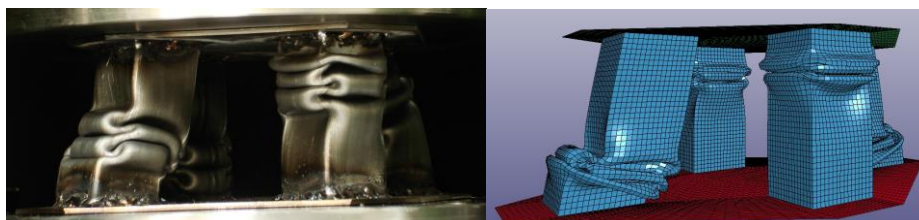
Στιγμιότυπο 10



Στιγμιότυπο 11

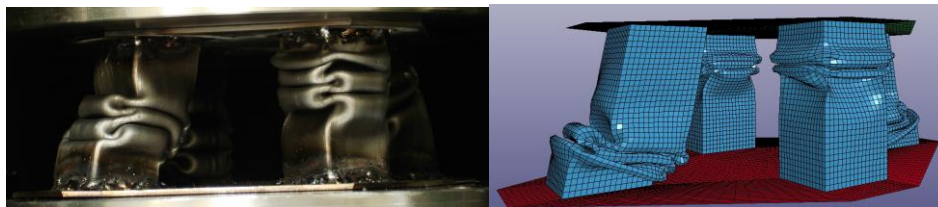


Στιγμιότυπο 12

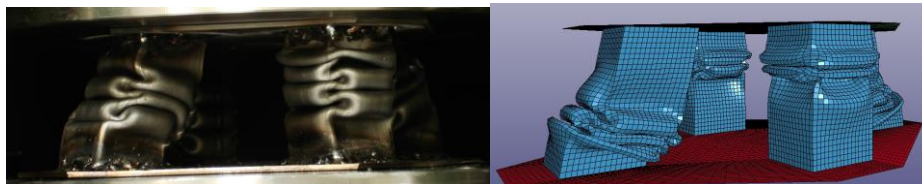


Στιγμιότυπο 13

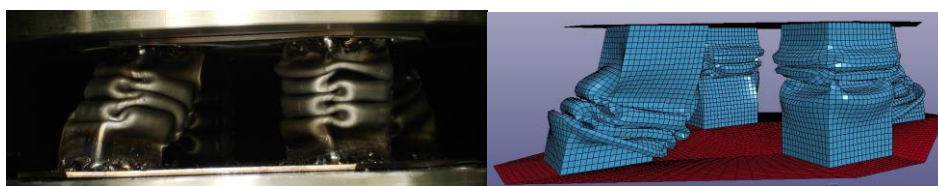
Σχήμα 4.15.2 : Στιγμιότυπα της διάταξης από την πειραματική διαδικασία, και αντιστοίχισή τους με στιγμιότυπα (frames) από την προσομοίωση στον υπολογιστή



Στιγμιότυπο 14



Στιγμιότυπο 15



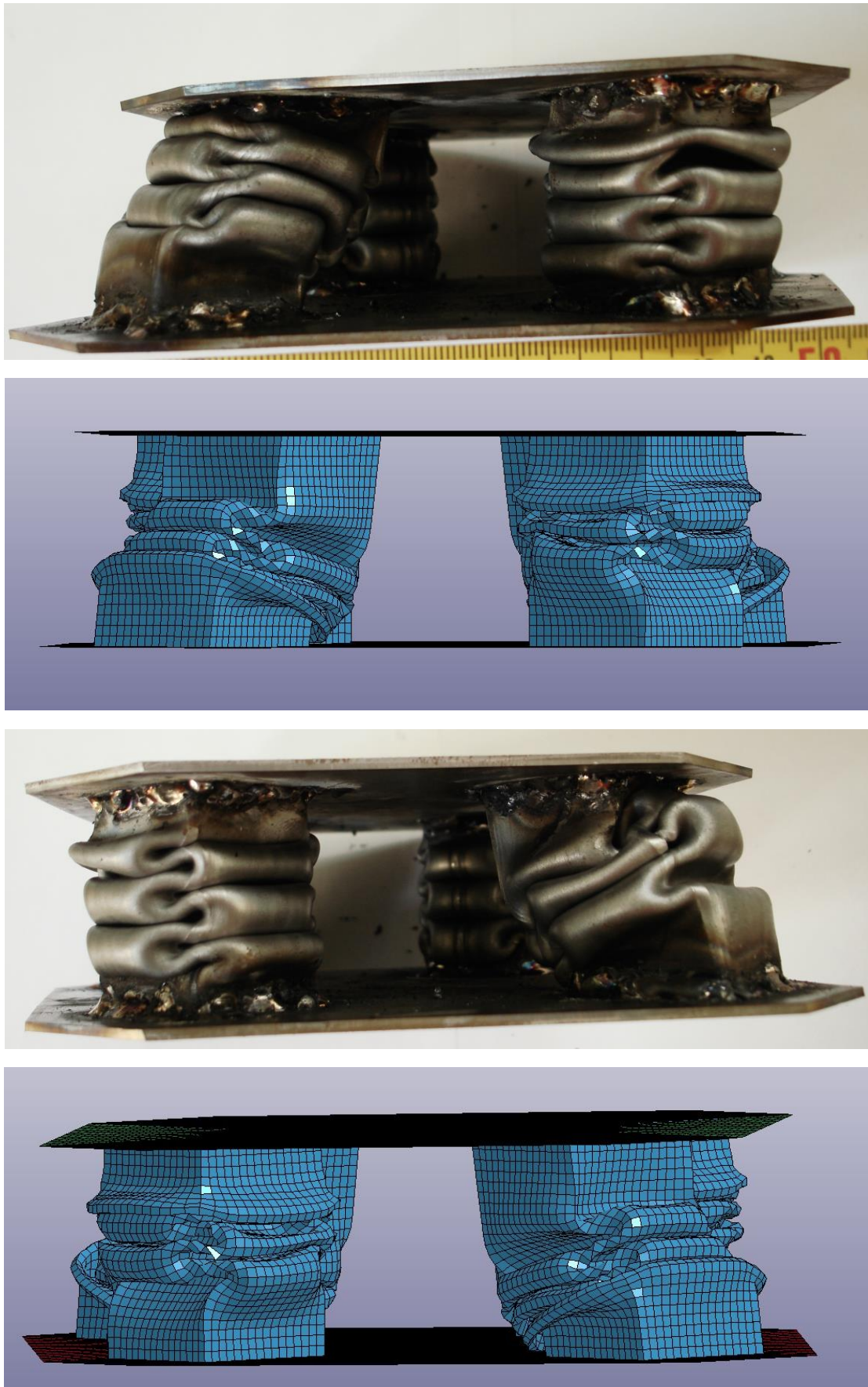
Στιγμιότυπο 16



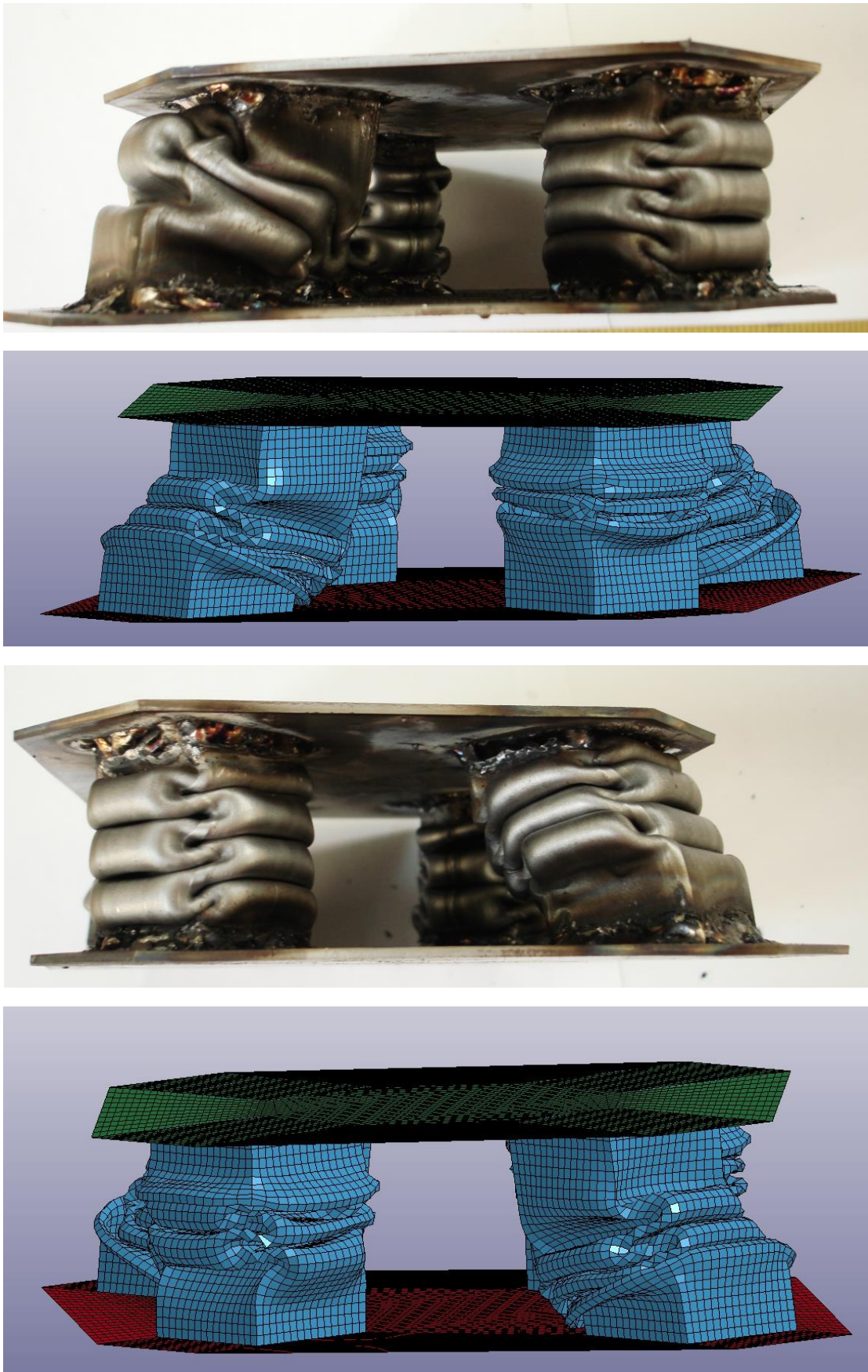
Στιγμιότυπο 17

Σχήμα 4.15.3 : Στιγμιότυπα της διάταξης από την πειραματική διαδικασία, και αντιστοίχισή τους με στιγμιότυπα (frames) από την προσομοίωση στον υπολογιστή

Παρακάτω παρουσιάζεται η διάταξη μετά το πέρας του πειράματος, δηλαδή στην τελική μορφή του και συγκρίνεται με αυτό που προκύπτει από την μοντελοποίηση στο LS-DYNA.

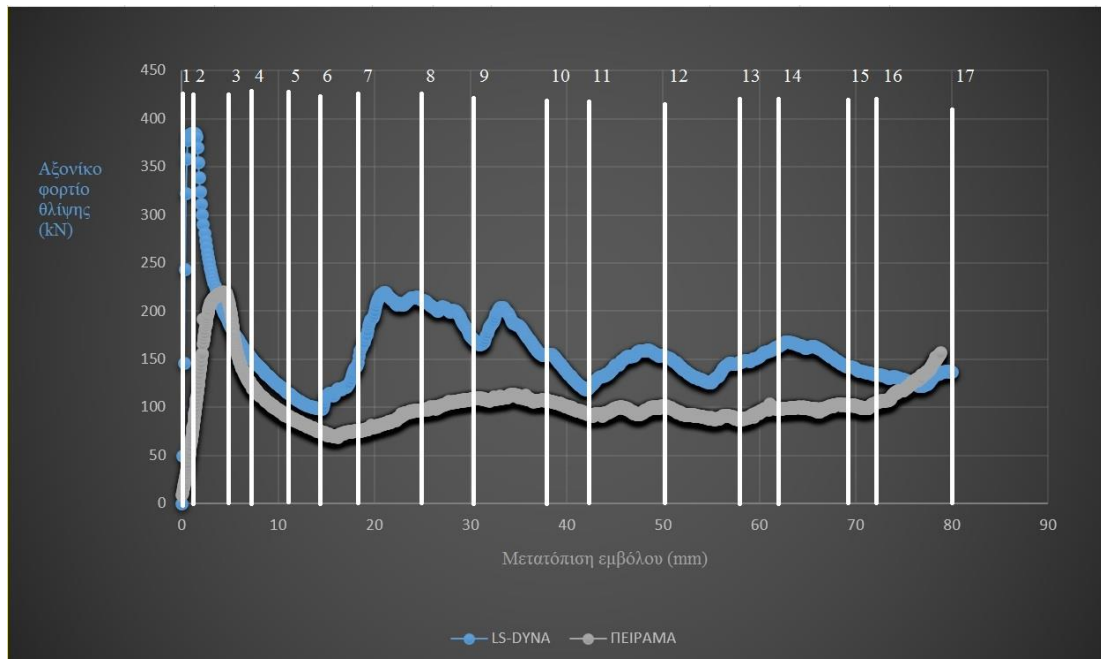


Σχήμα 4.16: Αντιστοιχία όψεων της τελικής μορφής της διάταξης, όπως προκύπτει από την πειραματική διαδικασία και την προσομοίωση.



Σχήμα 4.17: Αντιστοιχία όψεων της τελικής μορφής της διάταξης, όπως προκύπτει από την πειραματική διαδικασία και την προσομοίωση.

Απεικόνιση της μεταβολής του φορτίου συναρτήσει της βράχυνσης της διάταξης, μετά την επεξεργασία των τιμών που κατέγραψε το πρόγραμμα LabVIEW 8.6



Σχήμα 4.18: Σύγκριση διαγραμμάτων αξονικού φορτίου - μετατόπισης εμβόλου. Με γκρι χρώμα παριστάνεται η πειραματική καμπύλη, με μπλε αυτή που προκύπτει από την προσομοίωση στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Οι αριθμοί 1 έως 17 αντιστοιχούν στα στιγμιότυπα που έχουν ληφθεί κατά το πείραμα.

Υπολογισμός Μέγιστου και Μέσου φορτίου, Ποσοστιαίων διαφορών θεωρητικών και πειραματικών φορτίων, ομοιομορφία φορτίου καθώς και συνολικής ενέργειας που δαπανήθηκε.

- Μέγιστο φορτίο διάταξης από πείραμα: **220.308 kN**
- Μέγιστο φορτίο διάταξης από προσομοίωση: **385.374 kN**
- Ποσοστιαία διαφορά μέγιστου θεωρητικού φορτίου σε σχέση με το πειραματικό: **0.75 ή 75%**
- Μέσο φορτίο μονού δοκιμίου από πείραμα: **103.851 kN**
- Μέσο φορτίο μονού δοκιμίου από προσομοίωση: **160.301 kN**
- Ποσοστιαία διαφορά μέσου πειραματικού φορτίου σε σχέση με το θεωρητικό: **0.54 ή 54%**

Η ομοιομορφία φορτίου, δηλαδή ο λόγος του μέγιστου φορτίου προς το μέσο, δίνεται παρακάτω και για τις δύο περιπτώσεις:

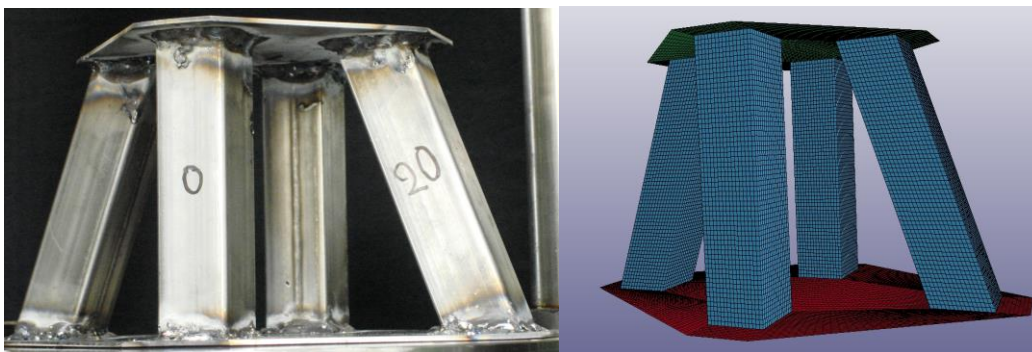
- Για την πειραματική διάταξη: **2.12**
- Για το θεωρητικό μοντέλο: **2.40**

Χωρίς βλάβη της γενικότητας, μπορούμε να πολλαπλασιάσουμε τις παραπάνω τιμές του μέσου φορτίου με τη συνολική μετατόπιση του εμβόλου, προκειμένου να βρούμε τη συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε κατά την αξονική κατάρρευση. Τόσο στο πειραματικό όσο και στο θεωρητικό μοντέλο η μετατόπιση του εμβόλου είναι ίση με 80 mm. Υπενθυμίζουμε εδώ ότι ο πολλαπλασιασμός του φορτίου σε kN με τη μετατόπιση σε mm θα μας δώσει την ενέργεια σε Joule (J).

- ο Για την πειραματική διάταξη: **8308.104 J**
- ο Για το θεωρητικό μοντέλο: **12824 J**

4.6. Πείραμα και προσομοίωση για την διάταξη τεσσάρων σωλήνων τοποθετημένων υπό γωνίες 0° και 20° (4).

Η διάταξη αυτή αποτελείται από τέσσερις ορθογωνικής διατομής σωλήνες, διαστάσεων 30mm x 30mm x 1.4mm (όσοι βρίσκονται σε γωνία 0°) και 30 mm x 31,83mm (όσοι βρίσκονται σε γωνία 20°) και ύψους 120mm. Για να επιτευχθεί η στιβαρότητα και η αλληλεπίδραση των σωλήνων μεταξύ τους, οι σωλήνες συγκολληθήκαν σε δυο λεπτές πλάκες του ίδιου υλικού, με διαστάσεις 160mm x 160mm x 3mm(πάνω πλάκα) και 246,8mm x 160mm x 3mm(κάτω πλάκα).Παρακάτω παρουσιάζεται η διάταξη όπως κατασκευαστική για το πείραμα καθώς και μοντελοποιημένη.



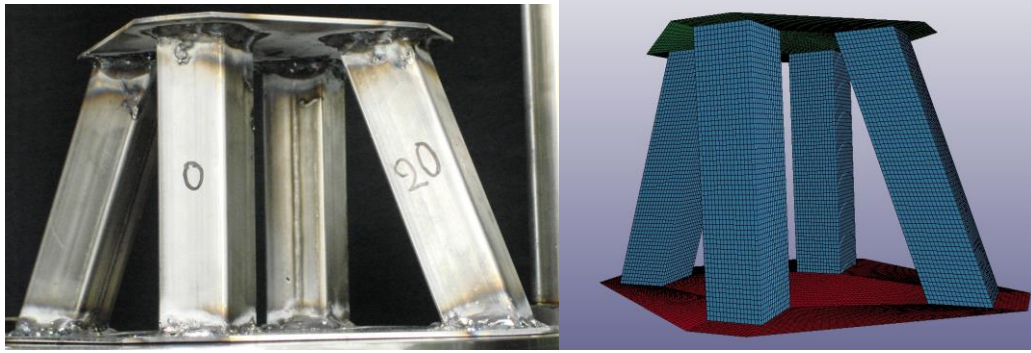
Σχήμα 4.19: Παρουσίαση πλήρους διάταξης, όπως κατασκευάστηκε για το πείραμα καθώς και όπως προσομοιώνεται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA.

Η βασική διαφορά που παρουσιάζει η διάταξη είναι η τοποθέτηση των δυο σωλήνων υπό γωνία 20° , αλλάζοντας έτσι τις συνολικές διαστάσεις της διάταξης. Κατά τη διαδικασία της αξονικής θλίψης στο εργαστήριο, ελήφθησαν συνολικά 17 στιγμιότυπα, τα οποία θα παρουσιαστούν στη συνέχεια. Πολύ χρήσιμος θα μας είναι ο παρακάτω Πίνακας 4.5, στον οποίο θα αντιστοιχίσουμε κάθε στιγμιότυπο του πειράματος με την βράχυνση της διάταξης.

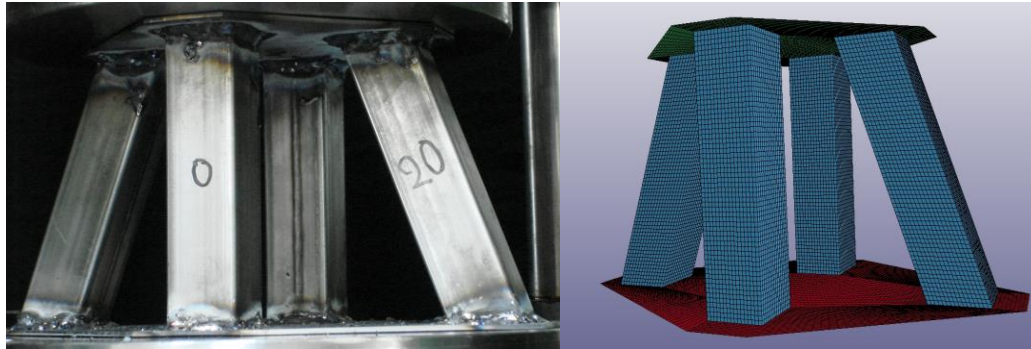
<u>Στιγμιότυπο</u>	<u>Βράχυνση δοκιμίου (μετατόπιση του εμβόλου) (mm)</u>
1	0
2	1.6
3	5.6
4	9.7
5	14
6	19.2
7	23.7
8	29.7
9	37.7
10	39.7
11	48.2
12	54.1
13	59.7
14	65.7
15	70.8
16	75.6
17	80

Πίνακας 4.5: Παρουσίαση των στιγμιότυπων που ελήφθησαν κατά τη διαδικασία κατάρρευσης της διάταξης.

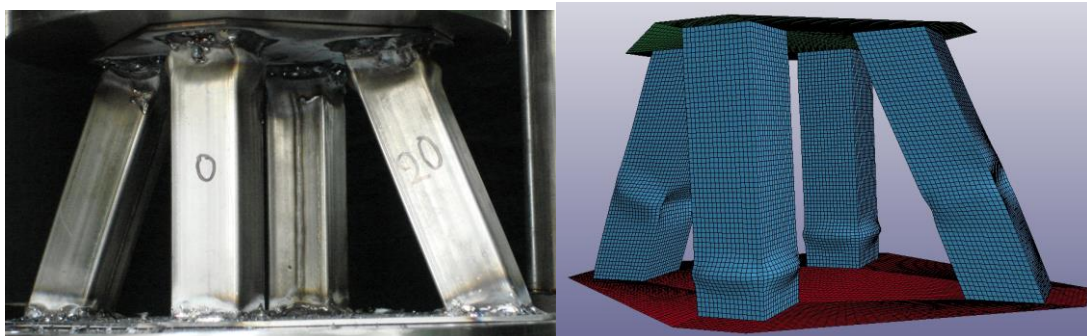
Παρακάτω αποτυπώνονται τα 17 στιγμιότυπα του παραπάνω πίνακα κατά την κατάρρευση της διάταξης του πειράματος και της προσομοίωσης, για τα οποία έγινε λόγος στον παραπάνω πίνακα.



Στιγμιότυπο 1

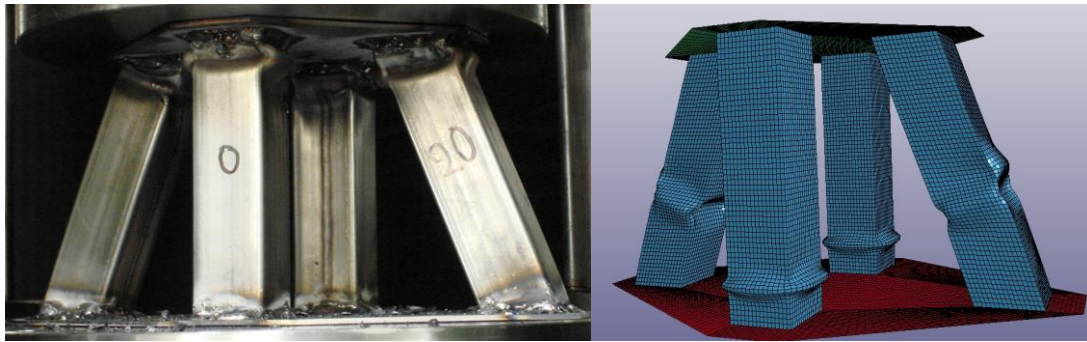


Στιγμιότυπο 2

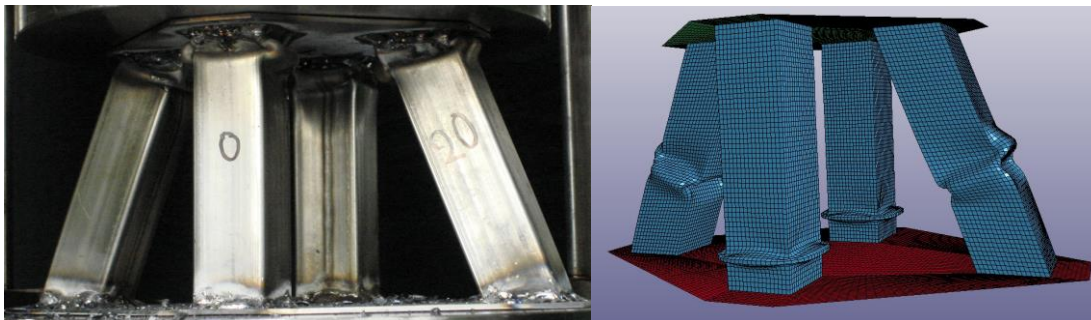


Στιγμιότυπο 3

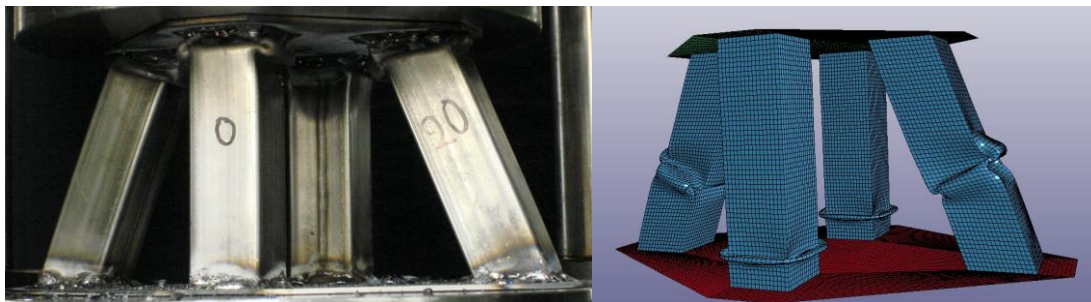
Σχήμα 4.20: Στιγμιότυπα της διάταξης από την πειραματική διαδικασία, και αντιστοίχισή τους με στιγμιότυπα (frames) από την προσομοίωση στον υπολογιστή



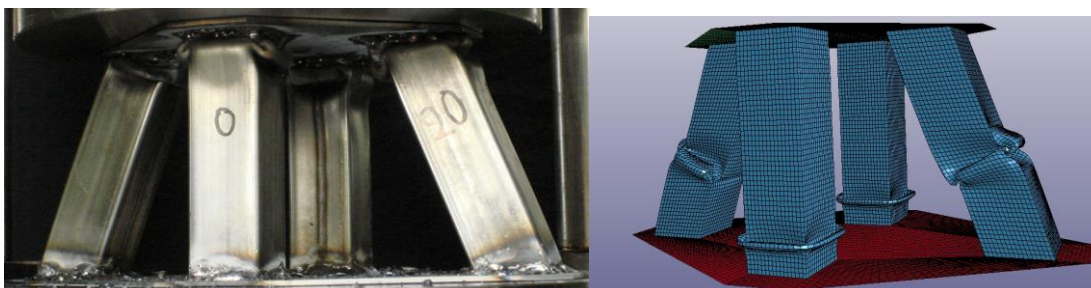
Στιγμιότυπο 4



Στιγμιότυπο 5

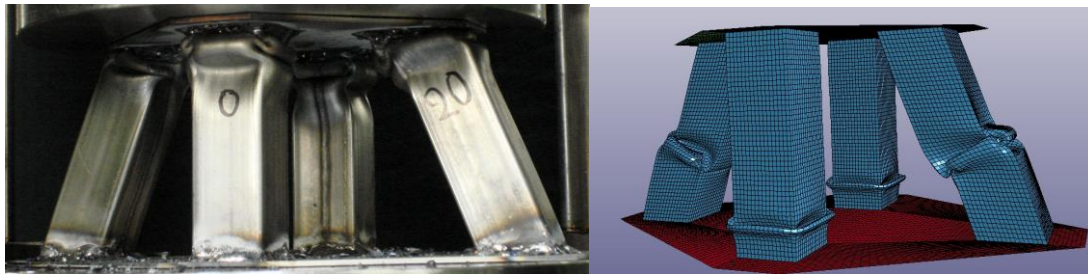


Στιγμιότυπο 6

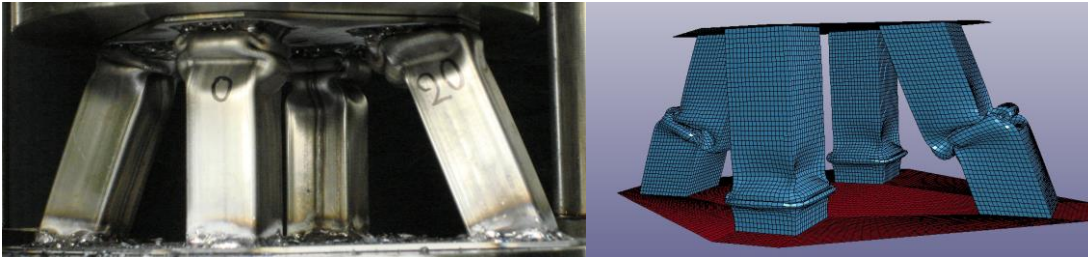


Στιγμιότυπο 7

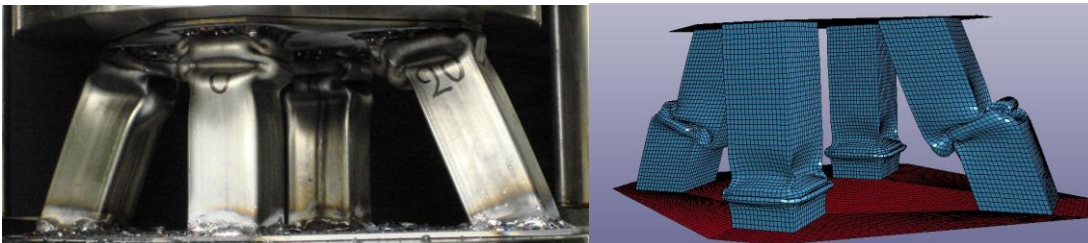
Σχήμα 4.20.1 : Στιγμιότυπα της διάταξης από την πειραματική διαδικασία, και αντιστοίχησή τους με στιγμιότυπα (frames) από την προσομοίωση στον υπολογιστή



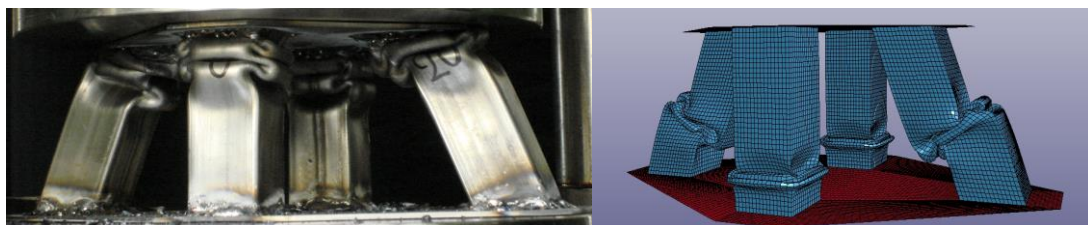
Στιγμιότυπο 8



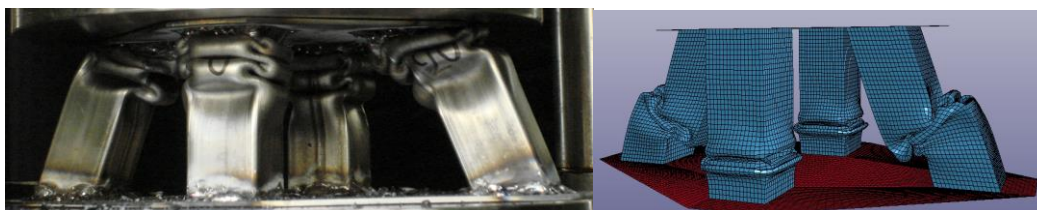
Στιγμιότυπο 9



Στιγμιότυπο 10

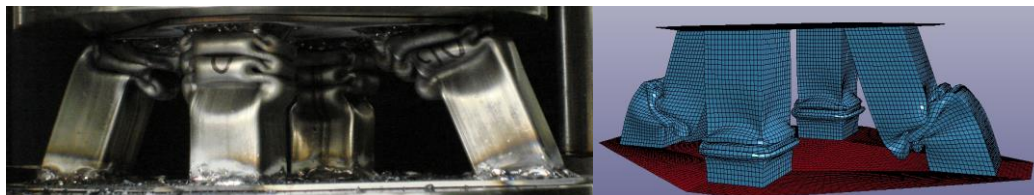


Στιγμιότυπο 11

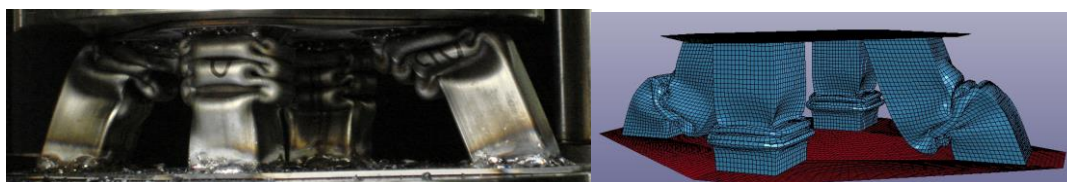


Στιγμιότυπο 12

Σχήμα 4.20.2 : Στιγμιότυπα της διάταξης από την πειραματική διαδικασία, και αντιστοίχισή τους με στιγμιότυπα (frames) από την προσομοίωση στον υπολογιστή



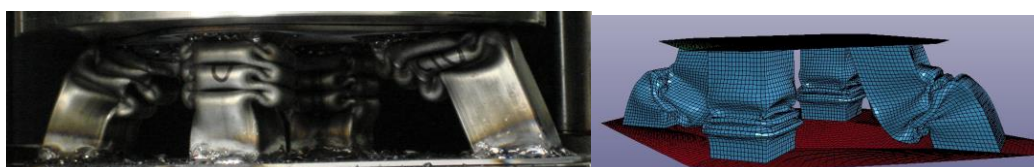
Στιγμιότυπο 13



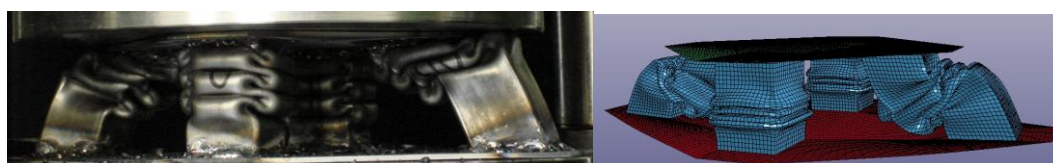
Στιγμιότυπο 14



Στιγμιότυπο 15



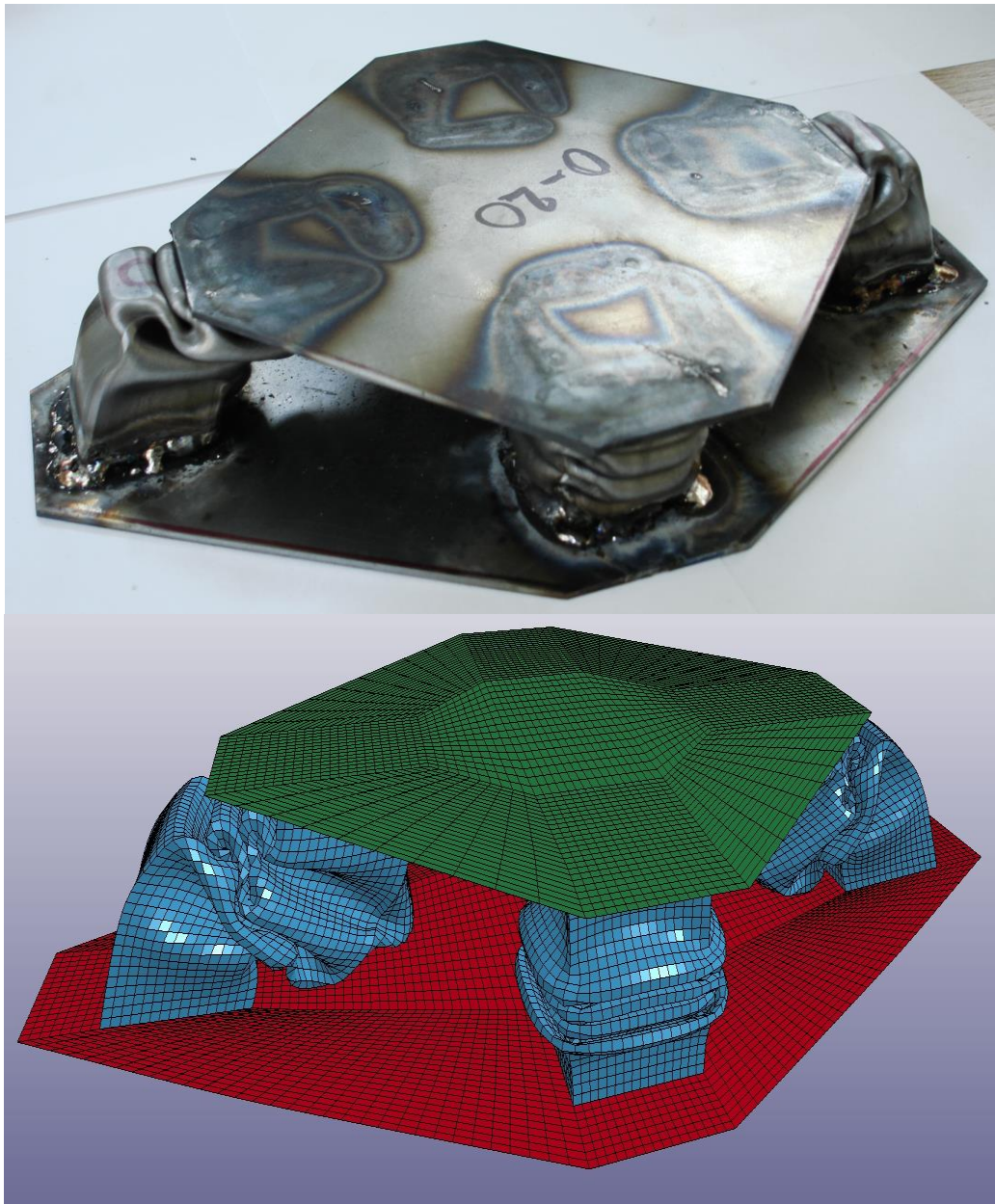
Στιγμιότυπο 16



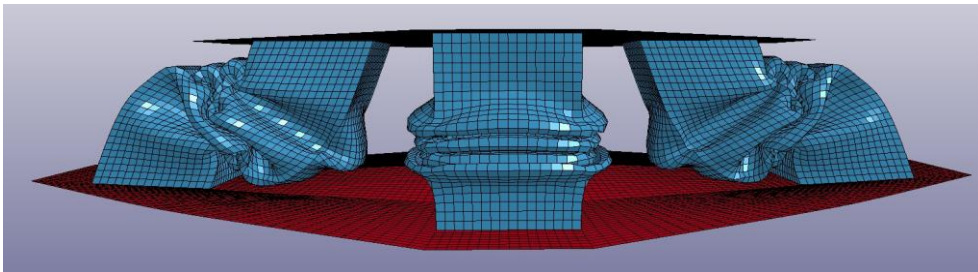
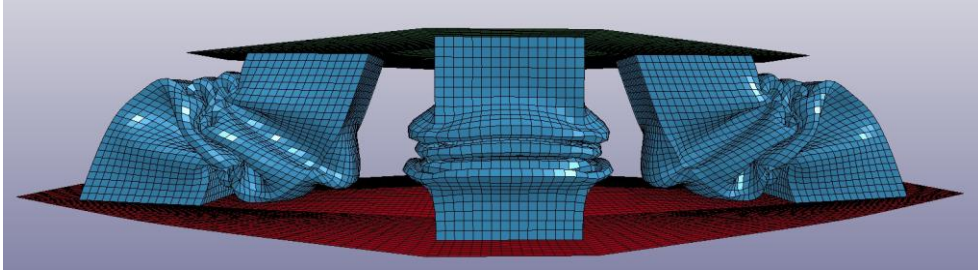
Στιγμιότυπο 17

Σχήμα 4.20.3 : Στιγμιότυπα της διάταξης από την πειραματική διαδικασία, και αντιστοίχισή τους με στιγμιότυπα (frames) από την προσομοίωση στον υπολογιστή

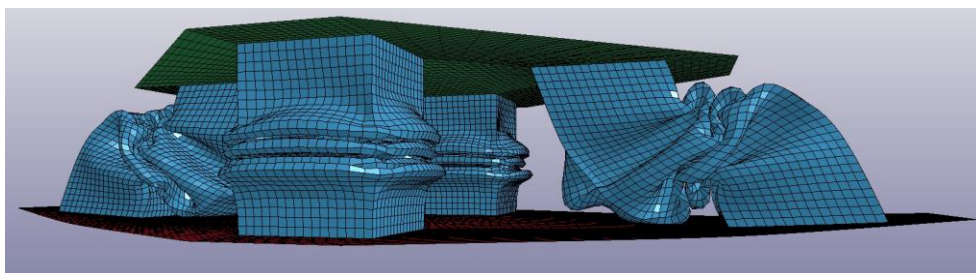
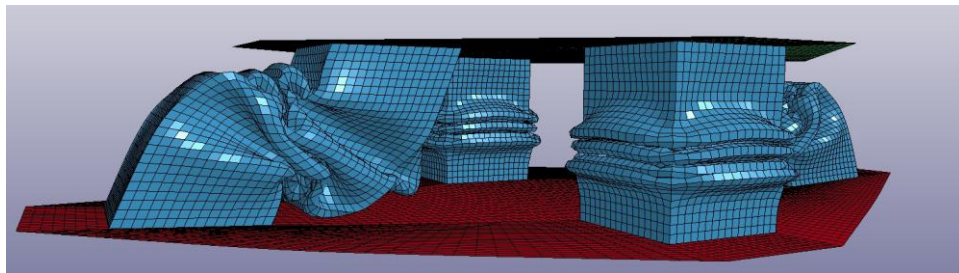
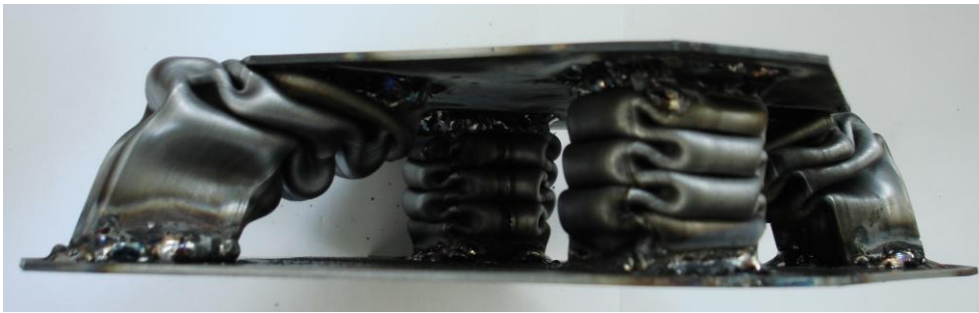
Παρακάτω παρουσιάζεται η διάταξη μετά το πέρας του πειράματος, δηλαδή στην τελική μορφή του και συγκρίνεται με αυτό που προκύπτει από την μοντελοποίηση στο LS-DYNA.



Σχήμα 4.21: Αντιστοιχία όψεων της τελικής μορφής της διάταξης, όπως προκύπτει από την πειραματική διαδικασία και την προσομοίωση.

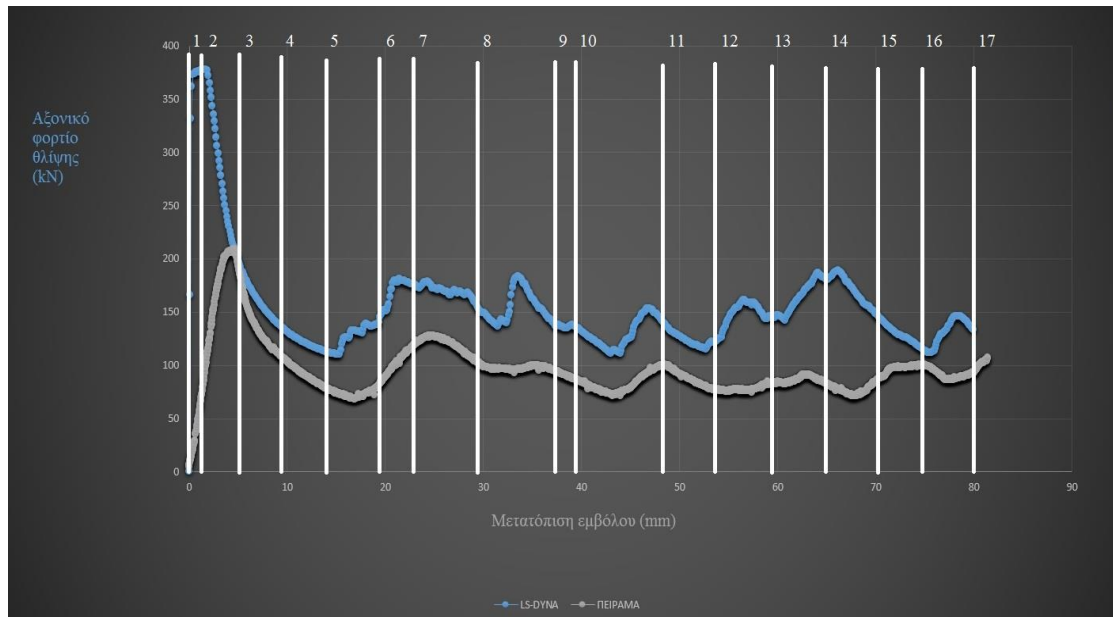


Σχήμα 4.22: Αντιστοιχία όψεων της τελικής μορφής της διάταξης, όπως προκύπτει από την πειραματική διαδικασία και την προσομοίωση.



Σχήμα 4.23: Αντιστοιχία όψεων της τελικής μορφής της διάταξης, όπως προκύπτει από την πειραματική διαδικασία και την προσομοίωση.

Απεικόνιση της μεταβολής του φορτίου συναρτήσει της βράχυνσης της διάταξης, μετά την επεξεργασία των τιμών που κατέγραψε το πρόγραμμα LabVIEW 8.6



Σχήμα 4.24: Σύγκριση διαγραμμάτων αξονικού φορτίου - μετατόπισης εμβόλου. Με γκρι χρώμα παριστάνεται η πειραματική καμπύλη, με μπλε αυτή που προκύπτει από την προσομοίωση στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Οι αριθμοί 1 έως 17 αντιστοιχούν στα στιγμιότυπα που έχουν ληφθεί κατά το πείραμα.

Υπολογισμός Μέγιστου και Μέσου φορτίου, Ποσοστιαίων διαφορών θεωρητικών και πειραματικών φορτίων, ομοιομορφία φορτίου καθώς και συνολικής ενέργειας που δαπανήθηκε.

- Μέγιστο φορτίο διάταξης από πείραμα: **208.990 kN**
- Μέγιστο φορτίο διάταξης από προσομοίωση: **377.400 kN**
- Ποσοστιαία διαφορά μέγιστου θεωρητικού φορτίου σε σχέση με το πειραματικό: **0.80 ή 80%**
- Μέσο φορτίο μονού δοκιμίου από πείραμα: **95.360 kN**
- Μέσο φορτίο μονού δοκιμίου από προσομοίωση: **155.350 kN**
- Ποσοστιαία διαφορά μέσου πειραματικού φορτίου σε σχέση με το θεωρητικό: **0.62 ή 62%**

Η ομοιομορφία φορτίου, δηλαδή ο λόγος του μέγιστου φορτίου προς το μέσο, δίνεται παρακάτω και για τις δύο περιπτώσεις:

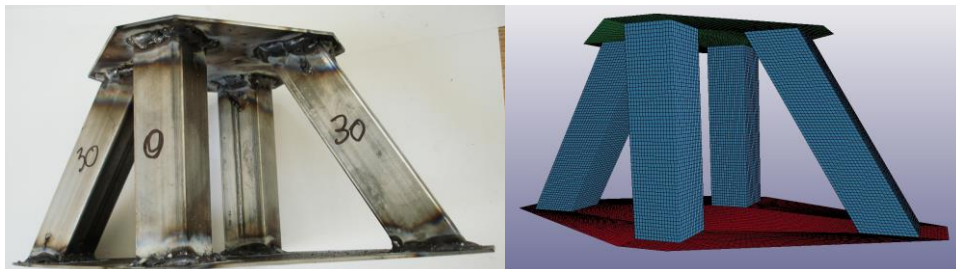
- Για την πειραματική διάταξη: **2.19**
- Για το θεωρητικό μοντέλο: **2.42**

Χωρίς βλάβη της γενικότητας, μπορούμε να πολλαπλασιάσουμε τις παραπάνω τιμές του μέσου φορτίου με τη συνολική μετατόπιση του εμβόλου, προκειμένου να βρούμε τη συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε κατά την αξονική κατάρρευση. Τόσο στο πειραματικό όσο και στο θεωρητικό μοντέλο η μετατόπιση του εμβόλου είναι ίση με 80 mm. Υπενθυμίζουμε εδώ ότι ο πολλαπλασιασμός του φορτίου σε kN με τη μετατόπιση σε mm θα μας δώσει την ενέργεια σε Joule (J).

- ο Για την πειραματική διάταξη: **7628.8 J**
- ο Για το θεωρητικό μοντέλο: **12428 J**

4.7. Πείραμα και προσομοίωση για την διάταξη τεσσάρων σωλήνων τοποθετημένων υπό γωνίες 0^0 και 30^0 (5).

Η διάταξη αυτή αποτελείται από τέσσερις ορθογωνικής διατομής σωλήνες, διαστάσεων 30mm x 30mm x 1.4mm (όσοι βρίσκονται σε γωνία 0^0) και 30 mm x 34.42mm (όσοι βρίσκονται σε γωνία 30^0) και ύψους 120mm. Για να επιτευχθεί η στιβαρότητα και η αλληλεπίδραση των σωλήνων μεταξύ τους, οι σωλήνες συγκολλήθηκαν σε δυο λεπτές πλάκες του ίδιου υλικού, με διαστάσεις 160mmx160mmx3mm(πάνω πλάκα) και 303.18mm x 160mm x3mm (κάτω πλάκα). Παρακάτω παρουσιάζεται η διάταξη όπως κατασκευαστική για το πείραμα καθώς και μοντελοποιημένη.



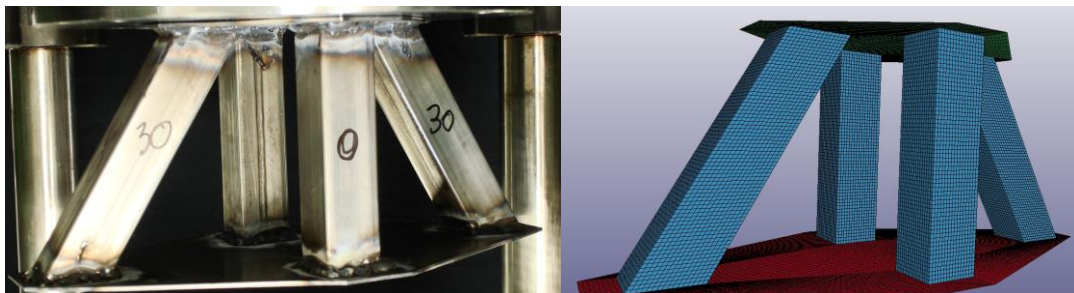
Σχήμα 4.25 Παρουσίαση πλήρους διάταξης, όπως κατασκευάστηκε για το πείραμα καθώς και όπως προσομοιώνεται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA.

Η βασική διαφορά που παρουσιάζει η διάταξη είναι η τοποθέτηση των δυο σωλήνων υπό γωνία 30^0 , αλλάζοντας έτσι τις συνολικές διαστάσεις της διάταξης. Κατά τη διαδικασία της αξονικής θλίψης στο εργαστήριο, ελήφθησαν συνολικά 17 στιγμιότυπα, τα οποία θα παρουσιαστούν στη συνέχεια. Πολύ χρήσιμος θα μας είναι ο παρακάτω Πίνακας 4.6, στον οποίο θα αντιστοιχίσουμε κάθε στιγμιότυπο του πειράματος με την βράχυνση της διάταξης.

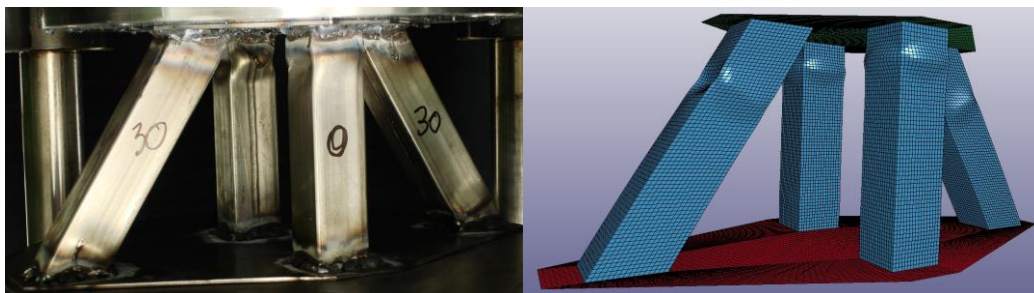
<u>Στιγμιότυπο</u>	<u>Βράχυνση δοκιμίου (μετατόπιση του εμβόλου) (mm)</u>
1	0
2	5
3	6.8
4	10.4
5	14.9
6	20.1
7	26.7
8	33
9	39.3
10	44.6
11	49.5
12	55.5
13	61.3
14	66.8
15	71.1
16	75.5
17	80

Πίνακας 4.6: Παρουσίαση των στιγμιότυπων που ελήφθησαν κατά τη διαδικασία κατάρρευσης της διάταξης.

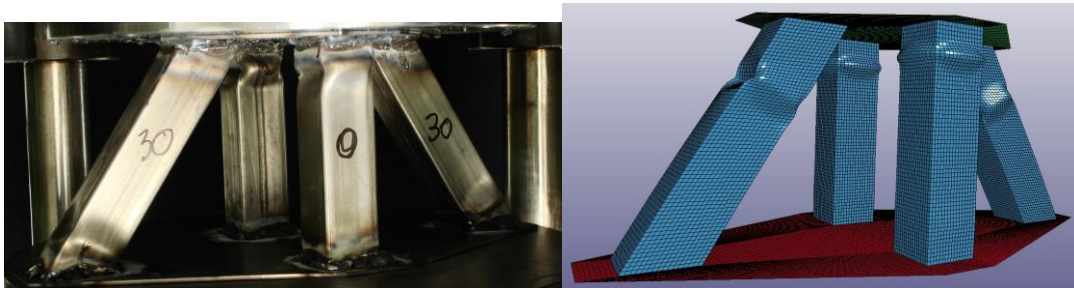
Παρακάτω αποτυπώνονται τα 17 στιγμιότυπα του παραπάνω πίνακα κατά την κατάρρευση της διάταξης του πειράματος και της προσομοίωσης, για τα οποία έγινε λόγος στον παραπάνω πίνακα.



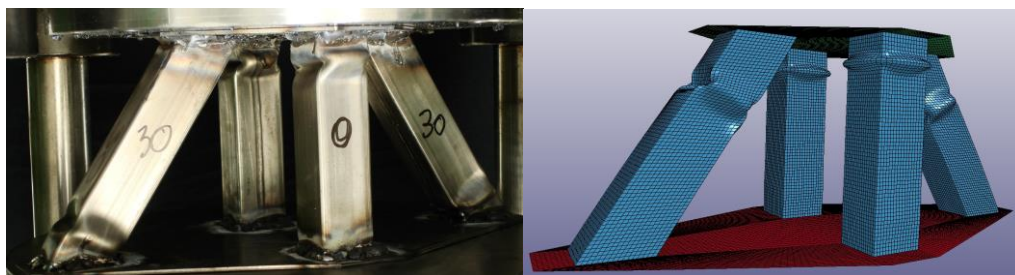
Στιγμιότυπο 1



Στιγμιότυπο 2

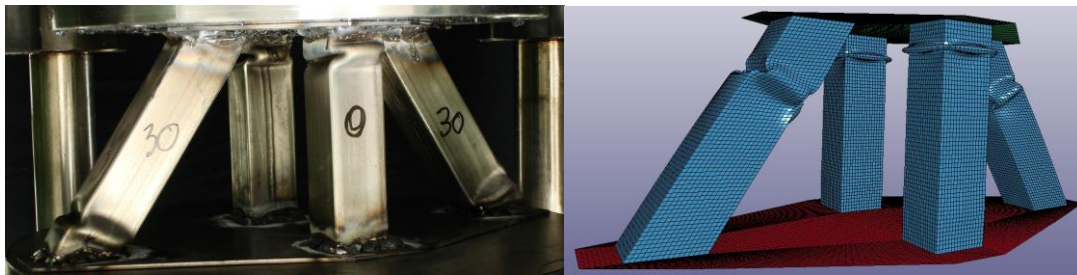


Στιγμιότυπο 3

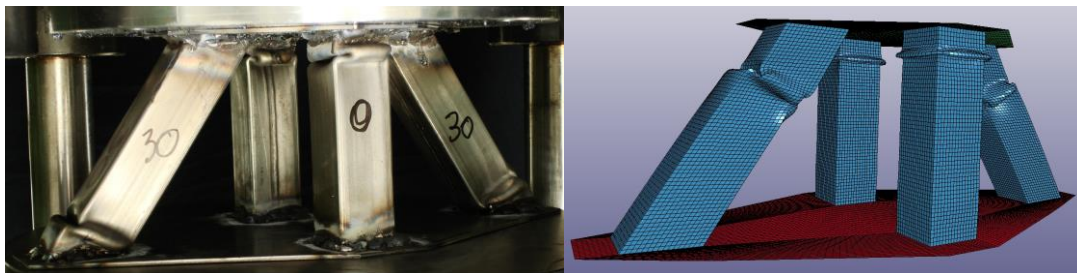


Στιγμιότυπο 4

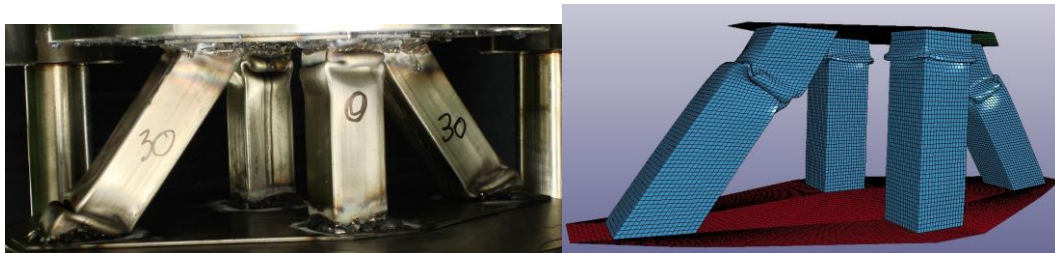
Σχήμα 4.26 : Στιγμιότυπα της διάταξης από την πειραματική διαδικασία, και αντιστοίχισή τους με στιγμιότυπα (frames) από την προσομοίωση στον υπολογιστή



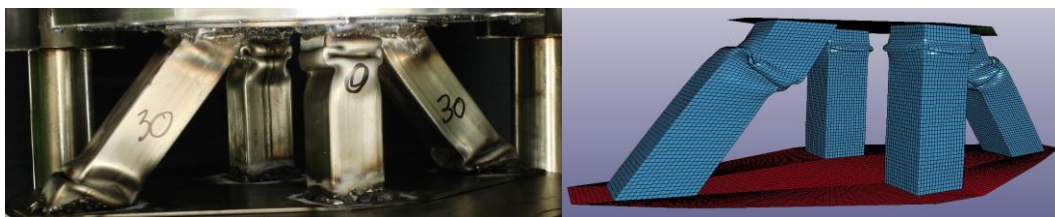
Στιγμιότυπο 5



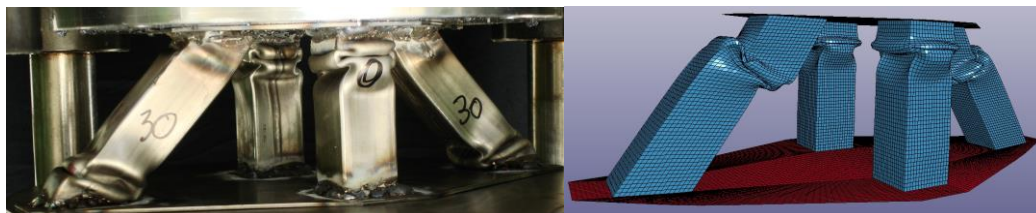
Στιγμιότυπο 6



Στιγμιότυπο 7

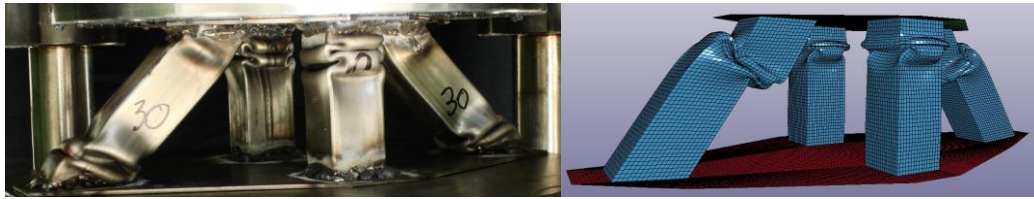


Στιγμιότυπο 8

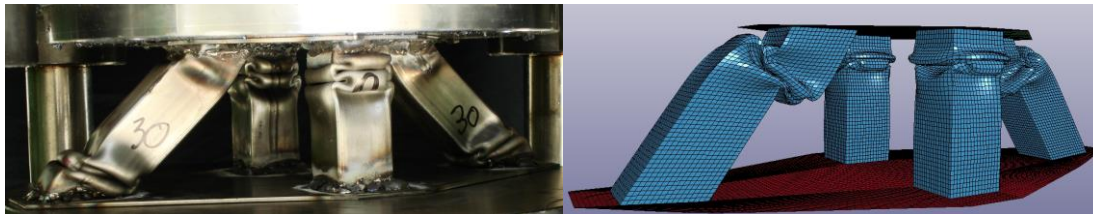


Στιγμιότυπο 9

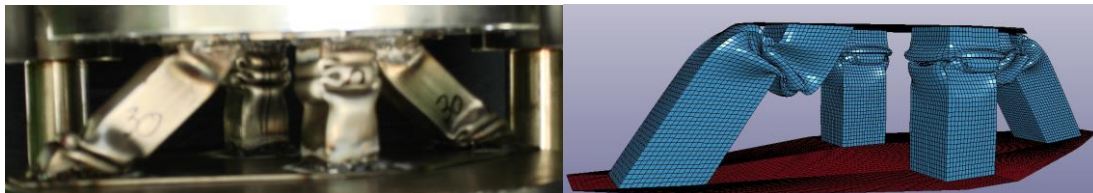
Σχήμα 4.26.1 : Στιγμιότυπα της διάταξης από την πειραματική διαδικασία, και αντιστοίχσή τους με στιγμιότυπα (frames) από την προσομοίωση στον υπολογιστή



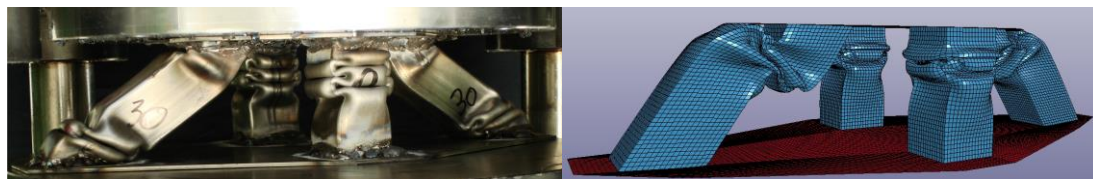
Στιγμιότυπο 10



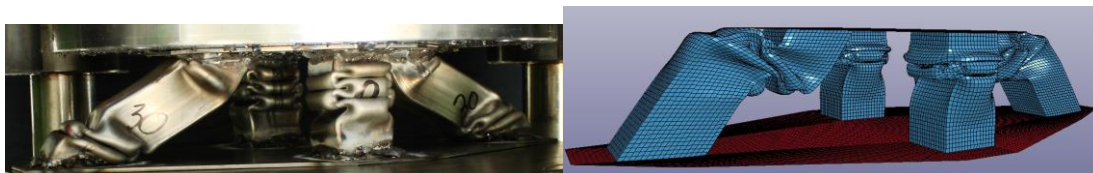
Στιγμιότυπο 11



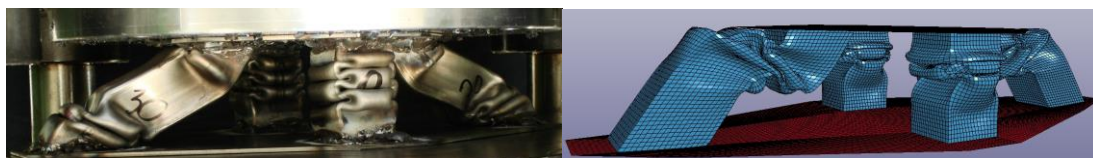
Στιγμιότυπο 12



Στιγμιότυπο 13

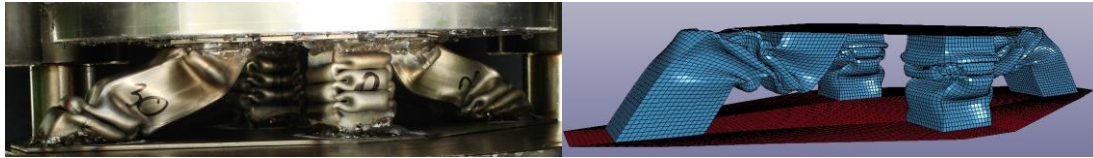


Στιγμιότυπο 14

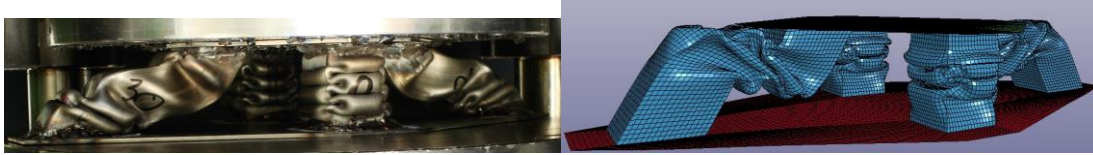


Στιγμιότυπο 15

Σχήμα 4.26.2 : Στιγμιότυπα της διάταξης από την πειραματική διαδικασία, και αντιστοίχησή τους με στιγμιότυπα (frames) από την προσομοίωση στον υπολογιστή



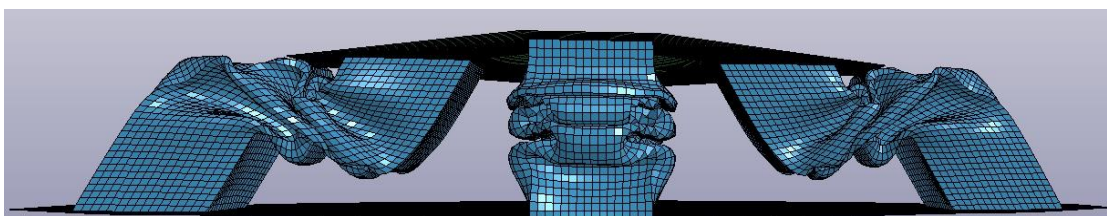
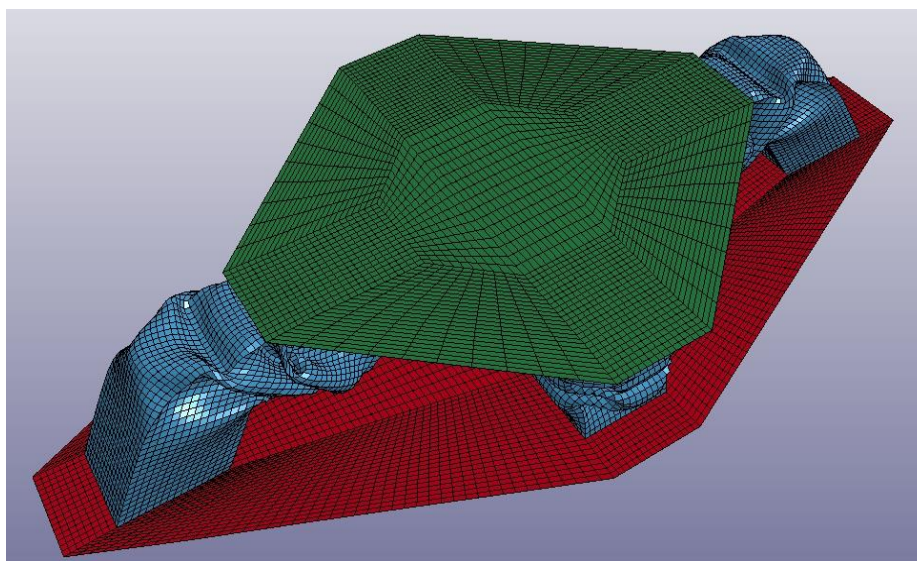
Στιγμιότυπο 16



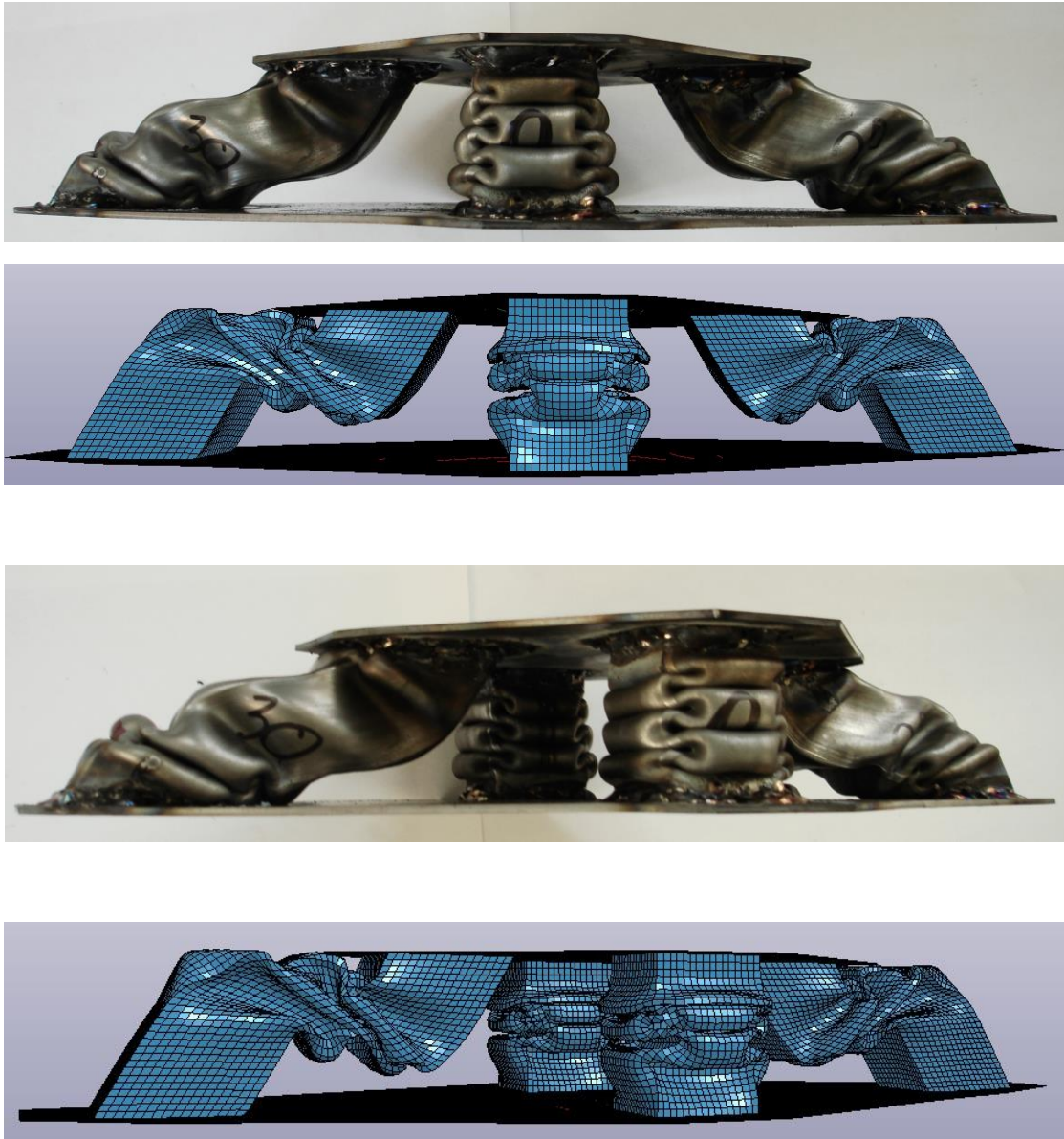
Στιγμιότυπο 17

Σχήμα 4.26.3 : Στιγμιότυπα της διάταξης από την πειραματική διαδικασία, και αντιστοίχισή τους με στιγμιότυπα (frames) από την προσομοίωση στον υπολογιστή.

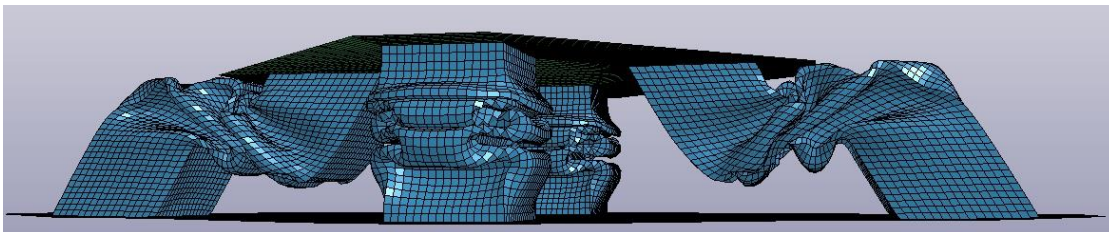
Παρακάτω παρουσιάζεται η διάταξη μετά το πέρας του πειράματος, δηλαδή στην τελική μορφή του και συγκρίνεται με αυτό που προκύπτει από την μοντελοποίηση στο LS-DYNA.



Σχήμα 4.28: Αντιστοιχία όψεων της τελικής μορφής της διάταξης, όπως προκύπτει από την πειραματική διαδικασία και την προσομοίωση.

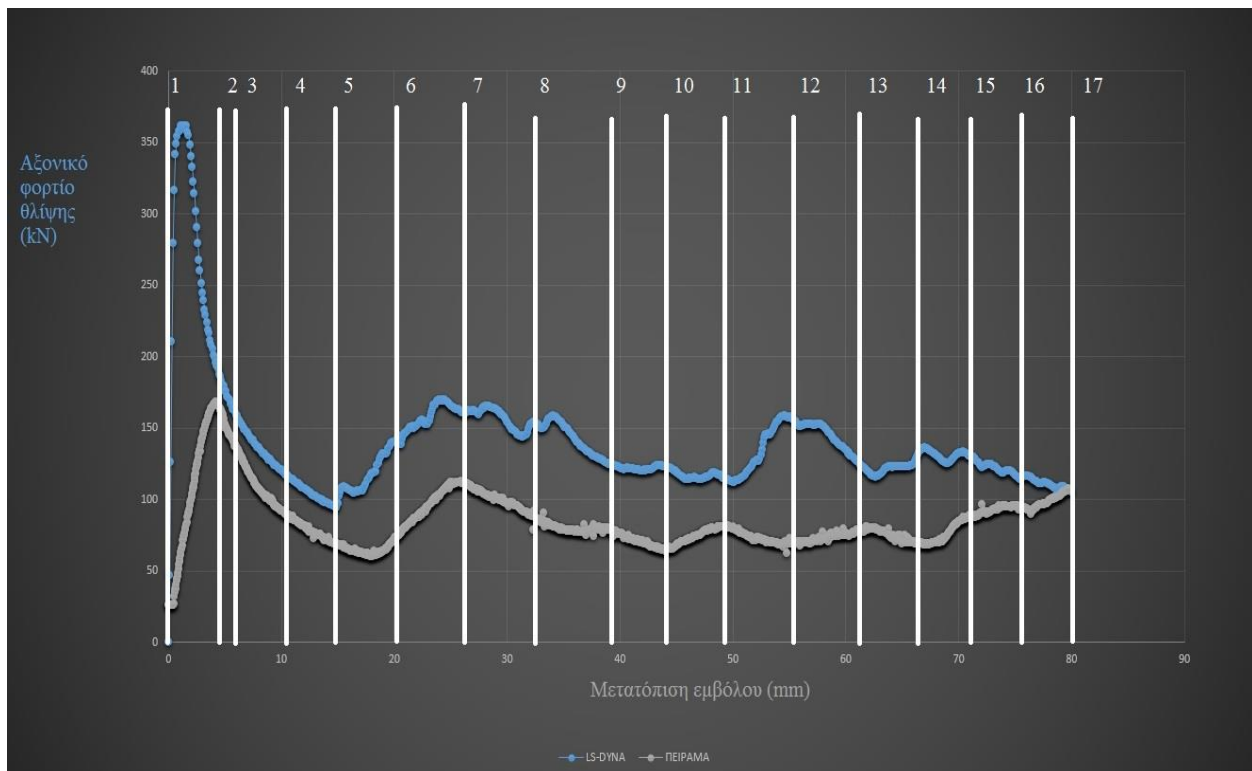


Σχήμα 4.28: Αντιστοιχία όψεων της τελικής μορφής της διάταξης, όπως προκύπτει από την πειραματική διαδικασία και την προσομοίωση.



Σχήμα 4.29: Αντιστοιχία όψεων της τελικής μορφής της διάταξης, όπως προκύπτει από την πειραματική διαδικασία και την προσομοίωση.

Απεικόνιση της μεταβολής του φορτίου συναρτήσει της βράχυνσης της διάταξης, μετά την επεξεργασία των τιμών που κατέγραψε το πρόγραμμα LabVIEW 8.6



Σχήμα 4.30: Σύγκριση διαγραμμάτων αξονικού φορτίου - μετατόπισης εμβόλου. Με γκρι χρώμα παριστάνεται η πειραματική καμπύλη, με μπλε αυτή που προκύπτει από την προσομοίωση στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Οι αριθμοί 1 έως 17 αντιστοιχούν στα στιγμιότυπα που έχουν ληφθεί κατά το πείραμα.

Υπολογισμός Μέγιστου και Μέσου φορτίου, Ποσοστιαίων διαφορών θεωρητικών και πειραματικών φορτίων, ομοιομορφία φορτίου καθώς και συνολικής ενέργειας που δαπανήθηκε.

- Μέγιστο φορτίο διάταξης από πείραμα: **168.046 kN**
- Μέγιστο φορτίο διάταξης από προσομοίωση: **361.736 kN**
- Ποσοστιαία διαφορά μέγιστου θεωρητικού φορτίου σε σχέση με το πειραματικό: **1.15 ή 115%**
- Μέσο φορτίο μονού δοκιμίου από πείραμα: **85.259 kN**
- Μέσο φορτίο μονού δοκιμίου από προσομοίωση: **140.053 kN**
- Ποσοστιαία διαφορά μέσου πειραματικού φορτίου σε σχέση με το θεωρητικό: **0.64 ή 64%**

Η ομοιομορφία φορτίου, δηλαδή ο λόγος του μέγιστου φορτίου προς το μέσο, δίνεται παρακάτω και για τις δύο περιπτώσεις:

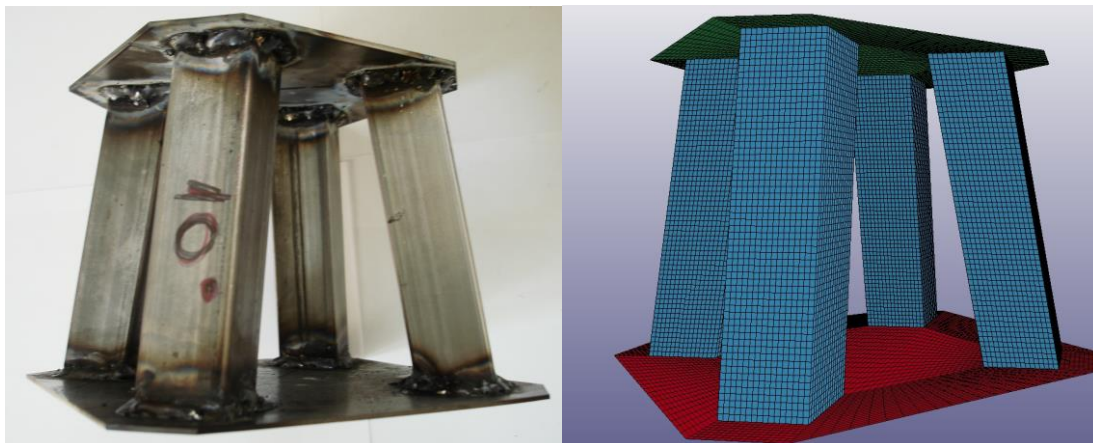
- Για την πειραματική διάταξη: **1.97**
- Για το θεωρητικό μοντέλο: **2.58**

Χωρίς βλάβη της γενικότητας, μπορούμε να πολλαπλασιάσουμε τις παραπάνω τιμές του μέσου φορτίου με τη συνολική μετατόπιση του εμβόλου, προκειμένου να βρούμε τη συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε κατά την αξονική κατάρρευση. Τόσο στο πειραματικό όσο και στο θεωρητικό μοντέλο η μετατόπιση του εμβόλου είναι ίση με 80 mm. Υπενθυμίζουμε εδώ ότι ο πολλαπλασιασμός του φορτίου σε kN με τη μετατόπιση σε mm θα μας δώσει την ενέργεια σε Joule (J).

- ο Για την πειραματική διάταξη: **6820.72 J**
- ο Για το θεωρητικό μοντέλο: **11204.24 J**

4.8. Πείραμα και προσομοίωση για την διάταξη τεσσάρων σωλήνων τοποθετημένων υπό γωνίες 10^0 και 10^0 (6).

Η διάταξη αυτή αποτελείται από τέσσερεις ορθογωνικής διατομής σωλήνες, διαστάσεων 30.44mm x 30.44mm x 1.4mm και ύψους 120mm. Για να επιτευχθεί η στιβαρότητα και η αλληλεπίδραση των σωλήνων μεταξύ τους, οι σωλήνες συγκολλήθηκαν σε δυο λεπτές πλάκες του ίδιου υλικού, με διαστάσεις 160mm x 160mm x 3mm(πάνω πλάκα) και 198,9mm x 198,9mm x 3mm(κάτω πλάκα).Παρακάτω παρουσιάζεται η διάταξη όπως κατασκευαστική για το πείραμα καθώς και μοντελοποιημένη.



Σχήμα 4.31: Παρουσίαση πλήρους διάταξης, όπως κατασκευάστηκε για το πείραμα καθώς και όπως προσομοιώνεται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA.

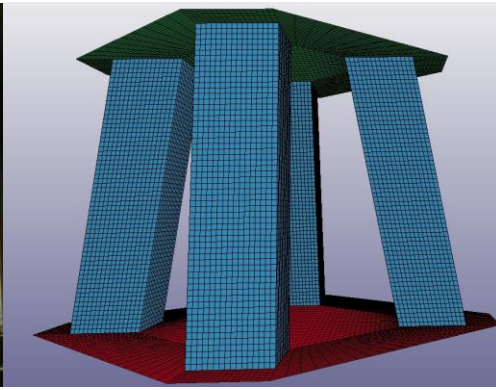
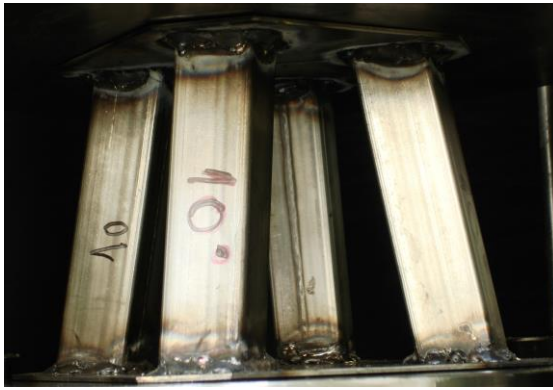
Η βασική διαφορά που παρουσιάζει η διάταξη είναι η τοποθέτηση των όλων των σωλήνων υπό γωνία 10^0 , αλλάζοντας έτσι τις συνολικές διαστάσεις της διάταξης. Κατά τη διαδικασία της αξονικής θλίψης στο εργαστήριο, ελήφθησαν συνολικά 15 στιγμιότυπα, τα οποία θα παρουσιαστούν στη συνέχεια. Πολύ

χρήσιμος θα μας είναι ο παρακάτω Πίνακας 4.7, στον οποίο θα αντιστοιχίσουμε κάθε στιγμιότυπο του πειράματος με την βράχυνση της διάταξης.

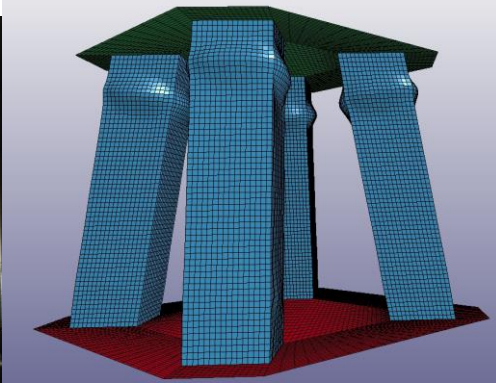
<u>Στιγμιότυπο</u>	<u>Βράχυνση δοκιμίου (μετατόπιση του εμβόλου) (mm)</u>
1	0
2	4.6
3	6.4
4	11
5	17.4
6	22
7	27.2
8	33
9	37.9
10	47
11	55.5
12	62.5
13	70.9
14	75.1
15	80

Πίνακας 4.7: Παρουσίαση των στιγμιότυπων που ελήφθησαν κατά τη διαδικασία κατάρρευσης της διάταξης.

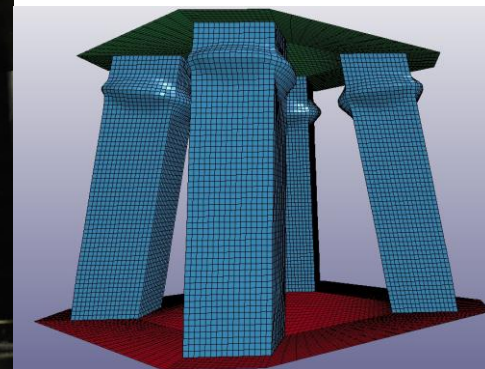
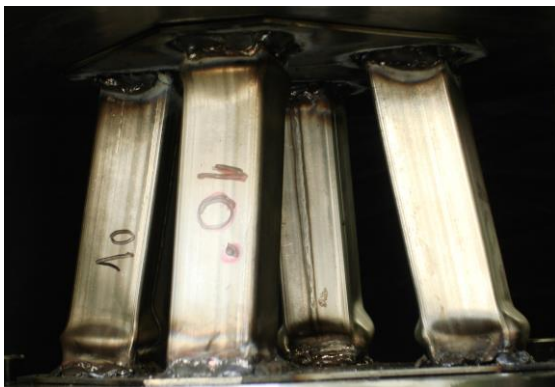
Παρακάτω αποτυπώνονται τα 15 στιγμιότυπα του παραπάνω πίνακα κατά την κατάρρευση της διάταξης του πειράματος και της προσομοίωσης, για τα οποία έγινε λόγος στον παραπάνω πίνακα.



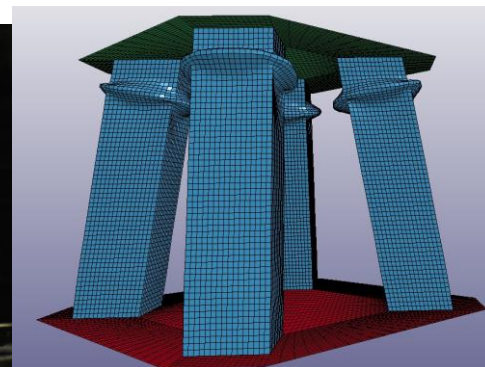
Στιγμιότυπο 1



Στιγμιότυπο 2

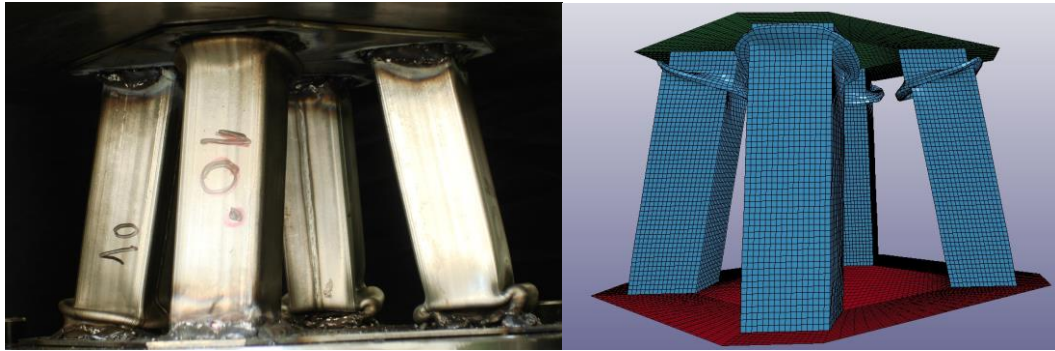


Στιγμιότυπο 3

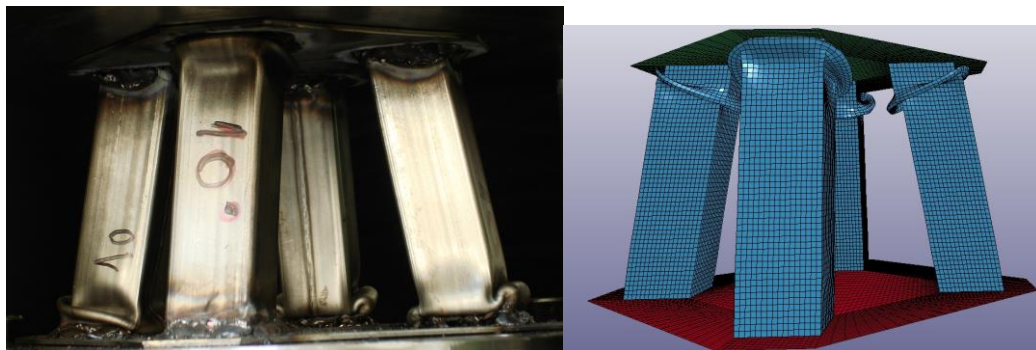


Στιγμιότυπο 4

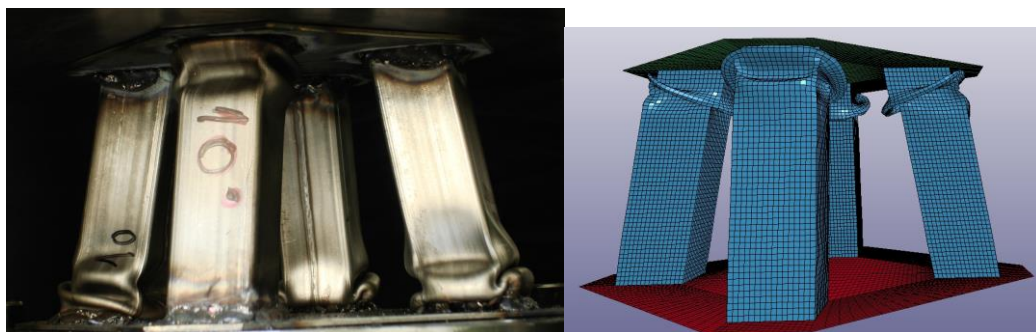
Σχήμα 4.32 : Στιγμιότυπα της διάταξης από την πειραματική διαδικασία, και αντιστοίχισή τους με στιγμιότυπα (frames) από την προσομοίωση στον υπολογιστή
Ε.Ν.ΝΟΤΑΡΑΣ-ΙΟΥΛΙΟΣ 2015



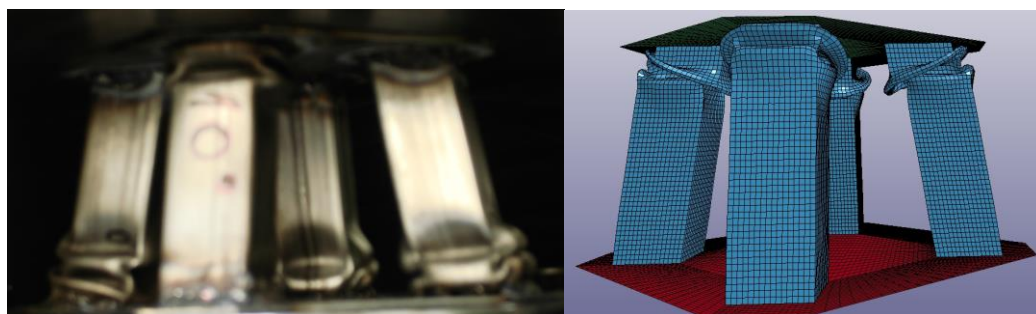
Στιγμιότυπο 5



Στιγμιότυπο 6

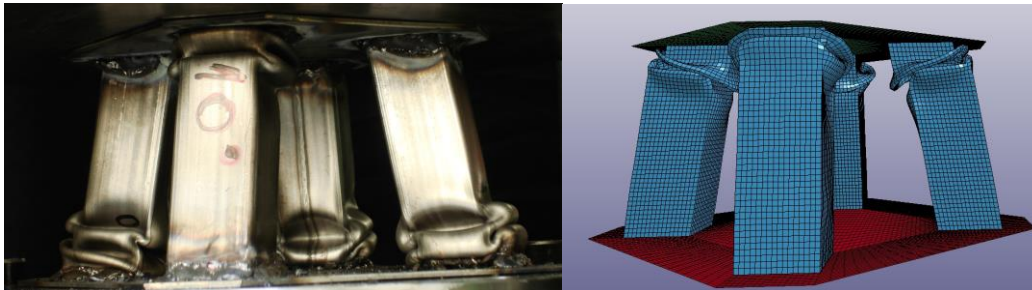


Στιγμιότυπο 7

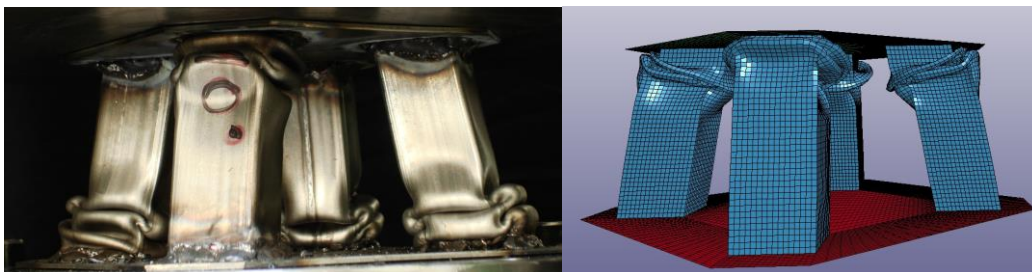


Στιγμιότυπο 8

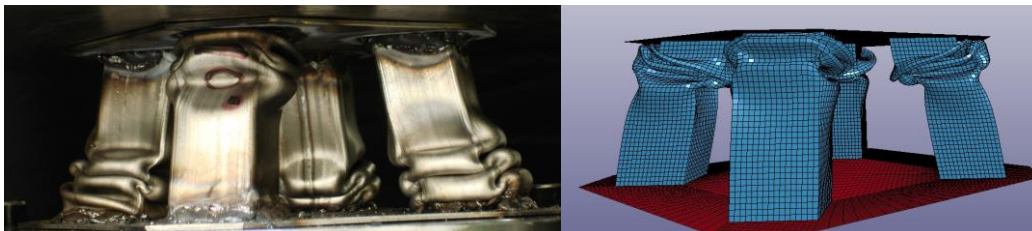
Σχήμα 4.32.1 : Στιγμιότυπα της διάταξης από την πειραματική διαδικασία, και αντιστοίχισή τους με στιγμιότυπα (frames) από την προσομοίωση στον υπολογιστή



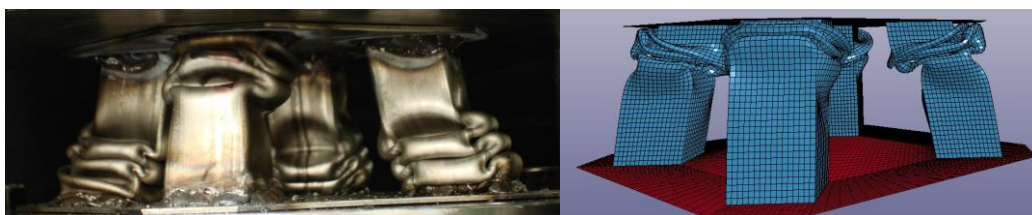
Στιγμιότυπο 9



Στιγμιότυπο 10



Στιγμιότυπο 11

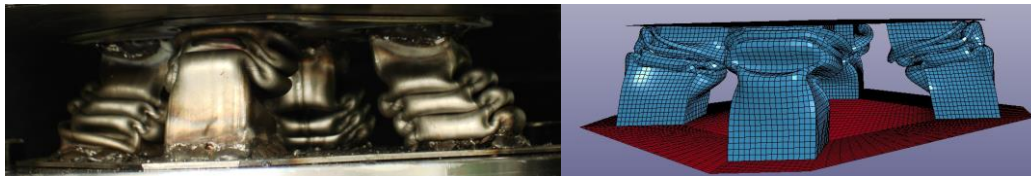


Στιγμιότυπο 12

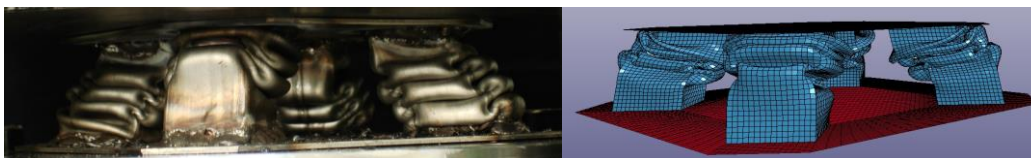
Σχήμα 4.32.2 : Στιγμιότυπα της διάταξης από την πειραματική διαδικασία, και αντιστοίχισή τους με στιγμιότυπα (frames) από την προσομοίωση στον υπολογιστή



Στιγμιότυπο 13



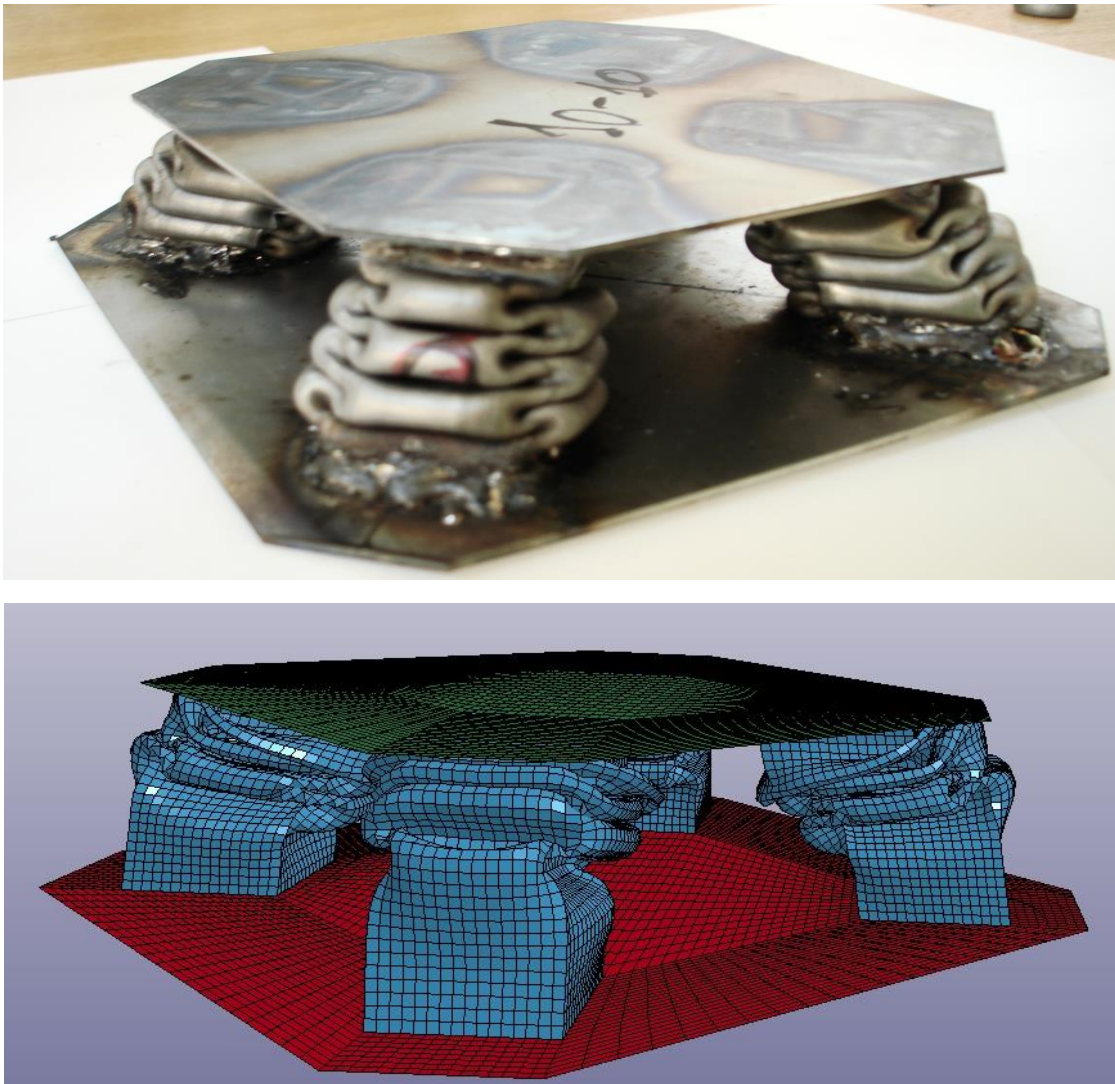
Στιγμιότυπο 14



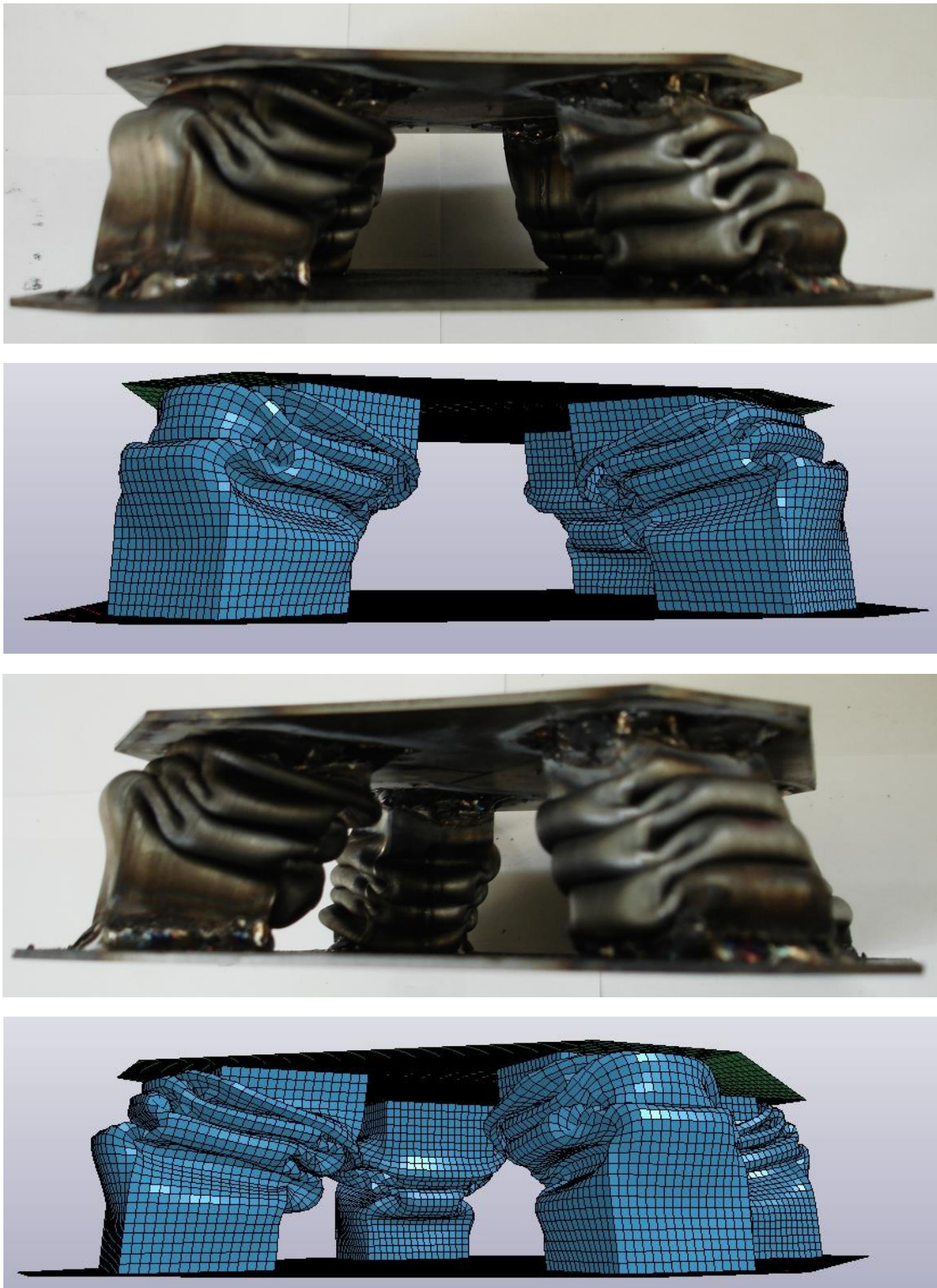
Στιγμιότυπο 15

Σχήμα 4.32.3 : Στιγμιότυπα της διάταξης από την πειραματική διαδικασία, και αντιστοίχισή τους με στιγμιότυπα (frames) από την προσομοίωση στον υπολογιστή

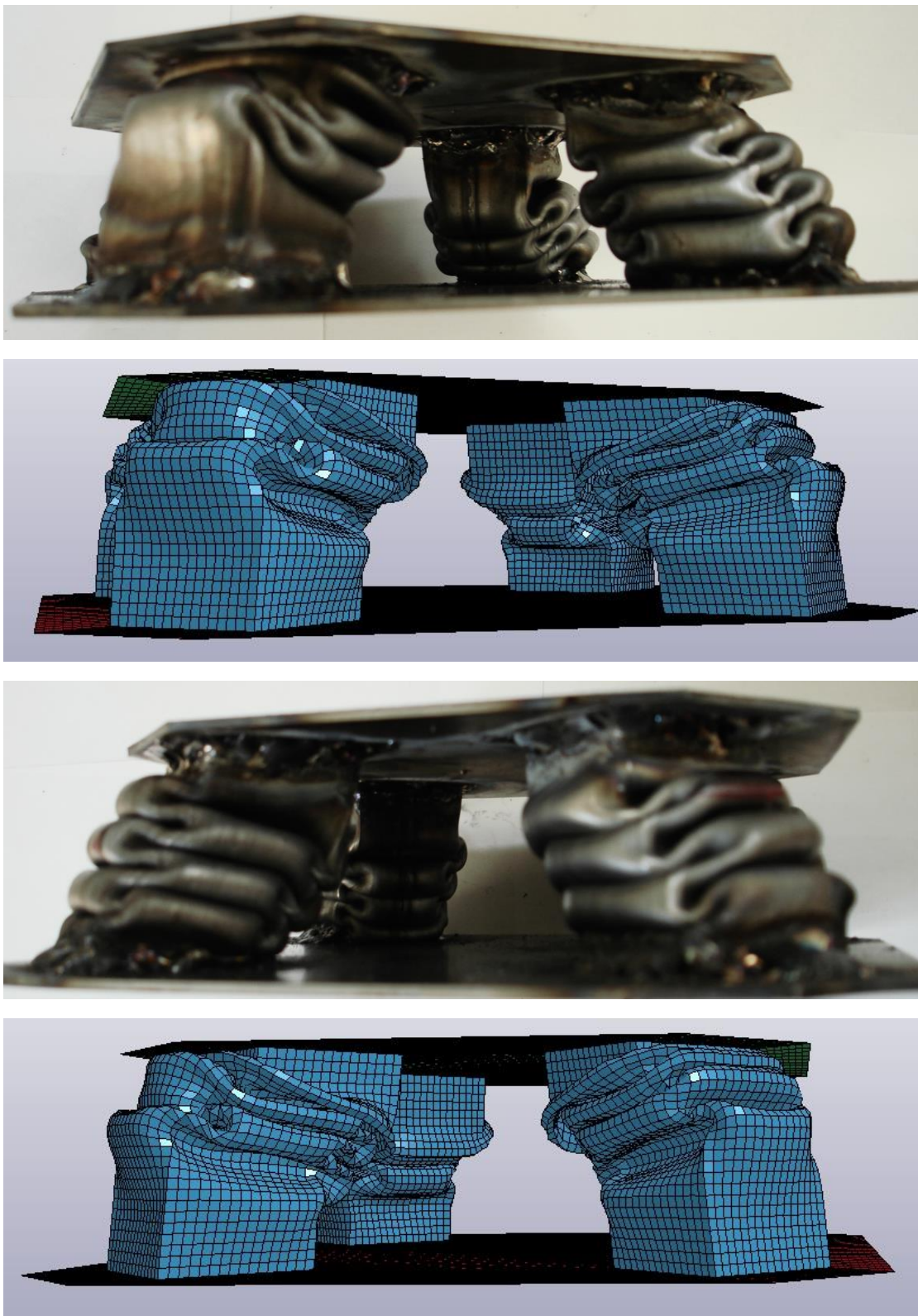
Παρακάτω παρουσιάζεται η διάταξη μετά το πέρας του πειράματος, δηλαδή στην τελική μορφή του και συγκρίνεται με αυτό που προκύπτει από την μοντελοποίηση στο LS-DYNA.



Σχήμα 4.33: Αντιστοιχία όψεων της τελικής μορφής της διάταξης, όπως προκύπτει από την πειραματική διαδικασία και την προσομοίωση.

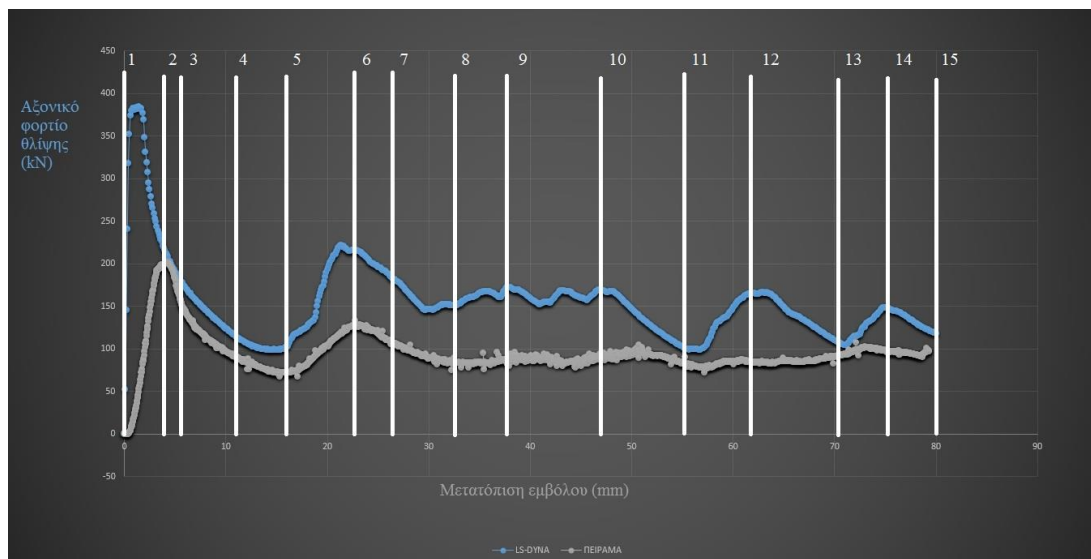


Σχήμα 4.34: Αντιστοιχία όψεων της τελικής μορφής της διάταξης, όπως προκύπτει από την πειραματική διαδικασία και την προσομοίωση.



Σχήμα 4.35: Αντιστοιχία όψεων της τελικής μορφής της διάταξης, όπως προκύπτει από την πειραματική διαδικασία και την προσομοίωση.

Απεικόνιση της μεταβολής του φορτίου συναρτήσει της βράχυνσης της διάταξης, μετά την επεξεργασία των τιμών που κατέγραψε το πρόγραμμα LabVIEW 8.6



Σχήμα 4.36: Σύγκριση διαγραμμάτων αξονικού φορτίου - μετατόπισης εμβόλου. Με γκρι χρώμα παριστάνεται η πειραματική καμπύλη, με μπλε αυτή που προκύπτει από την προσομοίωση στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Οι αριθμοί 1 έως 15 αντιστοιχούν στα στιγμιότυπα που έχουν ληφθεί κατά το πείραμα.

Υπολογισμός Μέγιστου και Μέσου φορτίου, Ποσοστιαίων διαφορών θεωρητικών και πειραματικών φορτίων, ομοιομορφία φορτίου καθώς και συνολικής ενέργειας που δαπανήθηκε.

- Μέγιστο φορτίο διάταξης από πείραμα: **201.807 kN**
- Μέγιστο φορτίο διάταξης από προσομοίωση: **384.085 kN**
- Ποσοστιαία διαφορά μέγιστου θεωρητικού φορτίου σε σχέση με το πειραματικό: **0.9 ή 90%**
- Μέσο φορτίο μονού δοκιμίου από πείραμα: **94.535 kN**
- Μέσο φορτίο μονού δοκιμίου από προσομοίωση: **154.392 kN**
- Ποσοστιαία διαφορά μέσου πειραματικού φορτίου σε σχέση με το θεωρητικό: **0.63 ή 63%**

Η ομοιομορφία φορτίου, δηλαδή ο λόγος του μέγιστου φορτίου προς το μέσο, δίνεται παρακάτω και για τις δύο περιπτώσεις:

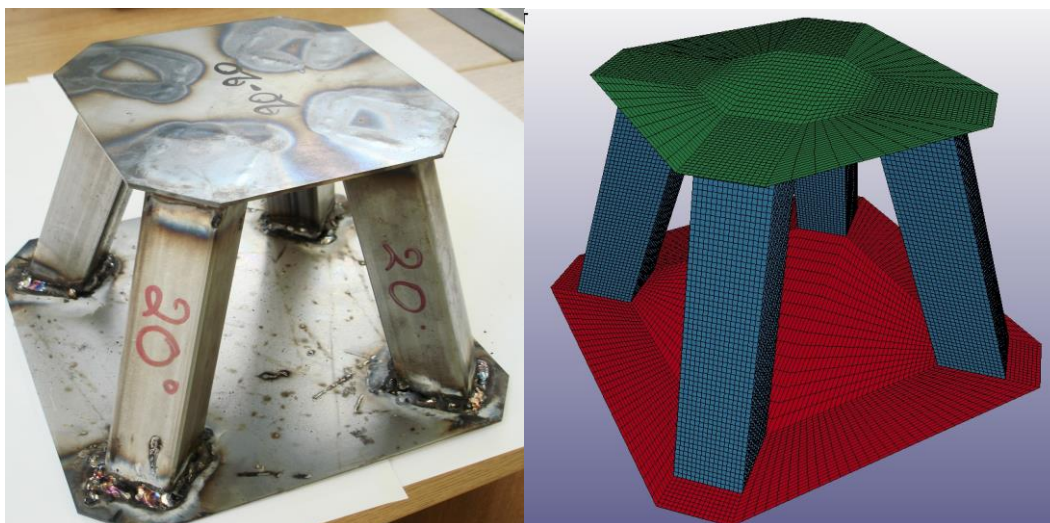
- Για την πειραματική διάταξη: **2.13**
- Για το θεωρητικό μοντέλο: **2.48**

Χωρίς βλάβη της γενικότητας, μπορούμε να πολλαπλασιάσουμε τις παραπάνω τιμές του μέσου φορτίου με τη συνολική μετατόπιση του εμβόλου, προκειμένου να βρούμε τη συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε κατά την αξονική κατάρρευση. Τόσο στο πειραματικό όσο και στο θεωρητικό μοντέλο η μετατόπιση του εμβόλου είναι ίση με 80 mm. Υπενθυμίζουμε εδώ ότι ο πολλαπλασιασμός του φορτίου σε kN με τη μετατόπιση σε mm θα μας δώσει την ενέργεια σε Joule (J).

- Για την πειραματική διάταξη: **7562.8 J**
- Για το θεωρητικό μοντέλο: **12351.36 J**

4.9. Πείραμα και προσομοίωση για την διάταξη τεσσάρων σωλήνων τοποθετημένων υπό γωνίες 20° και 20° (7).

Η διάταξη αυτή αποτελείται από τέσσερεις ορθογωνικής διατομής σωλήνες, διαστάσεων $31.83\text{mm} \times 31.83\text{mm} \times 1.4\text{mm}$ και ύψους 120mm . Για να επιτευχθεί η στιβαρότητα και η αλληλεπίδραση των σωλήνων μεταξύ τους, οι σωλήνες συγκολλήθηκαν σε δυο λεπτές πλάκες του ίδιου υλικού, με διαστάσεις $160\text{mm} \times 160\text{mm} \times 3\text{mm}$ (πάνω πλάκα) και $246.8\text{mm} \times 246.8\text{mm} \times 3\text{mm}$ (κάτω πλάκα). Παρακάτω παρουσιάζεται η διάταξη όπως κατασκευαστική για το πείραμα καθώς και μοντελοποιημένη.



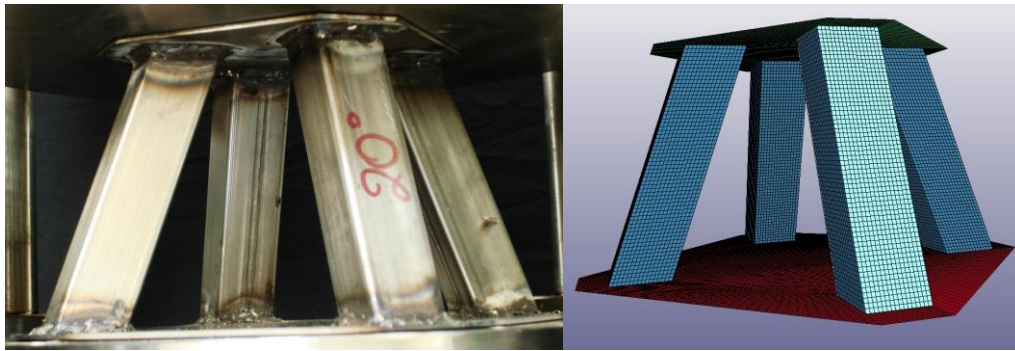
Σχήμα 4.37: Παρουσίαση πλήρους διάταξης, όπως κατασκευάστηκε για το πείραμα καθώς και όπως προσομοιώνεται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA.

Η βασική διαφορά που παρουσιάζει η διάταξη είναι η τοποθέτηση των όλων των σωλήνων υπό γωνία 20° , αλλάζοντας έτσι τις συνολικές διαστάσεις της διάταξης. Κατά τη διαδικασία της αξονικής θλίψης στο εργαστήριο, ελήφθησαν συνολικά 17 στιγμιότυπα, τα οποία θα παρουσιαστούν στη συνέχεια. Πολύ χρήσιμος θα μας είναι ο παρακάτω Πίνακας 4.8, στον οποίο θα αντιστοιχίσουμε κάθε στιγμιότυπο του πειράματος με την βράχυνση της διάταξης.

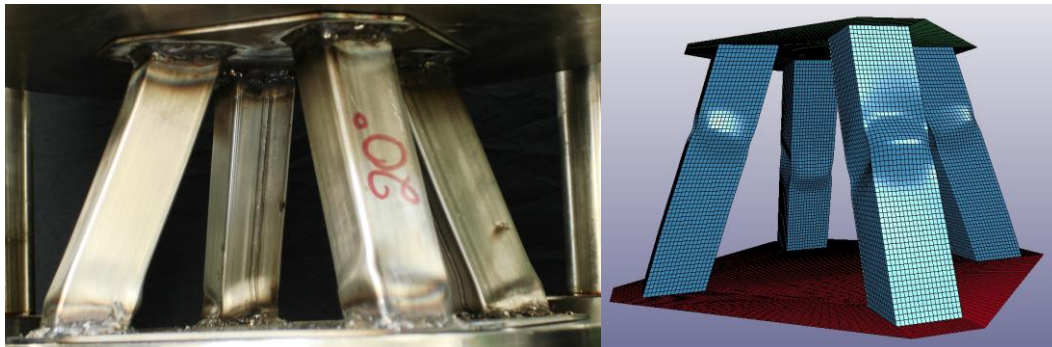
<u>Στιγμιότυπο</u>	<u>Βράχυνση δοκιμίου (μετατόπιση του εμβόλου) (mm)</u>
1	0
2	4.7
3	6.9
4	11.3
5	16.2
6	22
7	28.3
8	35
9	40
10	45
11	51
12	56.3
13	61.6
14	67.6
15	72.7
16	76
17	80

Πίνακας 4.8: Παρουσίαση των στιγμιότυπων που ελήφθησαν κατά τη διαδικασία κατάρρευσης της διάταξης.

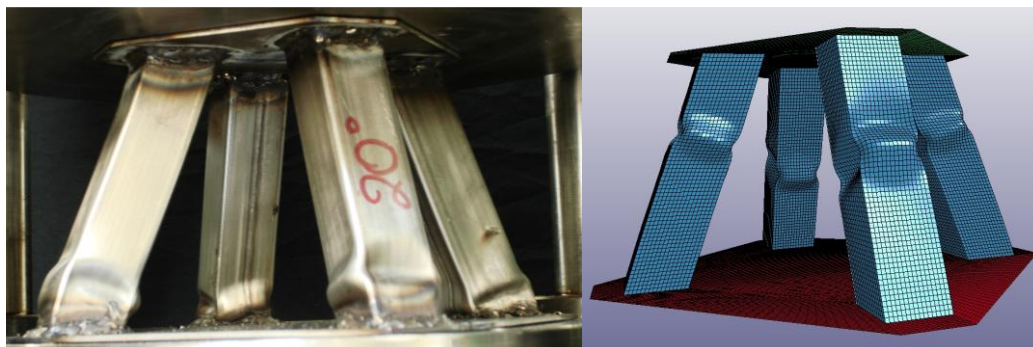
Παρακάτω αποτυπώνονται τα 17 στιγμιότυπα του παραπάνω πίνακα κατά την κατάρρευση της διάταξης του πειράματος και της προσομοίωσης, για τα οποία έγινε λόγος στον παραπάνω πίνακα.



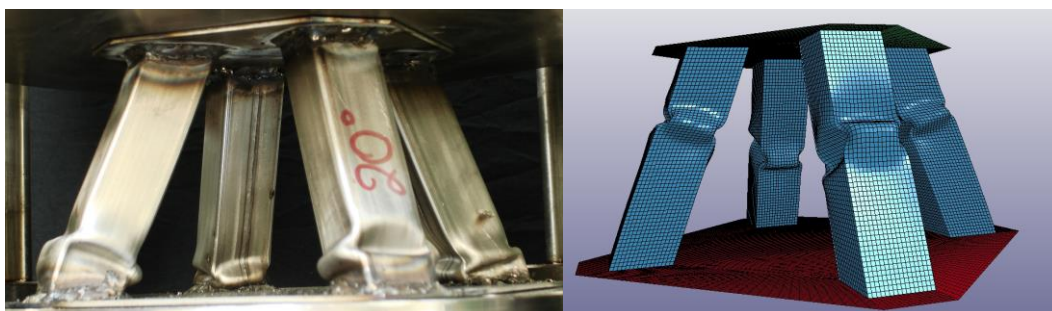
Στιγμιότυπο 1



Στιγμιότυπο 2

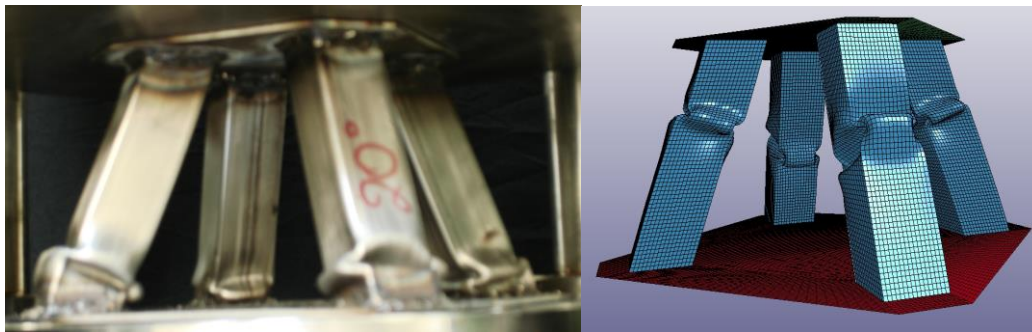


Στιγμιότυπο 3

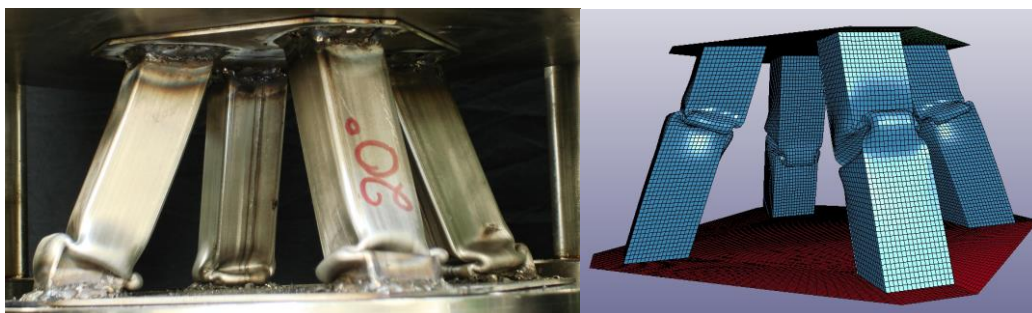


Στιγμιότυπο 4

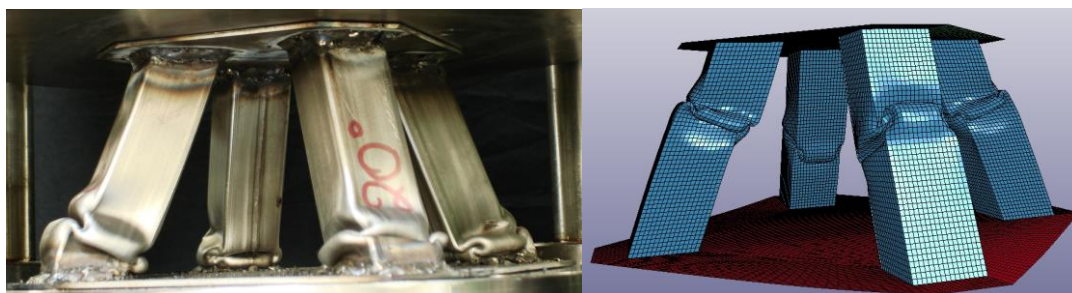
Σχήμα 4.38: Στιγμιότυπα της διάταξης από την πειραματική διαδικασία, και αντιστοίχισή τους με στιγμιότυπα (frames) από την προσομοίωση στον υπολογιστή



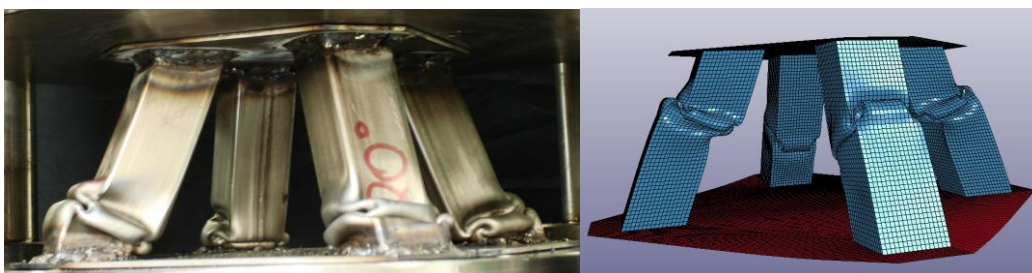
Στιγμιότυπο 5



Στιγμιότυπο 6

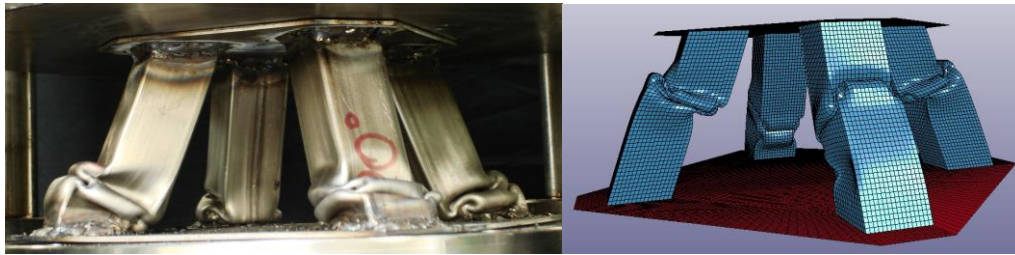


Στιγμιότυπο 7

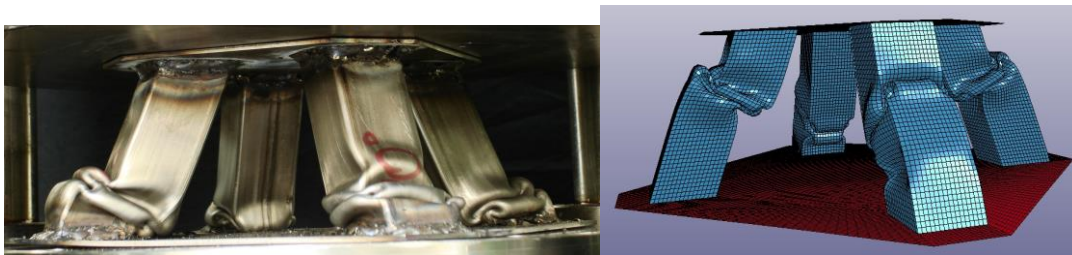


Στιγμιότυπο 8

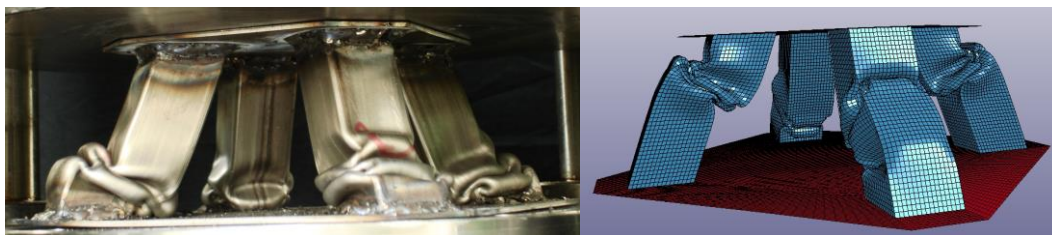
Σχήμα 4.38.1 : Στιγμιότυπα της διάταξης από την πειραματική διαδικασία, και αντιστοίχισή τους με στιγμιότυπα (frames) από την προσομοίωση στον υπολογιστή



Στιγμιότυπο 9



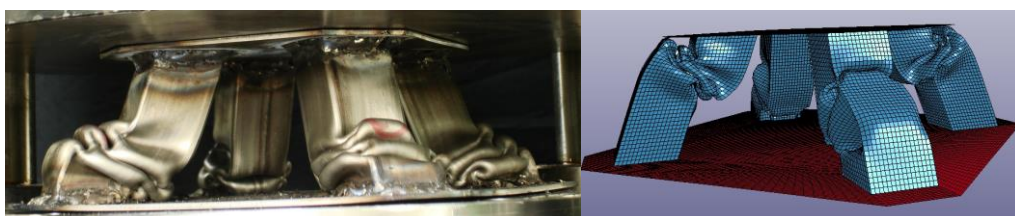
Στιγμιότυπο 10



Στιγμιότυπο 11

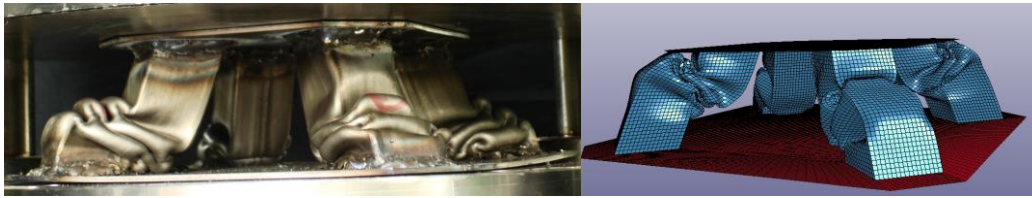


Στιγμιότυπο 12



Στιγμιότυπο 13

Σχήμα 4.38.2: Στιγμιότυπα της διάταξης από την πειραματική διαδικασία, και αντιστοίχισή τους με στιγμιότυπα (frames) από την προσομοίωση στον υπολογιστή



Στιγμιότυπο 14



Στιγμιότυπο 15



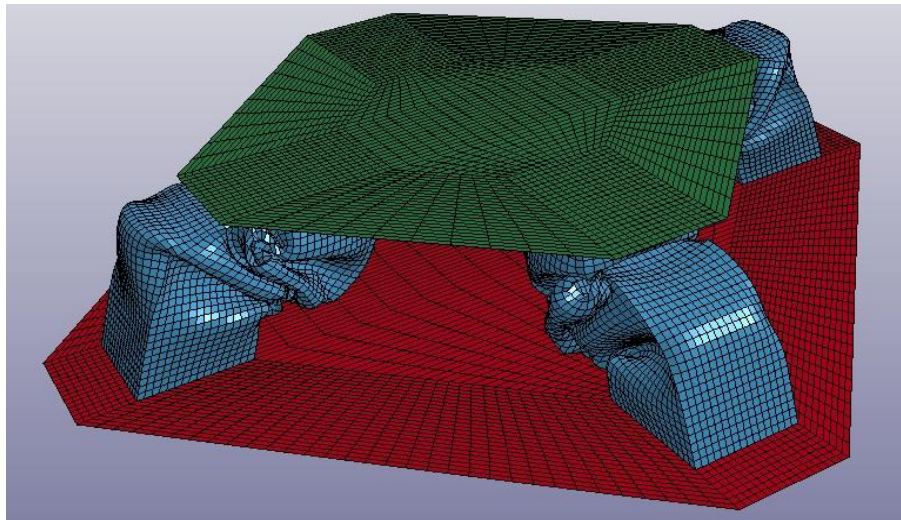
Στιγμιότυπο 16



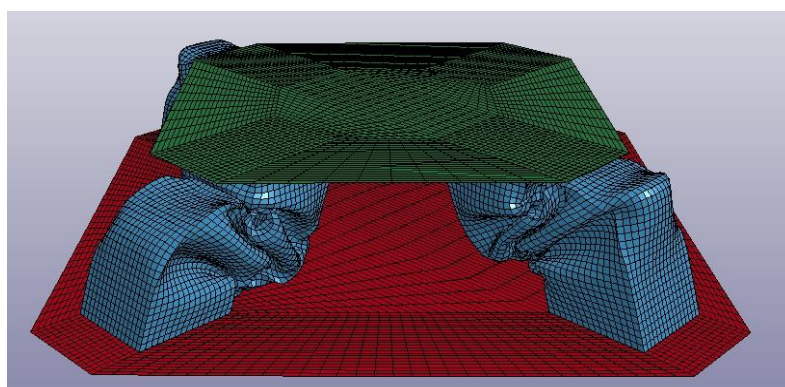
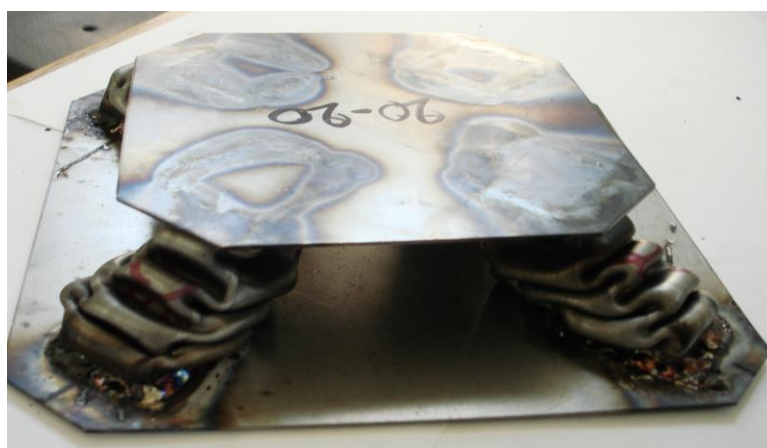
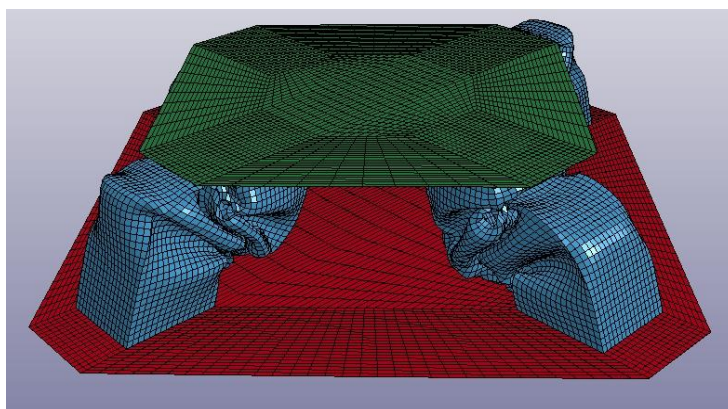
Στιγμιότυπο 17

Σχήμα 4.38.3 : Στιγμιότυπα της διάταξης από την πειραματική διαδικασία, και αντιστοίχισή τους με στιγμιότυπα (frames) από την προσομοίωση στον υπολογιστή

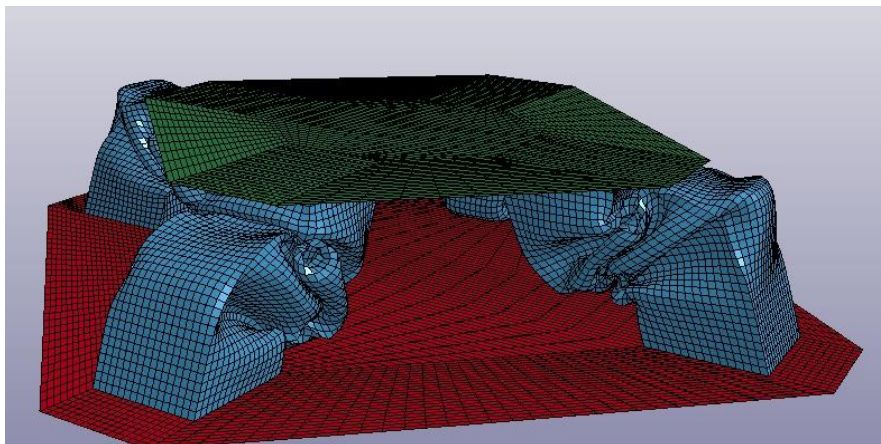
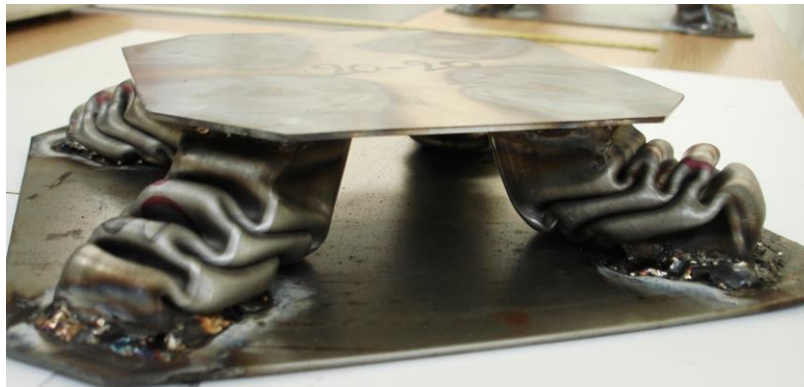
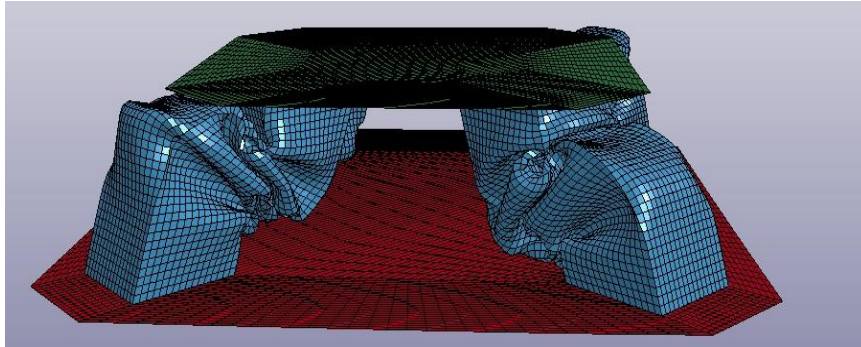
Παρακάτω παρουσιάζεται η διάταξη μετά το πέρας του πειράματος, δηλαδή στην τελική μορφή του και συγκρίνεται με αυτό που προκύπτει από την μοντελοποίηση στο LS-DYNA.



Σχήμα 4.39: Αντιστοιχία όψεων της τελικής μορφής της διάταξης, όπως προκύπτει από την πειραματική διαδικασία και την προσομοίωση.

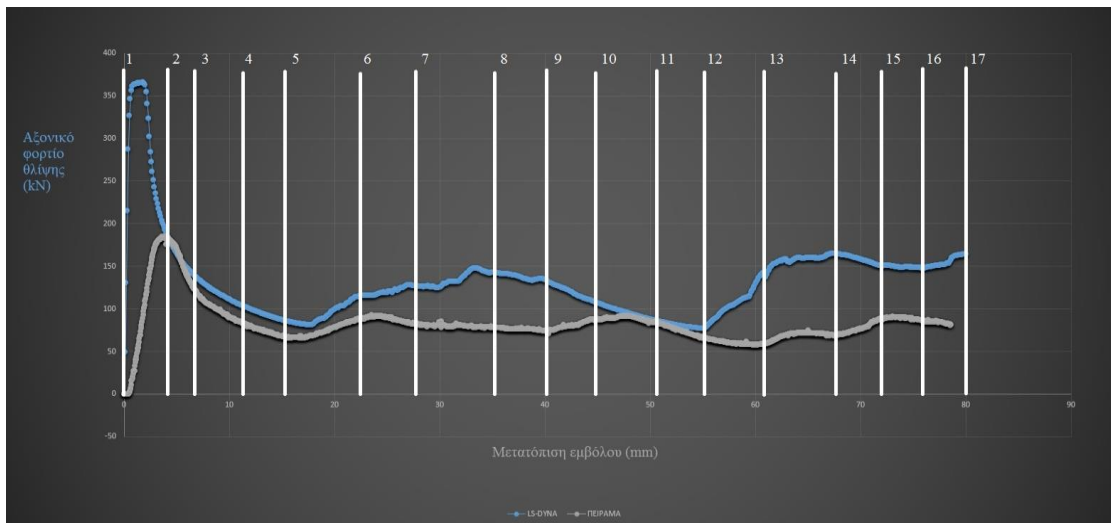


Σχήμα 4.40: Αντιστοιχία όψεων της τελικής μορφής της διάταξης, όπως προκύπτει από την πειραματική διαδικασία και την προσομοίωση.



Σχήμα 4.41: Αντιστοιχία όψεων της τελικής μορφής της διάταξης, όπως προκύπτει από την πειραματική διαδικασία και την προσομοίωση.

Απεικόνιση της μεταβολής του φορτίου συναρτήσει της βράχυνσης της διάταξης, μετά την επεξεργασία των τιμών που κατέγραψε το πρόγραμμα LabVIEW 8.6



Σχήμα 4.42: Σύγκριση διαγραμμάτων αξονικού φορτίου - μετατόπισης εμβόλου. Με γκρι χρώμα παριστάνεται η πειραματική καμπύλη, με μπλε αυτή που προκύπτει από την προσομοίωση στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Οι αριθμοί 1 έως 17 αντιστοιχούν στα στιγμιότυπα που έχουν ληφθεί κατά το πείραμα.

Υπολογισμός Μέγιστου και Μέσου φορτίου, Ποσοστιαίων διαφορών θεωρητικών και πειραματικών φορτίων, ομοιομορφία φορτίου καθώς και συνολικής ενέργειας που δαπανήθηκε.

- ο Μέγιστο φορτίο διάταξης από πείραμα: **184.35 kN**
- ο Μέγιστο φορτίο διάταξης από προσομοίωση: **365.352 kN**
- ο Ποσοστιαία διαφορά μέγιστου θεωρητικού φορτίου σε σχέση με το
- ο πειραματικό: **0.98 ή 98%**
- ο Μέσο φορτίο μονού δοκιμίου από πείραμα: **83.206 kN**
- ο Μέσο φορτίο μονού δοκιμίου από προσομοίωση: **131.842 kN**
- ο Ποσοστιαία διαφορά μέσου πειραματικού φορτίου σε σχέση με το θεωρητικό: **0.58 ή 58%**

Η ομοιομορφία φορτίου, δηλαδή ο λόγος του μέγιστου φορτίου προς το μέσο, δίνεται παρακάτω και για τις δύο περιπτώσεις:

- ο Για την πειραματική διάταξη: **2.21**
- ο Για το θεωρητικό μοντέλο: **2.77**

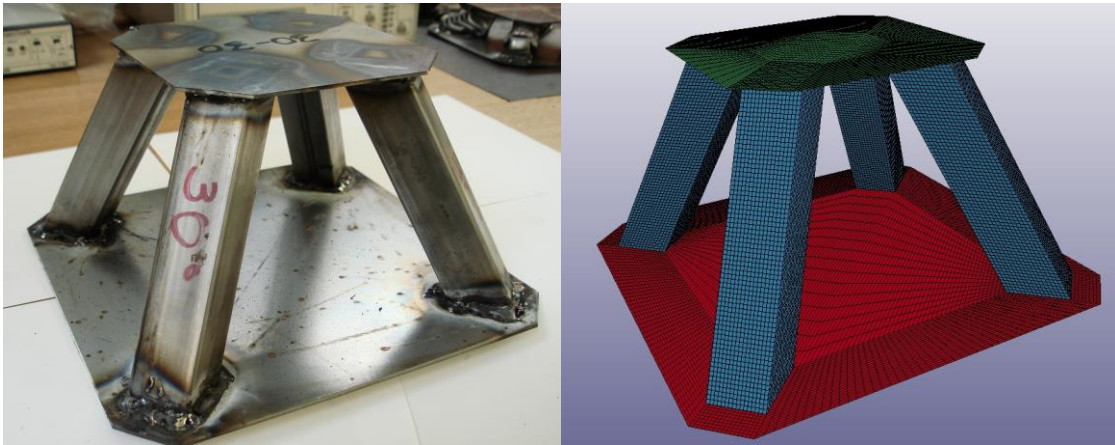
Χωρίς βλάβη της γενικότητας, μπορούμε να πολλαπλασιάσουμε τις παραπάνω τιμές του μέσου φορτίου με τη συνολική μετατόπιση του εμβόλου, προκειμένου να βρούμε τη συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε κατά την αξονική κατάρρευση. Τόσο στο πειραματικό όσο και στο θεωρητικό μοντέλο η μετατόπιση του εμβόλου είναι ίση με 80 mm. Υπενθυμίζουμε εδώ ότι ο πολλαπλασιασμός του φορτίου σε kN με τη μετατόπιση σε mm θα μας δώσει την ενέργεια σε Joule (J).

- ο Για την πειραματική διάταξη: 6656,48 J

- Για το θεωρητικό μοντέλο: 10547,36 J

4.10. Πείραμα και προσομοίωση για την διάταξη τεσσάρων σωλήνων τοποθετημένων υπό γωνίες 30° και 30° (8).

Η διάταξη αυτή αποτελείται από τέσσερεις ορθογωνικής διατομής σωλήνες, διαστάσεων 34.42mm x 34.42mm x 1.4mm και ύψους 120mm. Για να επιτευχθεί η στιβαρότητα και η αλληλεπίδραση των σωλήνων μεταξύ τους, οι σωλήνες συγκολλήθηκαν σε δυο λεπτές πλάκες του ιδίου υλικού, με διαστάσεις 160mm x 160mm x 3mm(πάνω πλάκα) και 303.18mm x 303.18mm x 3mm(κάτω πλάκα).Παρακάτω παρουσιάζεται η διάταξη όπως κατασκευαστική για το πείραμα καθώς και μοντελοποιημένη.



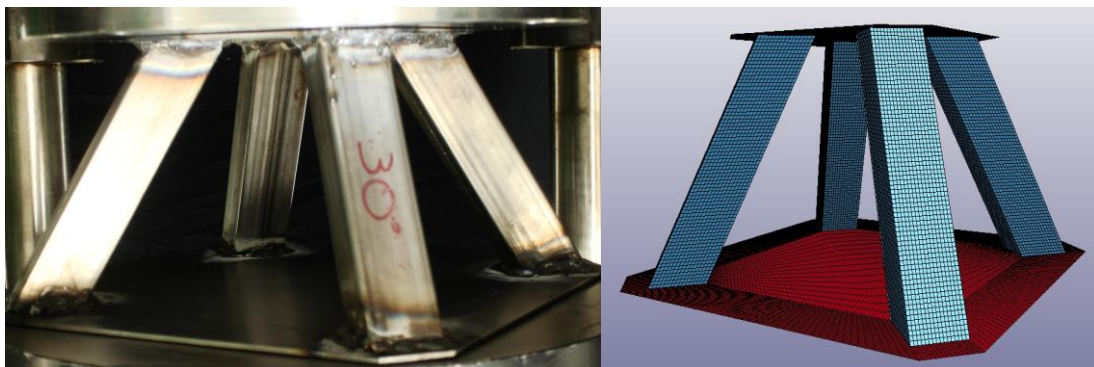
Σχήμα 4.43: Παρουσίαση πλήρους διάταξης, όπως κατασκευάστηκε για το πείραμα καθώς και όπως προσομοιώνεται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA.

Η βασική διαφορά που παρουσιάζει η διάταξη είναι η τοποθέτηση των όλων των σωλήνων υπό γωνία 30° , αλλάζοντας έτσι τις συνολικές διαστάσεις της διάταξης. Κατά τη διαδικασία της αξονικής θλίψης στο εργαστήριο, ελήφθησαν συνολικά 14 στιγμιότυπα, τα οποία θα παρουσιαστούν στη συνέχεια. Πολύ χρήσιμος θα μας είναι ο παρακάτω Πίνακας 4.9, στον οποίο θα αντιστοιχίσουμε κάθε στιγμιότυπο του πειράματος με την βράχυνση της διάταξης.

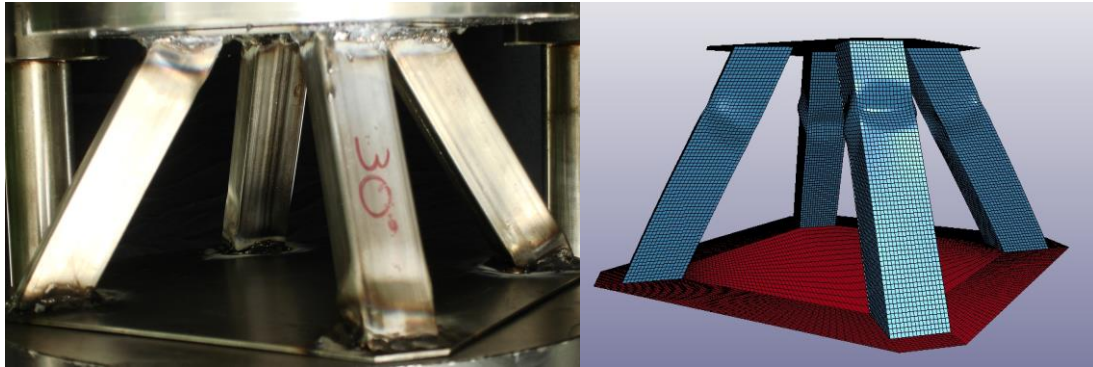
<u>Στιγμιότυπο</u>	<u>Βράχυνση δοκιμίου (μετατόπιση του εμβόλου) (mm)</u>
1	0
2	5
3	9.1
4	13
5	18.1
6	25.1
7	32.1
8	38.6
9	46.9
10	55.1
11	64.2
12	70.1
13	75
14	80

Πίνακας 4.9: Παρουσίαση των στιγμιότυπων που ελήφθησαν κατά τη διαδικασία κατάρρευσης της διάταξης.

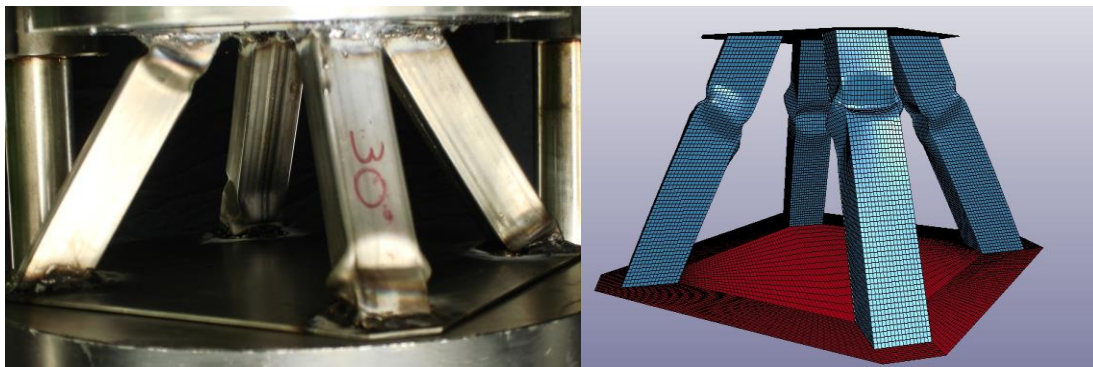
Παρακάτω αποτυπώνονται τα 14 στιγμιότυπα του παραπάνω πίνακα κατά την κατάρρευση της διάταξης του πειράματος και της προσομοίωσης, για τα οποία έγινε λόγος στον παραπάνω πίνακα.



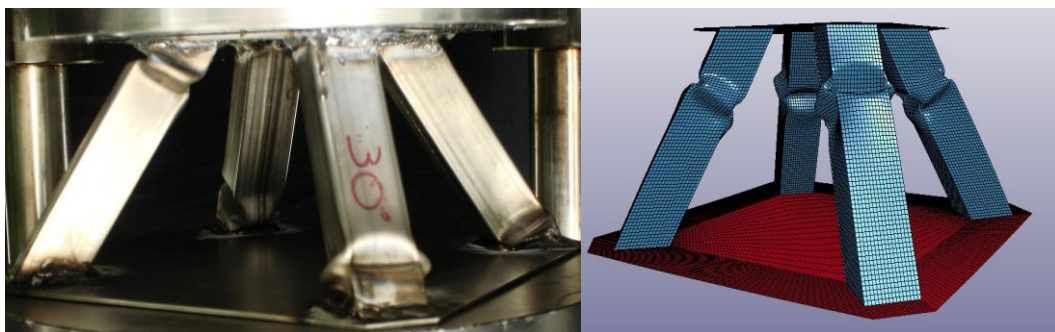
Στιγμιότυπο 1



Στιγμιότυπο 2

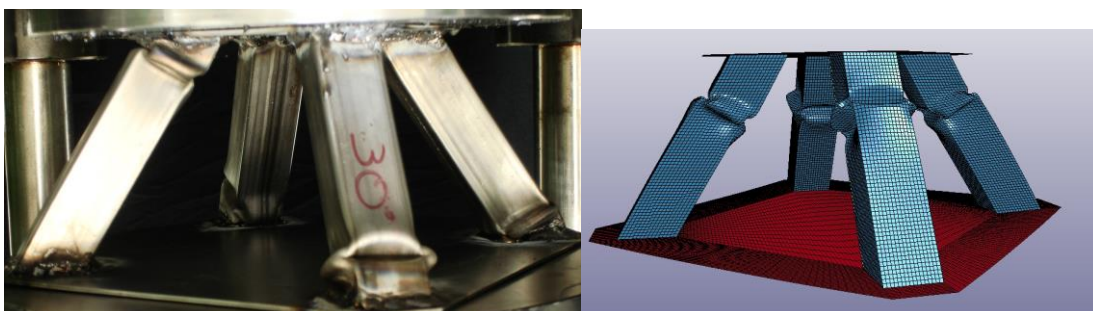


Στιγμιότυπο 3

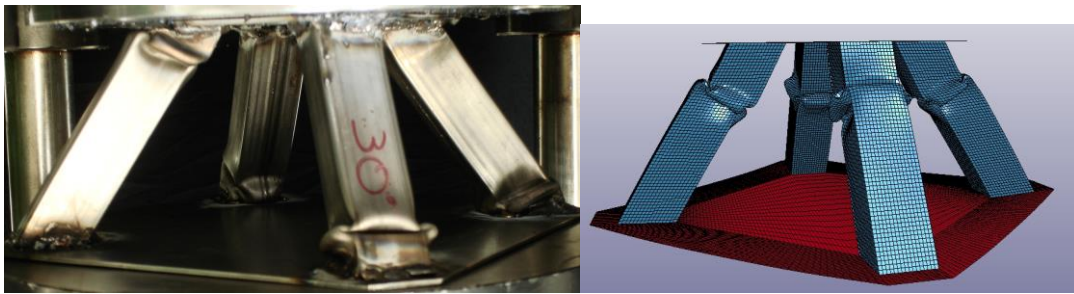


Στιγμιότυπο 4

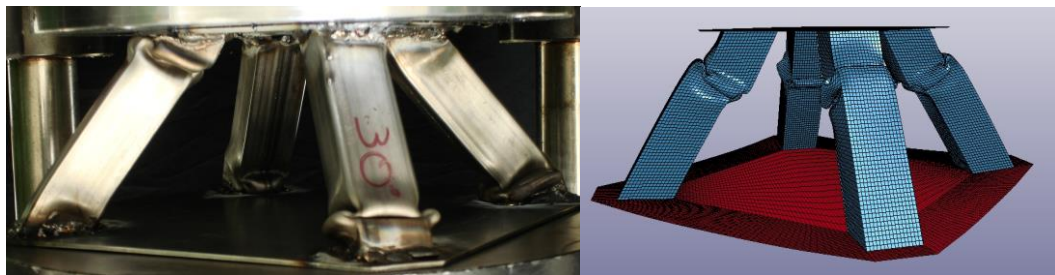
Σχήμα 4.44: Στιγμιότυπα της διάταξης από την πειραματική διαδικασία, και αντιστοίχισή τους με στιγμιότυπα (frames) από την προσομοίωση στον υπολογιστή



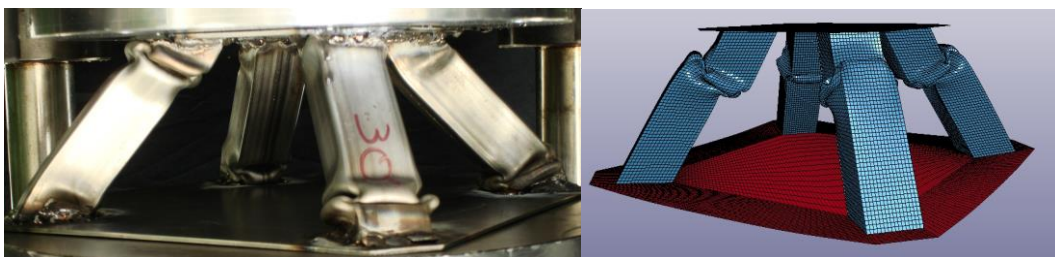
Στιγμιότυπο 5



Στιγμιότυπο 6

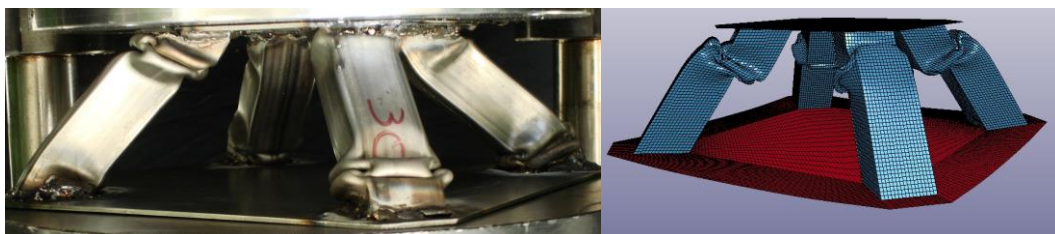


Στιγμιότυπο 7

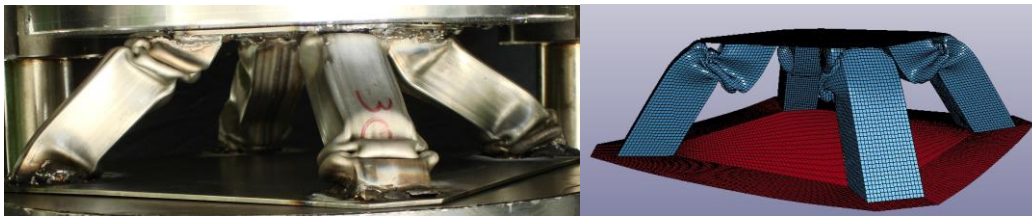


Στιγμιότυπο 8

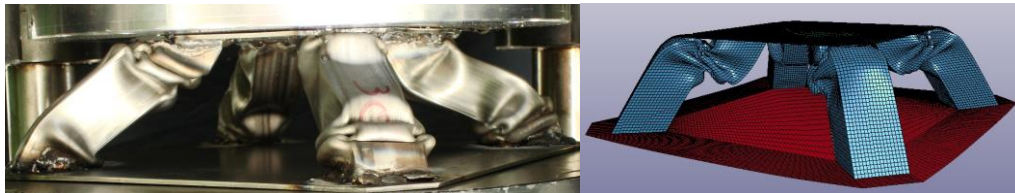
Σχήμα 4.44.1: Στιγμιότυπα της διάταξης από την πειραματική διαδικασία, και αντιστοίχησή τους με στιγμιότυπα (frames) από την προσομοίωση στον υπολογιστή



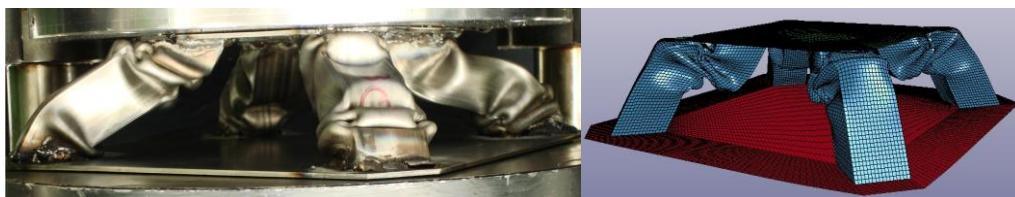
Στιγμιότυπο 9



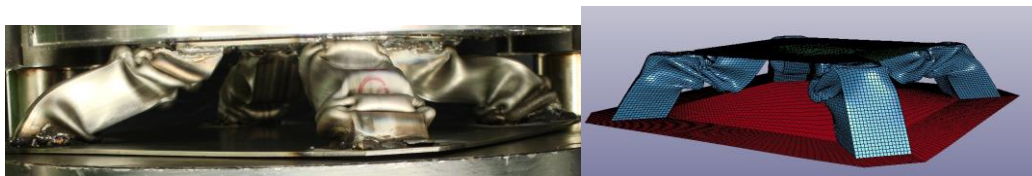
Στιγμιότυπο 10



Στιγμιότυπο 11



Στιγμιότυπο 12



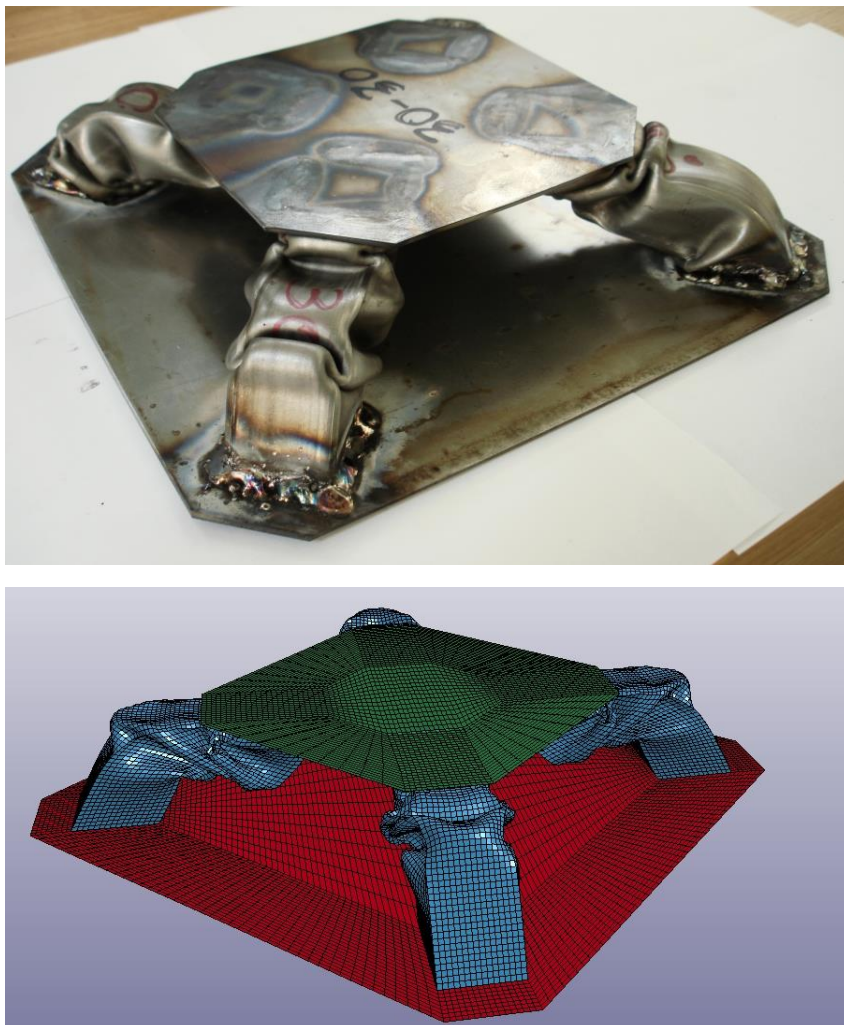
Στιγμιότυπο 13



Στιγμιότυπο 14

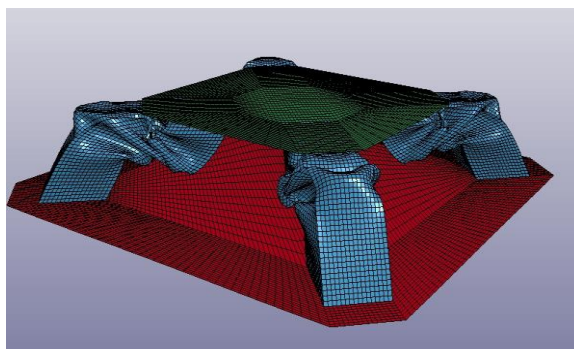
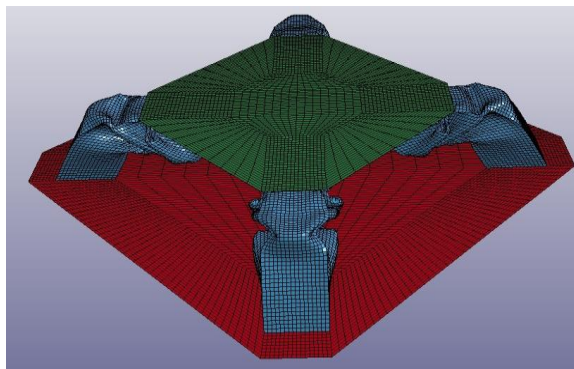
Σχήμα 4.44.2: Στιγμιότυπα της διάταξης από την πειραματική διαδικασία, και αντιστοίχισή τους με στιγμιότυπα (frames) από την προσομοίωση στον υπολογιστή

Παρακάτω παρουσιάζεται η διάταξη μετά το πέρας του πειράματος, δηλαδή στην τελική μορφή του και συγκρίνεται με αυτό που προκύπτει από την μοντελοποίηση στο LS-DYNA.

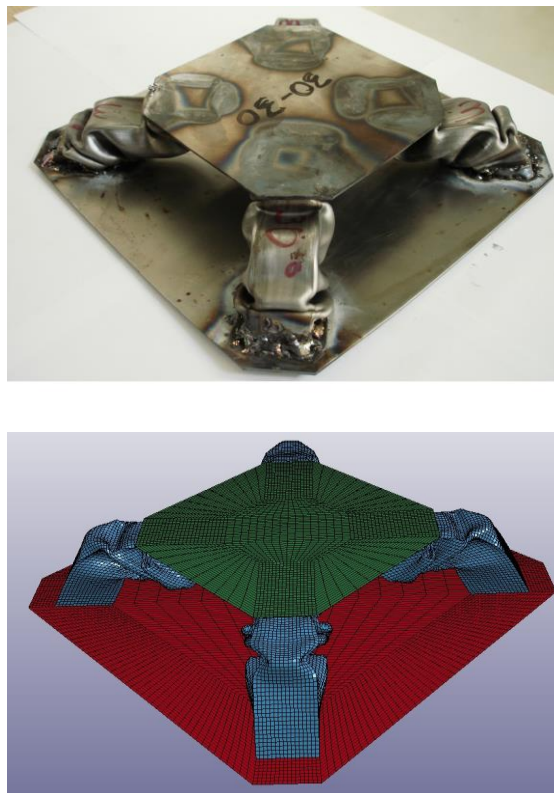


Σχήμα 4.45: Αντιστοιχία όψεων της τελικής μορφής της διάταξης, όπως προκύπτει από την πειραματική διαδικασία και την προσομοίωση.



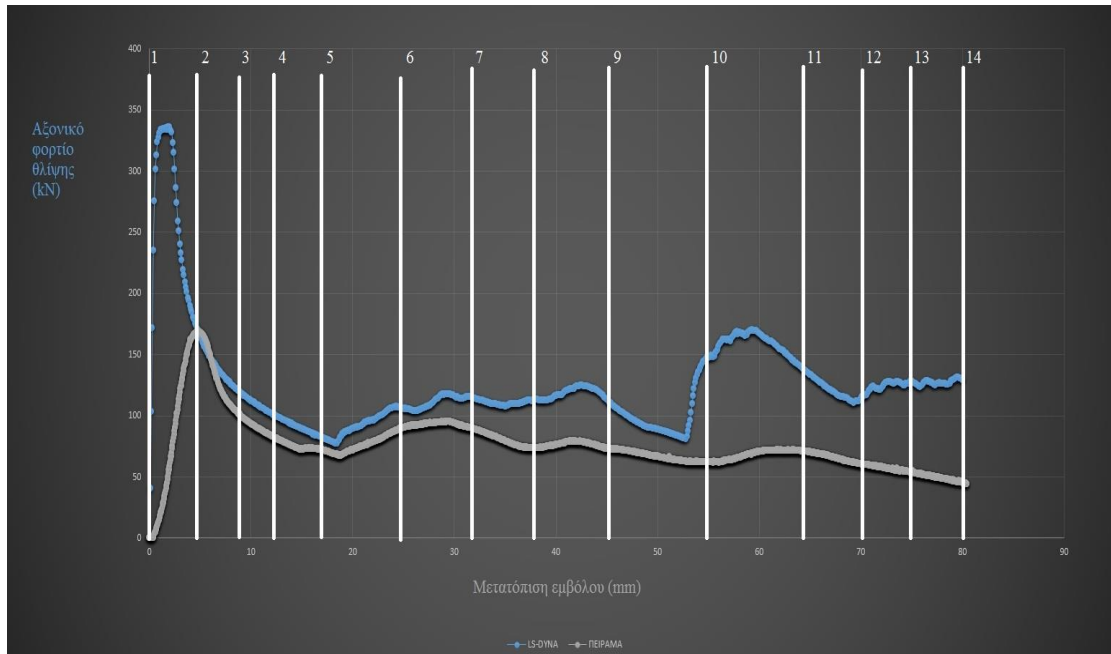


Σχήμα 4.46: Αντιστοιχία όψεων της τελικής μορφής της διάταξης, όπως προκύπτει από την πειραματική διαδικασία και την προσομοίωση.



Σχήμα 4.47: Αντιστοιχία όψεων της τελικής μορφής της διάταξης, όπως προκύπτει από την πειραματική διαδικασία και την προσομοίωση.

Απεικόνιση της μεταβολής του φορτίου συναρτήσει της βράχυνσης της διάταξης, μετά την επεξεργασία των τιμών που κατέγραψε το πρόγραμμα LabVIEW 8.6



Σχήμα 4.48: Σύγκριση διαγραμμάτων αξονικού φορτίου - μετατόπισης εμβόλου. Με γκρι χρώμα παριστάνεται η πειραματική καμπύλη, με μπλε αυτή που προκύπτει από την προσομοίωση στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Οι αριθμοί 1 έως 14 αντιστοιχούν στα στιγμιότυπα που έχουν ληφθεί κατά το πείραμα.

Υπολογισμός Μέγιστου και Μέσου φορτίου, Ποσοστιαίων διαφορών θεωρητικών και πειραματικών φορτίων, ομοιομορφία φορτίου καθώς και συνολικής ενέργειας που δαπανήθηκε.

- ο Μέγιστο φορτίο διάταξης από πείραμα: **165.787 kN**
- ο Μέγιστο φορτίο διάταξης από προσομοίωση: **335.9 kN**
- ο Ποσοστιαία διαφορά μέγιστου θεωρητικού φορτίου σε σχέση με το
- ο πειραματικό: **1.02 ή 102%**
- ο Μέσο φορτίο μονού δοκιμίου από πείραμα: **76.065 kN**
- ο Μέσο φορτίο μονού δοκιμίου από προσομοίωση: **125.303 kN**
- ο Ποσοστιαία διαφορά μέσου πειραματικού φορτίου σε σχέση με το θεωρητικό: **0.64 ή 64%**

Η ομοιομορφία φορτίου, δηλαδή ο λόγος του μέγιστου φορτίου προς το μέσο, δίνεται παρακάτω και για τις δύο περιπτώσεις:

- ο Για την πειραματική διάταξη: **2.17**
- ο Για το θεωρητικό μοντέλο: **2.68**

Χωρίς βλάβη της γενικότητας, μπορούμε να πολλαπλασιάσουμε τις παραπάνω τιμές του μέσου φορτίου με τη συνολική μετατόπιση του εμβόλου, προκειμένου να βρούμε τη συνολική ενέργεια που δαπανήθηκε κατά την αξονική κατάρρευση. Τόσο στο πειραματικό όσο και στο θεωρητικό μοντέλο η μετατόπιση του εμβόλου είναι ίση με 80 mm. Υπενθυμίζουμε εδώ ότι ο πολλαπλασιασμός του φορτίου σε kN με τη μετατόπιση σε mm θα μας δώσει την ενέργεια σε Joule (J).

- ο Για την πειραματική διάταξη: **6085.2 J**
- ο Για το θεωρητικό μοντέλο: **10024.24 J**

4.11. Σύγκριση μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών τιμών για το μέσο, μέγιστο φορτίο και ενέργειας που καταναλώθηκε. Σχόλια και συμπεράσματα.

Στις προηγούμενες Υποενότητες δώσαμε έμφαση τόσο στη σύγκριση των στιγμιотύπων που έχουν προκύψει από το πείραμα και τα μοντέλα προσομοίωσης, όσο και στην οπτική σύγκριση των πειραματικών και θεωρητικών διαγραμμάτων μεταξύ τους, παρατηρώντας δηλαδή την κίνηση των καμπύλων αξονικού φορτίου - μετατόπισης εμβόλου. Οι παραπάνω συγκρίσεις μας βοήθησαν να εξαγάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα για το μηχανισμό της δημιουργίας των λοβών, αλλά και για την αξιοπιστία κάθε υπολογιστικού μοντέλου ως προς την ικανότητα προσέγγισης της πειραματικής διαδικασίας κατάρρευσης.

Συγκεκριμένα παρατηρούμε πως γενικά σε όλες τις πειραματικές διατάξεις και στις αντίστοιχες μοντελοποιημένες έχουμε σταθερή πυκνότητα δημιουργίας λοβών. Αυτό πιθανότατα ωφελείται σε κάποιες σταθερές συνιστώσες που υπάρχουν ανά τις διατάξεις, όπως οι ιδιότητες του υλικού, το ύψος των διατάξεων και το συνολικό μήκος που διένυσε το έμβολο με σταθερή ταχύτητα. Σε όλες τις πειραματικές διατάξεις δημιουργούνται μη εκτατοί λοβοί ενώ στις αντίστοιχες μοντελοποιημένες εκτατοί κατά την πλειοψηφία. Ευθηνή για αυτό έχει ο τρόπος που βλέπει ο κώδικας τις διατάξεις. Κάθε διάταξη έχει ατέλειες που έχει αποκτήσει λόγο κατεργασιών των δοκιμίων που την απαρτίζουν π.χ. κάμψη, και συγκόλληση, που δεν είναι πάντα εφικτό να εισαχθούν στον κώδικα, με αποτέλεσμα ο κώδικας να αντιμετωπίζει τις διατάξεις ως κάτι ιδεατό και εξιδανικευμένο.

Αξίζει να αναφέρουμε πως σε δυο περιπτώσεις των πειραμάτων παρατηρούμε δημιουργία εκτατών λοβών. Και στις δυο περιπτώσεις οι λοβοί αυτοί είναι πρώτοι στη σειρά δημιουργίας και κοντά στην συγκόλληση με τις πλάκες στήριξης. Η δημιουργία τους δεν είναι προβλεπόμενη και ωφελείται στην τυχαία κατανομή των ιδιοτήτων του υλικού. Παρακάτω παρουσιάζονται οι δυο αυτές περιπτώσεις εκτατών λοβών, οι οποίοι ανήκουν στις διατάξεις 3 (0^0 - 10^0) και 3 (10^0 - 10^0).



Σχήμα 4.49: Παρουσίαση των εκτατών λοβών στις διατάξεις (3) και (6).

Αυτό που έχει μεγάλη σημασία να δούμε είναι η σύγκριση όλων των μέσων και μέγιστων φορτίων που προκύπτουν από τις καμπύλες πειράματος και προσομοίωσης. Επειδή οι διατάξεις που εξετάζουμε πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές μεταφορικών μέσων για την προστασία των επιβατών από ατυχήματα, θα πρέπει να γίνει επιλογή μίας τέτοιας διάταξης που θα εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή ασφάλεια των επιβατών αλλά και σταθερότητα της δομής μετά την κρούση.

Για τη σύγκριση μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών τιμών θα χρησιμοποιήσουμε ένα πίνακα. Ο Πίνακας 4.10. θα χρησιμοποιηθεί για τη σύγκριση των μέσων θλιπτικών φορτίων σε όλες τις διατάξεις και όλες τις περιπτώσεις μοντελοποίησης, καθώς και για τα μέγιστα φορτία.

Όσον αφορά το μέγιστο φορτίο βασική μας επιδίωξη είναι η όσο το δυνατό μεγαλύτερη μείωσή του. Όπως γνωρίζουμε, το μέγιστο φορτίο αντιστοιχεί στη δημιουργία του πρώτου λοβού. Η μείωση του φορτίου αυτού επιβάλλεται λόγω της χρήσης των διατάξεων σε οχήματα, με σκοπό την απορρόφηση ενέργειας σε στατικές αλλά και δυναμικές καταπονήσεις, χωρίς να δέχονται οι επιβάτες αυτή την ενέργεια. Κατά την κρούση ενός μεταφορικού μέσου με κάποιο εμπόδιο, ένα μέρος της ενέργειας κρούσης απορροφάται από τις διατάξεις, ενώ η υπόλοιπη ενέργεια περνά στους επιβάτες. Επομένως, για την προστασία από ατυχήματα, απαιτείται οι επιβάτες να δέχονται την ελάχιστη δυνατή ενέργεια, και οι διατάξεις τη μέγιστη δυνατή. Οι δείκτες ομοιομορφίας, για τον παραπάνω λόγο θέλουμε να τείνουν στη μονάδα (είναι ο λόγος του μέγιστου προς το μέσο φορτίο). Στη παρούσα εργασία είναι όλοι κοντά στο δυο και για να καταφέρουμε να φέρουμε το αποτέλεσμα αυτό κοντά στο επιθυμητό θα μπορούσαμε να το κάνουμε με κάποια διαμόρφωση στα άκρα των δοκιμίων όπως συνηθίζεται. Για το μέσο φορτίο, η βασική μας επιδίωξη είναι η κατά το δυνατό μεγιστοποίησή του. Όπως είδαμε και προηγουμένως, το μέσο φορτίο κατάρρευσης είναι ενδεικτικό της ενέργειας απορρόφησης, καθώς η ενέργεια απορρόφησης αποτελεί το γινόμενο του μέσου φορτίου επί τη συνολική μετατόπιση του

E.N.NOTAPAS-IOYΛΙΟΣ 2015

εμβόλου καθώς η διάταξη θλιβόταν στην υδραυλική πρέσα. Προκειμένου λοιπόν οι διατάξεις να είναι αποτελεσματικές, ζητάμε από αυτές να παρουσιάζουν τη μέγιστη δυνατή ενέργεια απορρόφησης, άρα και τη μέγιστη δυνατή τιμή για το μέσο φορτίο θλίψης.

Διάταξη	Μέγιστο φορτίο Πείραμα –Μοντέλο (kN)		Μέσο φορτίο Πείραμα – Μοντέλο (kN)		Απορροφούμενη Ενέργεια Πείραμα –Μοντέλο (J)	
1	58.37	97.25	21.15	42.11	1692.4	3369.1
2	225.87	391.06	107.59	181.33	8607.9	14507.1
3	220.30	385.37	103.85	160.30	8308.1	12824
4	208.99	377.40	95.36	155.35	7628.8	12428
5	168.04	361.73	85.25	140.05	6820.72	11204.2
6	201.80	384.08	94.53	154.39	7562.8	12351.3
7	184.35	365.35	83.20	131.84	6656.4	10547.3
8	165.78	355.9	76.06	125.30	6085.2	10024.2

Πίνακας 4.10: Μέγιστο φορτίο, Μέσο φορτίο και ενέργεια που καταναλώθηκε για κάθε διάταξη (πείραμα και μοντέλο).

Τέλος η υποβάθμιση του φορτίου, η οποία φαίνεται ως ποσοστιαία διαφορά θεωρητικού φορτίου σε σχέση με το πειραματικό, σε κάποιες περιπτώσεις ξεπερνά το 100%. Αυτό οφείλεται στο ότι τα δοκίμια που αποτελούν τις διατάξεις μας έχουν ατέλειες, οι οποίες όπως έχουμε προαναφέρει δεν τις βλέπει ο κώδικας. Οι ατέλειες αυτές οφείλονται σε κατεργασίες που είχε υποστεί ο κάθε σωλήνας ώστε να φτάσει στη τελική μορφή (κοπή, συγκόλληση κτλ.).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

5.1. Εισαγωγικά στοιχεία.

Οι συγκρίσεις μεταξύ των πειραματικών δοκιμών αποσκοπεί στη μελέτη της επίδρασης της γωνίας τοποθέτησης των σωλήνων (0° 10° 20° 30° , ως προς τον κατακόρυφο άξονα). Ο παραπάνω παράγοντας, σε συνδυασμό με τη γεωμετρία και την ύπαρξη ατελειών και ανισοτροπιών στον κάθε σωλήνα, επηρεάζουν τους μηχανισμούς κατάρρευσης και την ενέργεια απορρόφησης. Η σύγκριση των μηχανισμών κατάρρευσης πραγματοποιείται οπτικά, με βάση τα στιγμιότυπα που έχουν ληφθεί κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα στιγμιότυπα δεν έχουν ληφθεί σε αντίστοιχες χρονικές στιγμές από διάταξη σε διάταξη. Κάτι τέτοιο, ούτως ή άλλως, δε θα ήταν εφικτό, διότι τα πειράματα διεξάγονται ξεχωριστά το ένα από το άλλο και όχι παράλληλα. Επίσης, κατά τη διαδικασία κατάρρευσης δεν έγινε λήψη του ίδιου αριθμού στιγμιότυπων από διάταξη σε διάταξη. Στα πλαίσια της ανάλυσής μας, θα παραθέσουμε όλα τα στιγμιότυπα από την κατάρρευση κάθε μίας από τις διατάξεις που πρόκειται να συγκριθούν, προκειμένου να εξαχθούν τα κατάλληλα οπτικά συμπεράσματα. Βέβαια, αυτό που έχει σημασία είναι ο μηχανισμός κατάρρευσης, ο οποίος αποδίδεται μέσα από τα στιγμιότυπα κάθε πειράματος, και όχι η ποσοτική βράχυνση των σωλήνων, με αποτέλεσμα να μην είναι αναγκαία η λήψη στιγμιότυπων ακριβώς στις ίδιες χρονικές στιγμές.

Ο έλεγχος της ενέργειας απορρόφησης θα γίνει με βάση το μέσο φορτίο που προκύπτει από τα διαγράμματα, καθώς η ενέργεια απορρόφησης, όπως αναφέρθηκε μπορεί να υπολογιστεί με τον πολλαπλασιασμό του μέσου φορτίου θλίψης επί τη συνολική μετατόπιση του εμβόλου, η οποία είναι σταθερή από πείραμα σε πείραμα και ίση με 80 mm. Για να γίνει εφικτή η σύγκριση, θα χρειαστεί να ομαδοποιήσουμε τα δοκίμια ώστε να εξαχθούν τα απαραίτητα συμπεράσματα.

Είναι επίσης απαραίτητο να χρησιμοποιήσουμε μία καμπύλη αναφοράς για να κάνουμε μία ικανοποιητική σύγκριση. Η καμπύλη αυτή θα περιλαμβάνει τις τιμές κάθε Sample (από το πρόγραμμα LabVIEW 8.6., που είναι συνδεδεμένο με την υδραυλική πρέσα). Ακολουθεί η παρουσίαση των τελικών στιγμιότυπων όλων των διατάξεων και η σύγκριση τους.

5.2. Παρουσίαση των τελικών στιγμιότυπων των διατάξεων (2),(3),(4),(5),(6)(7),(8).

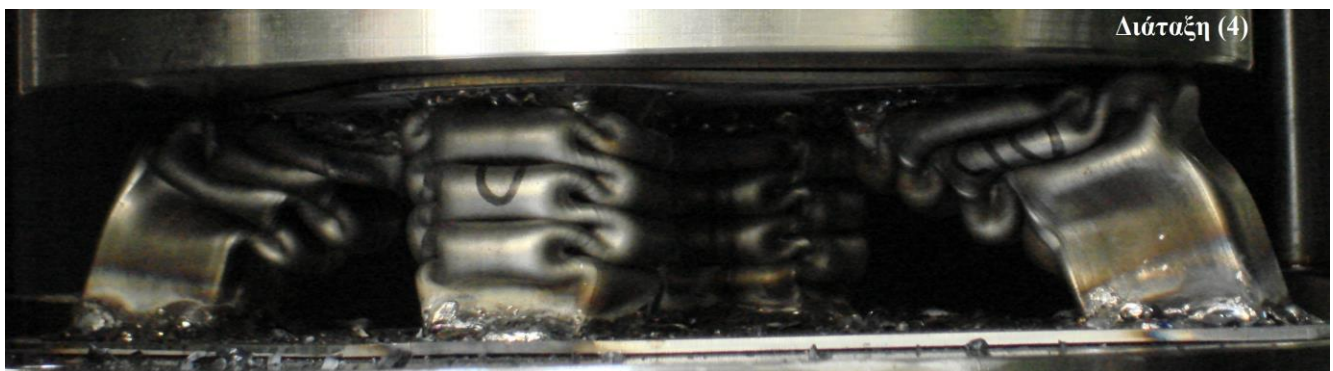
Στο παρακάτω σχήμα εμφανίζονται κατά σειρά όλα τα τελικά στιγμιότυπα από την κατάρρευση των διατάξεων (2-3-4-5-6-7-8), προκειμένου να γίνουν οι απαραίτητες οπτικές συγκρίσεις. Σαν λύση δεν ενδείκνυται η παράλληλη παράθεση στιγμιότυπων μεταξύ των διατάξεων, τόσο επειδή ο αριθμός στιγμιότυπων που ελήφθησαν είναι διαφορετικός από διάταξη σε διάταξη, όσο και επειδή το κάθε στιγμιότυπο δεν αντιστοιχεί σε ίδια μετατόπιση εμβόλου για την κάθε διάταξη για αυτόν τον λόγο γίνεται σύγκριση των τελικών στιγμιότυπων αφού φανερώνουν ολόκληρο τον τρόπο κατάρρευσης.



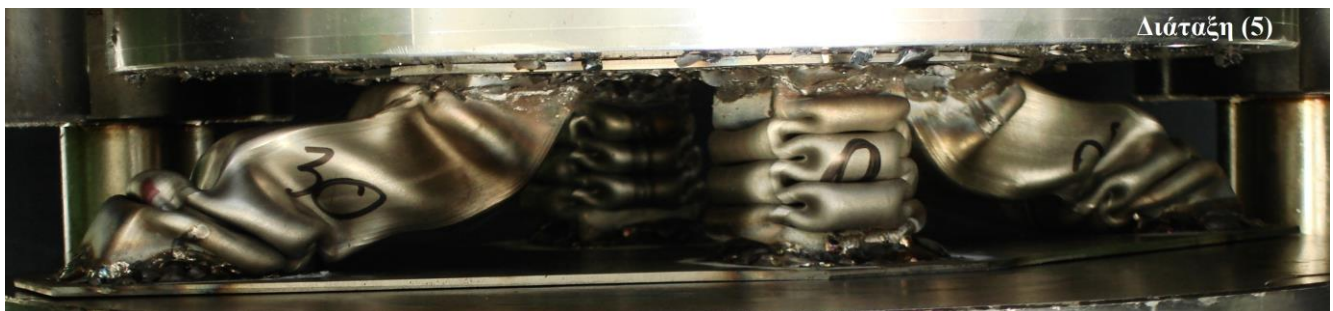


Διάταξη (3)

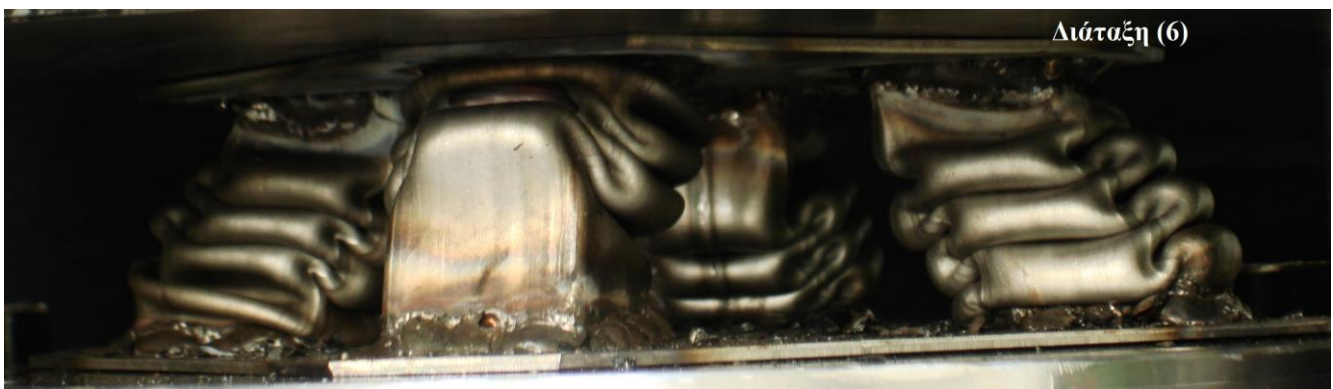
Σχήμα 5.1 : Τελικά στιγμιότυπα των διατάξεων από την πειραματική διαδικασία (2-3-4-5-6-7-8).



Διάταξη (4)



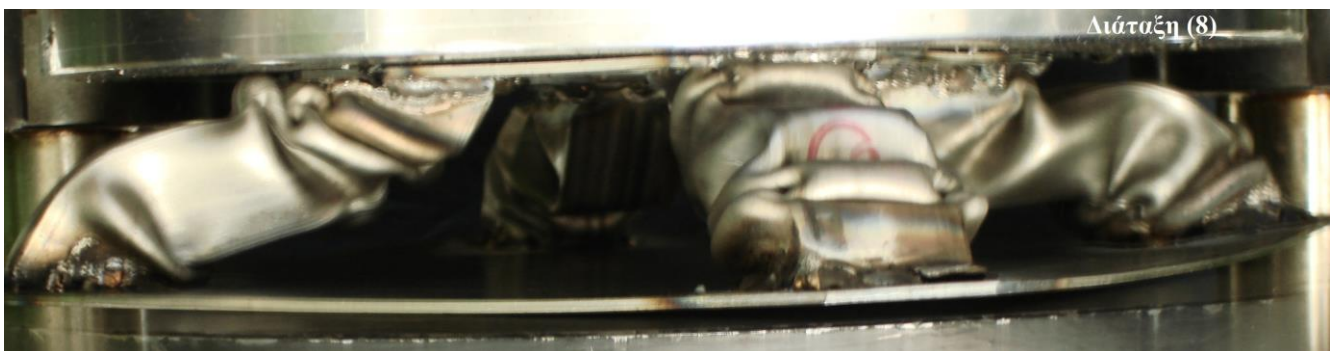
Διάταξη (5)



Διάταξη (6)



Σχήμα 5.2: Τελικά στιγμιότυπα των διατάξεων από την πειραματική διαδικασία (2-3-4-5-6-7-8).



Σχήμα 5.3 : Τελικά στιγμιότυπα των διατάξεων από την πειραματική διαδικασία (2-3-4-5-6-7-8).

Η πρώτη εμφανής διαπίστωση από το παραπάνω σχήμα είναι ότι η ύπαρξη γωνίας τοποθέτησης ως προς τον κατακόρυφο άξονα επηρεάζει τον αριθμό και την πυκνότητα των λοβών. Παρατηρούμε πως όσο η γωνία αυξάνει τόσο δυσκολότερα διακρίνονται οι σχηματισμένοι λοβοί. Επίσης όσο πιο μικρή είναι η γωνία τοποθέτησης τόσο μεγαλώνει ο αριθμός των λοβών, πράγμα το οποίο μαρτυρά πως η απορρόφηση της ενέργειας γίνεται πιο ομαλά και στο βάθος του χρόνου της διαδικασίας. Παρακάτω παρουσιάζονται και άλλες φωτογραφίες για αναλυτικότερη οπτική σύγκριση των διατάξεων.



Σχήμα 5.4: Τελικό στιγμιότυπο της διάταξης (2).



Σχήμα 5.5: Τελικό στιγμιότυπο της διάταξης (3).



Σχήμα 5.6: Τελικό στιγμιότυπο της διάταξης (4).



Σχήμα 5.7: Τελικό στιγμιότυπο της διάταξης (5).



Σχήμα 5.7: Τελικό στιγμιότυπο της διάταξης (6).



Σχήμα 5.8: Τελικό στιγμιότυπο της διάταξης (7).



Σχήμα 5.9: Τελικό στιγμιότυπο της διάταξης (8).

5.3. Παρουσίαση και σύγκρισή των φορτίων και της ενέργειας απορρόφησης των διατάξεων (2-3-4-5-6-7-8).

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει παρουσίαση των μέγιστων και μέσων φορτίων των διατάξεων καθώς και της ενέργειας απορρόφησης τους. Στη συνέχεια θα γίνει η παράθεση ενός διαγράμματος που θα παρουσιάζει το μέσο φορτίο κάθε διάταξης σε σχέση με την μετατόπιση του εμβόλου. Σκοπός και στόχος σε όλες αυτές της εφαρμογές είναι η διατήρηση σε υψηλά επίπεδα του μέσου φορτίου των διατάξεων, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την μεγάλη απορρόφηση ενέργειας. Αυτός ο παράγοντας θα είναι που θα μας απασχόληση και θα μας βοηθήσει να καταλήξουμε σε κάποιο συμπέρασμα. Ο πίνακας που ακολουθεί περιέχει το μέσο φορτίο κάθε διατάξεις.

Διάταξη	Μέσο φορτίο (kN)
2	107.59
3	103.85
4	95.36
5	85.25
6	94.53
7	83.20
8	76.06

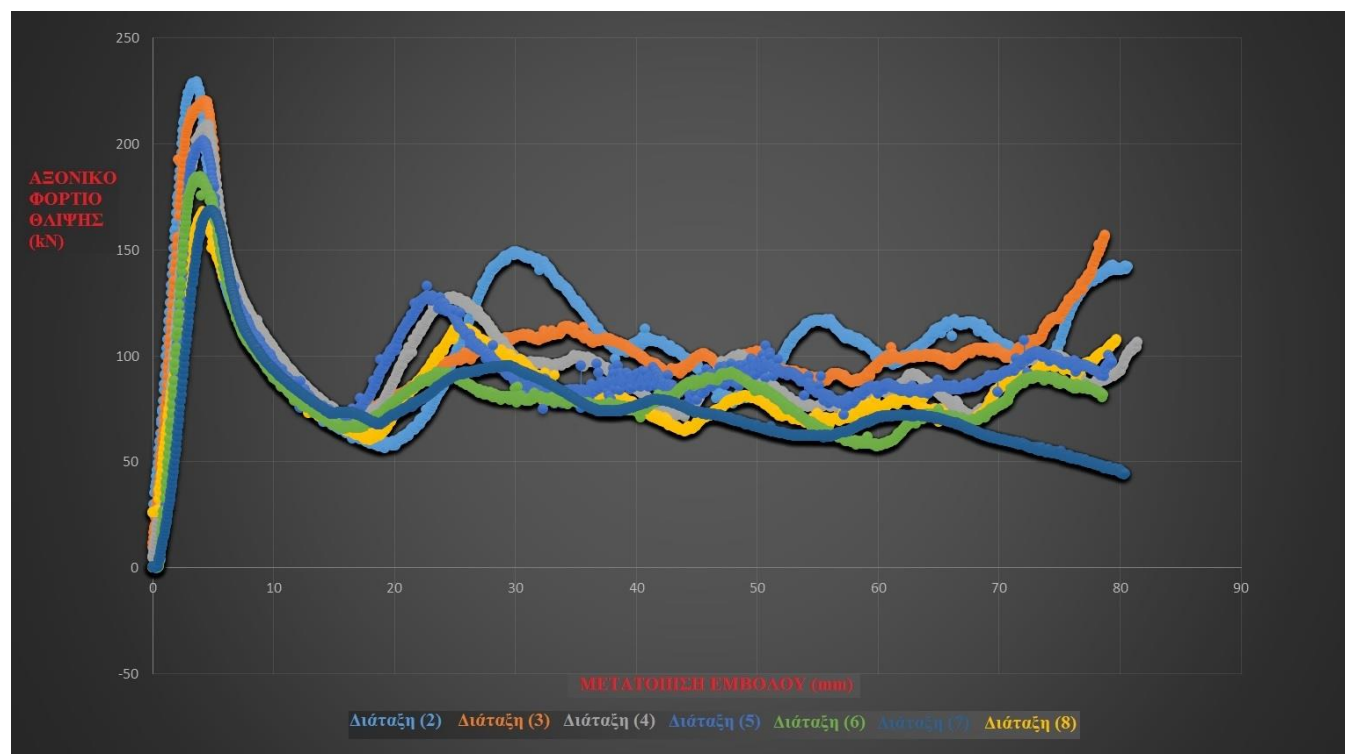
Πίνακας 5.1 : Μέσου φορτίου των διατάξεων 2 έως 8.

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε πως όσο οι σωλήνες απομακρύνονται από τον κατακόρυφο άξονα το μέσο φορτίο πέφτει, το οποίο συνεπάγεται πως υπάρχει πτώση και της ενέργειας απορρόφησης. Για του λόγου το αληθές, στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η ενέργεια απορρόφησης των διατάξεων.

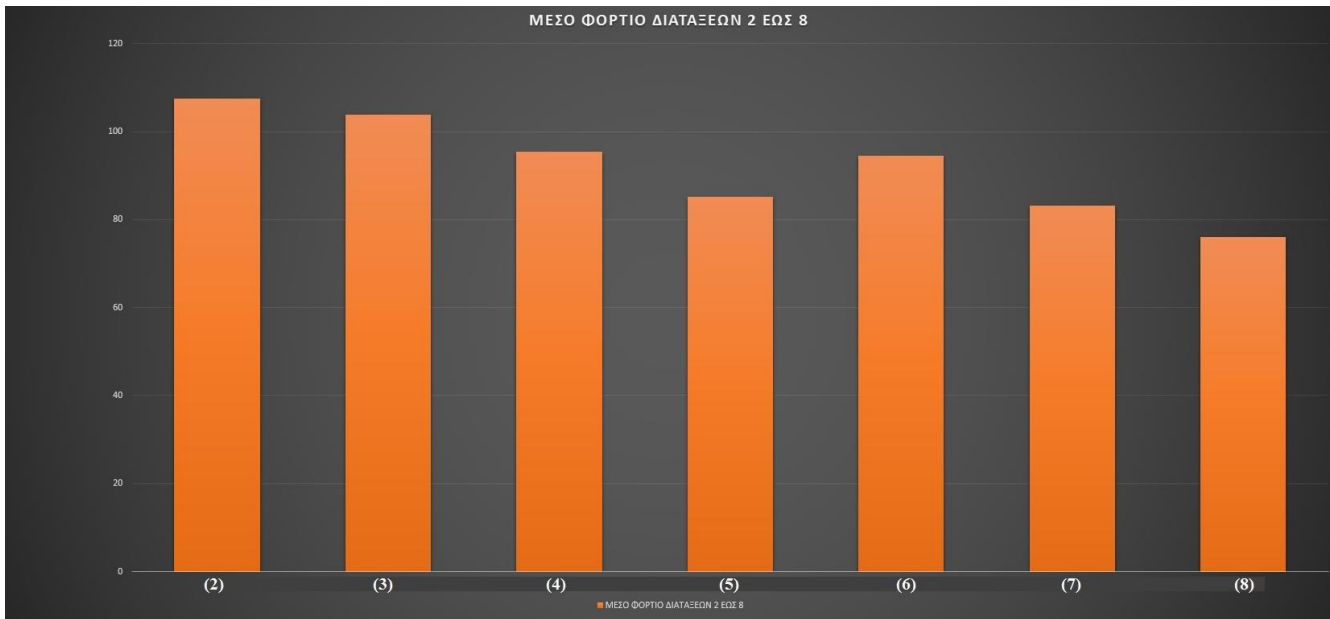
Διάταξη	Απορροφούμενη ενέργεια (J)
2	8607.9
3	8308.1
4	7628.8
5	6820.7
6	7562.8
7	6656.4
8	6085.2

Πίνακας 5.2: Απορροφούμενης ενέργειας των διατάξεων 2 έως 8.

Σύμφωνα με τις μέτρησεις που έχουμε πάρει από το πείραμα κατασκευάζεται το παρακάτω διάγραμμα, το οποίο παρουσιάζει το φορτίο κάθε διάταξης ως προς την μετατόπιση του εμβόλου της πρέσας του εργαστήριου.



Σχήμα 5.10: Σύγκριση καμπυλών αξονικού φορτίου - μετατόπισης εμβόλου των διατάξεων.



Σχήμα 5.11: Συγκριτικό γράφημα μέσου φορτίου αξονικής κατάρρευσης των διατάξεων.

Είναι πλέον ασφαλές έχοντας εξέταση λεπτομερώς την κατάρρευση για όλες τις διατάξεις, ότι το πλεονέκτημα της υψηλής απορρόφησης ενέργειας των διατάξεων που περιλαμβάνουν σωλήνες τοποθετημένες παράλληλα ως προς τον κατακόρυφο άξονα, αντισταθμίζεται από το μειονέκτημα του υψηλού αρχικού φορτίου. Πάντως για την διεξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων, ενδείκνυται η επανάληψη όλων των πειραμάτων με σωλήνες ιδίων διατάσεων και συνθήκων ομοιογένειας και ισοτροπίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Πεπερασμένα Στοιχεία στη Μηχανολογία, Α. Κανάραχος & Χρ. Προβατίδης, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2000.**
2. **Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων, Τόμος Ι + ΙΙ, Γ. Ι. Τσαμασφύρος, Ε. Ε. Θεοτόκογλου, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1994.**
3. **Αξονική Κατάρρευση Λεπτότοιχων Κελυφών Ορθογωνικής Διατομής - Μελέτη της Επίδρασης Ανοιγμάτων στα Τοιχώματα του Κελύφους: Πειραματική Μελέτη και Αριθμητική Προσομοίωση, Γεώργιος Παναγιώτου, Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ, Αθήνα 2010.**
4. **Επίδραση της διάταξης συστήματος μεταλλικών ορθογωνικών σωλήνων στην ικανότητα απορροφητής ενέργειας σε αξονική καταπόνηση: Πείραμα και αριθμητική διερεύνηση, Γεώργιος Χ. Κυριακάκης, Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2011.**
5. **LS-DYNA version 970 keyword user's manual. Livermore Software Technology Corporation, Livermore, California 1998.**
6. **.LS-DYNA theory manual, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, California 2006.**
7. **LS-DYNA Keyword User's Manual, July 2006, Version 971, Copyright © 1992-2006 Livermore Software Technology Corporation, All Rights Reserved.**
8. **Extensible Plastic Collapse of Thin-Walled Frusta As Energy Absorbers, A.G. Mamalis, D.E. Manolakos, S. Saigal, G.L. Viegelaahn, W. Johnson, Int. J. Mech. Sci., 28 (1986), 219.**
9. **Deformation Characteristics of Crashworthy Components, A.G. Mamalis, D.E. Manolakos, G.L. Viegelaahn, Düsseldorf, Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 18, Nr. 62, 1989.**
10. **Elastic-Plastic Theory for Initial Buckling Load of Thin-Walled Grooved Tubes under Axial Compression, G.H. Daneshi, S.J. Hosseinipour, Department of Materials Science and Engineering, Sharif University of Technology, P.O Box 11365-9466, Azadi Ave., Tehran, Iran. Journal of Materials Processing Technology, 125-126 (2002), 826-832.**
11. **On The Crushing Mechanics Of Thin-Walled Structures, T. Wierzbicki & W. Abramowicz, J. Appl. Mech 50 (1983), 727-734.**

- 12. Metallic Energy Dissipating Systems, W. Johnson & S.R. Reid, Appl. Mech. Rev. 31 (1978), 277 - 288.**
- 13. Dynamic Buckling of Elastic-Plastic Square Tubes under Axial Impact - II: Structural Response, D. Karagiozova(a), Norman Jones(b), (a): Institute of Mechanics, Bulgarian Academy of Sciences, Acad. G. Bonchev St., Block 4, Sofia 1113, Bulgaria, (b): Impact Research Centre, The University of Liverpool, Department of Engineering (Mechanical), Brownlow Street, Liverpool L69 3GH, UK. International Journal of Impact Engineering 30 (2004), 167 - 192.**

