

Ευχαριστίες

Έχοντας ολοκληρώσει την διπλωματική μου εργασία οφείλω να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στους ανθρώπους εκείνους που η συμβολή τους ήταν η πλέον καθοριστική για την περαίωση της.

Αρχικά, τον κ. Δημήτριο Μανωλάκο, Καθηγητή της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. ο οποίος δέχτηκε να την εκπονήσω στον Τομέα Κατεργασιών και που δίνοντας μου το παρόν θέμα, μου υπέδειξε καινούργιους και σαφώς ενδιαφέροντες γνωστικούς τομείς διευρύνοντας έτσι την γνώση που αποκόμισα στη σχολή.

Τον κ. Πρωτεσίλαο Κωστάζο, Διδάκτορα Μηχανολόγο Μηχανικό και μέλος Ε.ΔΙ.Π., η συμβολή του οποίου υπήρξε καθοριστική τόσο στην κατασκευή των δοκιμίων και τη διεξαγωγή των πειραμάτων, όσο και στην ανάλυση και τον σχολιασμό φαινομένων και εννοιών που μας απασχόλησαν κατά τη διάρκεια της δημιουργίας της παρούσης.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω το προσωπικό του εργαστηρίου του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών και συγκεκριμένα τον κύριο Κωνσταντίνο Κερασιώτη, μέλος Ε.Τ.Ε.Π. , για τη συμβολή του στη διεξαγωγή των πειραμάτων και τον κύριο Νικόλαο Μελισσά, μέλος Ι.Δ.Α.Χ., για τη συμβολή του στη διαμόρφωση των δοκιμίων αλλά και σε επιμέρους κατεργασίες, όπου χρειάστηκαν.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η πειραματική μελέτη της συμπεριφοράς απορροφητών ενέργειας σε συνθήκες πλευρικής στατικής πρόσκρουσης. Οι διατάξεις απορρόφησης ενέργειας παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ασφάλεια των οχημάτων καθώς συντελούν στον περιορισμό των συνεπειών μιας σύγκρουσης και συγκεντρώνουν για το λόγο αυτό, σημαντικό τμήμα των ερευνών πάνω στο σχεδιασμό και την εξέλιξη τους. Στα πλαίσια του θεωρητικού τμήματος της εργασίας αρχικά παρουσιάζεται η έννοια των απορροφητών ενέργειας και αναλύεται η σημασία της αξιοπιστίας μιας κατασκευής σε συνθήκες κρούσης (crashworthiness). Στη συνέχεια, περιγράφεται θεωρητικά ο μηχανισμός κατάρρευσης λεπτότοιχων σωλήνων διαφόρων διατομών και τέλος παρατίθεται βιβλιογραφική ανασκόπηση των κυρίων δημοσιεύσεων πάνω στο αντικείμενο της απορρόφησης ενέργειας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η πλευρική φόρτιση σωλήνων παρά τα αξιοσημείωτα πλεονεκτήματά της δεν είχε τύχει, μέχρι πρόσφατα της ανάλογης προσοχής εκ μέρους της επιστημονικής κοινότητας. Στο πειραματικό τμήμα της εργασίας, μελετήθηκαν στο εργαστήριο του τομέα Κατεργασιών διάφορες διατάξεις σωλήνων υπό συνθήκες πλευρικής φόρτισης και αποτυπώθηκε η μεταβολή του φορτίου σε σχέση με τη μετατόπιση. Στο τελευταίο κομμάτι της εργασίας παρατίθενται τα συγκριτικά αποτελέσματα των πειραμάτων καθώς και τα συμπεράσματα που εξάγονται από τη συνολική μελέτη.

Abstract

The subject of this thesis is the experimental study of the energy absorber's behavior under quasi-static lateral crush conditions. The energy absorbers play a key role in a vehicle's safety as well as they contribute to reducing the consequences of a collision. For this reason, an important part of research on the design and development of vehicles. Within the theoretical part of this study, the concept of energy absorbers is initially presented and the importance of a structure's reliability under crush conditions is further analysed (crashworthiness).

The mechanism of thin-walled tubes collapse of various cross sections is described on a theoretical base and finally, the bibliographic review of the main scientific reviews and papers, regarding the energy absorption is given. It is worth mentioning that despite the many advantages, the lateral compression of tubes and tubes systems does not have since now the proper attention of the researching community.

During the experimental part of this study, various tube arrangements under lateral loading were investigated in the laboratory and the relation between the compressive load and the displacement has been imprinted. The comparative results of the experiments as well as the conclusions drawn from the overall study are thoroughly described within the final part of the thesis.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	1
Περίληψη	2
Abstract	3
Κεφάλαιο 1.	6
Εισαγωγή.....	6
1.1 Ασφάλεια στις μηχανολογικές κατασκευές.....	6
1.2 Ανάλυση της σύγκρουσης μεταξύ κινούμενων σωμάτων.....	7
1.3 Εισαγωγή στο Crashworthiness	8
1.4 Μορφές ενεργειακών απορροφητών	9
1.5 Λεπτότοιχοι σωλήνες.....	10
1.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διαφόρων μηχανισμών παραμόρφωσης.	13
1.7 Σύγκριση αξονικά και πλευρικά καταπονούμενων σωλήνων	15
1.8 Σύγχρονες εξελίξεις και τάσεις στο σχεδιασμό των συσκευών απορρόφησης ενέργειας	17
Κεφάλαιο 2.	22
Μηχανική Ανάλυση της πλευρικής φόρτισης λεπτότοιχων διατομών	22
2.1 Εισαγωγή.....	22
2.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση στην έρευνα των συσκευών απορρόφησης ενέργειας	23
2.3 Θεωρητική Προσέγγιση του Μηχανισμού κατάρρευσης.....	33
2.4 Πλευρική κατάρρευση σωλήνων ορθογωνικής και τετραγωνικής διατομής	34
2.5 Πλευρική κατάρρευση σωλήνων κυλινδρικής διατομής.....	36
2.4 Δείκτες ενεργειακής απορρόφησης.....	40
Κεφάλαιο 3.	43
Πειραματική διαδικασία.....	43
3.1 Γενικά	43
3.2 Περιγραφή του πειραματικού εξοπλισμού.....	43
3.3 Κατασκευή της πειραματικής διάταξης.....	45
3.4 Δοκίμια.....	46
3.5 Διαστάσεις δοκιμίων	47
3.6 Απαραμόρφωτα παρεμβλήματα	47
3.7 Διατάξεις Πειραματικών Διαδικασιών και τρόπος διεξαγωγής πειραμάτων	48
Κεφάλαιο 4.	51
Παρουσίαση Πειραματικών Αποτελεσμάτων	51

4.1 Γενικά	51
4.2 Ορθογωνική Διάταξη Πάχους 1.0mm απουσία άκαμπτων παρεμβλημάτων	52
4.3 Ορθογωνική Διάταξη Πάχους 1.0mm παρουσία άκαμπτων παρεμβλημάτων	54
4.4 Ορθογωνική Διάταξη Πάχους 1.5mm απουσία άκαμπτων παρεμβλημάτων	56
4.5 Ορθογωνική Διάταξη Πάχους 1.5mm παρουσία άκαμπτων παρεμβλημάτων	58
4.6 Τριγωνική Διάταξη Πάχους 1.0mm απουσία άκαμπτων παρεμβλημάτων	60
4.7 Τριγωνική Διάταξη Πάχους 1.0mm παρουσία άκαμπτων παρεμβλημάτων	62
4.8 Τριγωνική Διάταξη Πάχους 1.5mm απουσία άκαμπτων παρεμβλημάτων	64
4.9 Τριγωνική Διάταξη Πάχους 1.5mm παρουσία άκαμπτων παρεμβλημάτων	66
4.10 Παρατηρήσεις και συγκριτικά αποτελέσματα επί των αρχικών πειραμάτων	68
4.10.1 Ορθογωνικές διατάξεις	68
4.10.2 Τριγωνικές διατάξεις	69
4.10.3 Συγκεντρωτικά διαγράμματα και πίνακες - επιλογή συνέχισης πειραμάτων	70
4.11 Ορθογωνική Διάταξη πάχους δοκιμίου 1.0mm απουσία κεντρικών άκαμπτων παρεμβλημάτων 73	
4.12 Ορθογωνική Διάταξη πάχους δοκιμίου 1.5mm απουσία κεντρικών άκαμπτων παρεμβλημάτων 75	
4.13 Ορθογωνική Διάταξη Πάχους 1.5mm/1mm/1.5mm επάνω και κάτω παρουσία άκαμπτων παρεμβλημάτων	77
4.14 Ορθογωνική Διάταξη Πάχους 1.0/1.5/1.0(mm)επάνω & 1.5/1.0/1.5(mm)κάτω παρουσία άκαμπτων παρεμβλημάτων	79
4.15 Ορθογωνική Διάταξη Πάχους 1.0/1.5/1.0(mm)επάνω & 1.0/1.5/1.0 (mm)κάτω παρουσία άκαμπτων παρεμβλημάτων	81
4.16 Ορθογωνική Διάταξη Πάχους 1.0mm επάνω & 1.5mm κάτω παρουσία άκαμπτων παρεμβλημάτων	83
4.17 Παρατηρήσεις και συγκριτικά αποτελέσματα επί των πειραματικών διατάξεων με μικτά προφίλ	85
4.18 Συμπεράσματα, Συγκεντρωτικοί Πίνακες και Προτάσεις	88
Βιβλιογραφία	92

Κεφάλαιο 1.

Εισαγωγή

1.1 Ασφάλεια στις μηχανολογικές κατασκευές

Στο σχεδιασμό μηχανολογικών κατασκευών, ο μελετητής, προκειμένου να προχωρήσει στη σχεδίαση ενός νέου προϊόντος, λαμβάνει υπόψιν του ένα σύνολο κριτηρίων, όπως το χαμηλό κόστος κατασκευής, τη λειτουργικότητα, την ελαχιστοποίηση του βάρους. Η σημαντικότερη όμως παράμετρος στην οποία δίνεται ιδιαίτερη έμφαση, είναι αυτή της ασφάλειας των χρηστών. Για το λόγο αυτό μεγάλες βιομηχανίες πραγματοποιούν έρευνες προκειμένου να βελτιώσουν την ασφάλεια των κατασκευών τους.

Ένας κλάδος της βιομηχανίας που ασχολείται ιδιαίτερα με τον τομέα της ασφάλειας, είναι αυτός των μεταφορών και ιδίως της αυτοκινητοβιομηχανίας. Έτσι παρατηρείται να εκτελούνται αλληπάλληλα crush tests προκειμένου να δοθεί στην κυκλοφορία ένα νέο μοντέλο αυτοκινήτου. Η τάση αυτή, εξηγείται από το γεγονός ότι τα τροχαία δυστυχήματα, αποτελούν μία από τις κύριες αιτίες θανάτων στο σύγχρονο κόσμο. Ιδίως στη χώρα μας, η οποία κατέχει ένα από τα υψηλότερα ποσοστά στην Ε.Ε., καταδεικνύεται η αναγκαιότητα ενός σχεδιασμού που θα έχει ως στόχο του την προστασία ανθρώπινων ζώων.

Η φιλοσοφία αυτού του τρόπου σχεδίασης, έγκειται στη χρήση διατάξεων που απορροφούν την ενέργεια της κρούσης μέσω της πλαστικής τους παραμόρφωσης, προστατεύοντας την υπόλοιπη κατασκευή (*crashworthiness*) αλλά και τους επιβαίνοντες από τα υψηλά φορτία που αναπτύσσονται κατά τη σύγκρουση.

1.2 Ανάλυση της σύγκρουσης μεταξύ κινούμενων σωμάτων

Ένα σώμα, το οποίο εκτίθεται σε σύγκρουση ενώ είναι σε κίνηση, μπορεί να ενταχθεί σε μία από τις παρακάτω πέντε κύριες κατηγορίες οχημάτων:

- ✓ αυτοκίνητα
- ✓ αεροπλάνα/διαστημόπλοια
- ✓ πλοία
- ✓ σιδηρόδρομος και
- ✓ ανελκυστήρες/αναβατόρια.

Αυτά τα κινούμενα σώματα, είναι δυνατόν να θεωρηθούν ως ένας οριοθετημένος χώρος ενός πολύ καλά δομημένου εξωτερικού περιγράμματος, που μεταφέρει ανθρώπους ή εμπορεύματα.

Για την ελαχιστοποίηση της ζημιάς σε έναν τέτοιο οριοθετημένο χώρο καθώς και στα περιεχόμενα του, ιδεατά, η σχετική ταχύτητα θα πρέπει να παραμένει όσο το δυνατόν μικρότερη. Σε μια σύγκρουση, είναι αυτός ο εξωτερικός θάλαμος που υφίσταται την πρώτη κρούση και συνακόλουθα υπόκειται σε (τυχαία) πλαστική παραμόρφωση ενώ ταυτόχρονα μπορεί να λάβει χώρα και θραύση κάποιων τμημάτων του.

Τα περιεχόμενα του θαλάμου εξακολουθούν να κινούνται, λόγω του πρώτου νομού του Νεύτωνα για την κίνηση (αδράνεια), ενώ ο εξωτερικός «θάλαμος» λόγω της κρούσης συγκρατείται και έτσι σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα από τη στιγμή της δυναμικής σύγκρουσης, τα περιεχόμενα έρχονται σε επαφή με την εσωτερική επιφάνεια του θαλάμου. Το φαινόμενο αυτό ορίζεται ως δευτερεύουσα σύγκρουση.

Κατά αντιστοιχία με τα παραπάνω και ο οδηγός ενός οχήματος μπορεί να θεωρηθεί ως εξωτερικός θάλαμος που στο εσωτερικό του περιέχει τα ζωτικά του όργανα. Μια ζημία για παράδειγμα στο κρανίο, μπορεί να θεωρηθεί ως ζημία στον εξωτερικό θάλαμο και εξαιτίας της ημίρρευστης φύσης του εγκεφάλου και της ικανότητάς του να μεταδίδει κύματα τάσης,

το περιεχόμενο του εγκεφάλου μπορεί και αυτό να υποστεί ζημιά. Αυτή θα είναι μια τρίτη σύγκρουση. Τέτοια φαινόμενα αναφέρονται ως μια κατάσταση τριπλής σύγκρουσης.

Συμπερασματικά, η εξωτερική επιφάνεια κάθε κινούμενου σώματος είναι αυτή που υπόκειται στην πρωτεύουσα σύγκρουση και διαδοχικά, τα περιεχόμενα του σώματος είναι εκείνα που θα υποφέρουν από την δευτερεύουσα και τις επόμενες συνακόλουθες συγκρούσεις.

1.3 Εισαγωγή στο Crashworthiness

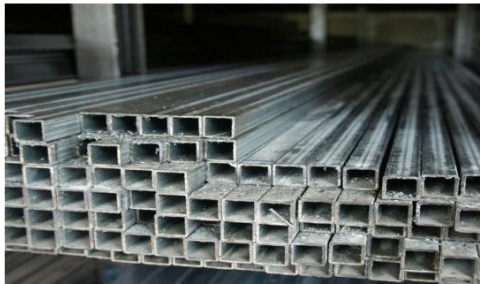
Με τον όρο Crashworthiness, αναφερόμαστε στη μελέτη διατάξεων οι οποίες χρησιμοποιούνται ώστε μέσω της κατάρρευσής τους, να απορροφούν την ενέργεια που προέρχεται από σύγκρουση και να προστατεύουν την υπόλοιπη κατασκευή στην οποία έχουν εφαρμοσθεί.

Ουσιαστικά, η μελέτη του crashworthiness, επικεντρώνεται στη συμπεριφορά κατάρρευσης διατάξεων (κυρίως κελυφών), οι οποίες διαχέουν την κινητική ενέργεια που παραλαμβάνουν από την κρούση, μετατρέποντάς την σε πλαστικό έργο.

Οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται στην πράξη για το σκοπό αυτό, ονομάζονται ενεργειακοί απορροφητές. Σκοπός των ενεργειακών απορροφητών είναι η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη απορρόφηση κινητικής ενέργειας κατά την κρούση και η μετατροπή της σε μη αναστρέψιμη μορφή ή αλλιώς σε πλαστικό έργο, με απώτερο στόχο την προστασία της κατασκευής στην οποία εμπεριέχονται.

1.4 Μορφές ενεργειακών απορροφητών

Οι ενεργειακοί απορροφητές είναι στη πλειονότητά τους, λεπτότοιχοι σωλήνες από μαλακό χάλυβα ή αλουμίνιο που προέρχονται είτε από διέλαση, είτε από στραντζαριστά ελάσματα με ραφή συγκόλλησης.



Εικόνα 1.1 Στραντζαριστά ελάσματα με ραφή συγκόλλησης (αριστερά) και δοκίμια αλουμινίου από διέλαση (δεξιά) .

Οι επικρατούσες διατομές τους είναι: η κυκλική, η τετραγωνική και η ορθογωνική διατομή, ενώ οι συνήθεις γεωμετρικές μορφές είναι: ο ορθογωνικός σωλήνας τετραγωνικής διατομής, ο ευθύς κυλινδρικός σωλήνας και οι κωνικοί σωλήνες με σχήμα κόλουρης πυραμίδας.

Σύμφωνα με δημοσιευμένες μελέτες, είναι κοινώς αποδεκτό ότι η γεωμετρική μορφή του ενεργειακού απορροφητή είναι καθοριστικής σημασίας για τον τρόπο κατάρρευσης του καθώς και για την ενέργεια που απορροφάται από αυτόν. Είναι χαρακτηριστικό ότι το μέσο θεωρητικό φορτίο, που ασκείται στους κωνικούς σωλήνες, αυξάνεται με την εξέλιξη της παραμόρφωσης, ενώ στους ευθείς σωλήνες παραμένει σταθερό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στους κωνικούς σωλήνες έχουμε αύξηση του πλάτους κατά μήκος του σωλήνα, άρα και αύξηση του υλικού προς παραμόρφωση και απορρόφηση ενέργειας.

Άλλες παράμετροι που επιδρούν και επηρεάζουν σημαντικά την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας ενός σωλήνα είναι ακόμη το μήκος του δοκιμίου, το πάχος του τοιχώματος και η διατομή του. Για παράδειγμα, η αύξηση του πάχους του τοιχώματος οδηγεί σε αύξηση της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας.

1.5 Λεπτότοιχοι σωλήνες

Τις τελευταίες δεκαετίες, υπήρξε ένα έντονο ενδιαφέρον πάνω στην αντοχή μιας κατασκευής ως πρωτεύουσα απαίτηση κατά τον σχεδιασμό όλων των δομών μεταφοράς, που εμπεριέχουν επιβαίνοντες.

Λεπτότοιχοι σωλήνες χρησιμοποιούνται εκτεταμένα σε εφαρμογές όπου η αντοχή σε σύγκρουση είναι κυρίαρχος παράγοντας, απορροφώντας την κινητική ενεργεία μέσω της πλαστικής παραμόρφωσης και με τον τρόπο αυτό συμβάλλουν στην αύξηση της αντοχής σε κρούση της κατασκευής. Η ευρεία χρήση λεπτότοιχων σωλήνων ως απορροφητές ενέργειας οφείλεται στην καλή τους απόδοση όταν υποβληθούν σε δυναμική φόρτιση, την μεγάλη διαθεσιμότητα αυτών, το χαμηλό κόστος παράγωγής τους καθώς και στην αποδοτικότητά τους.

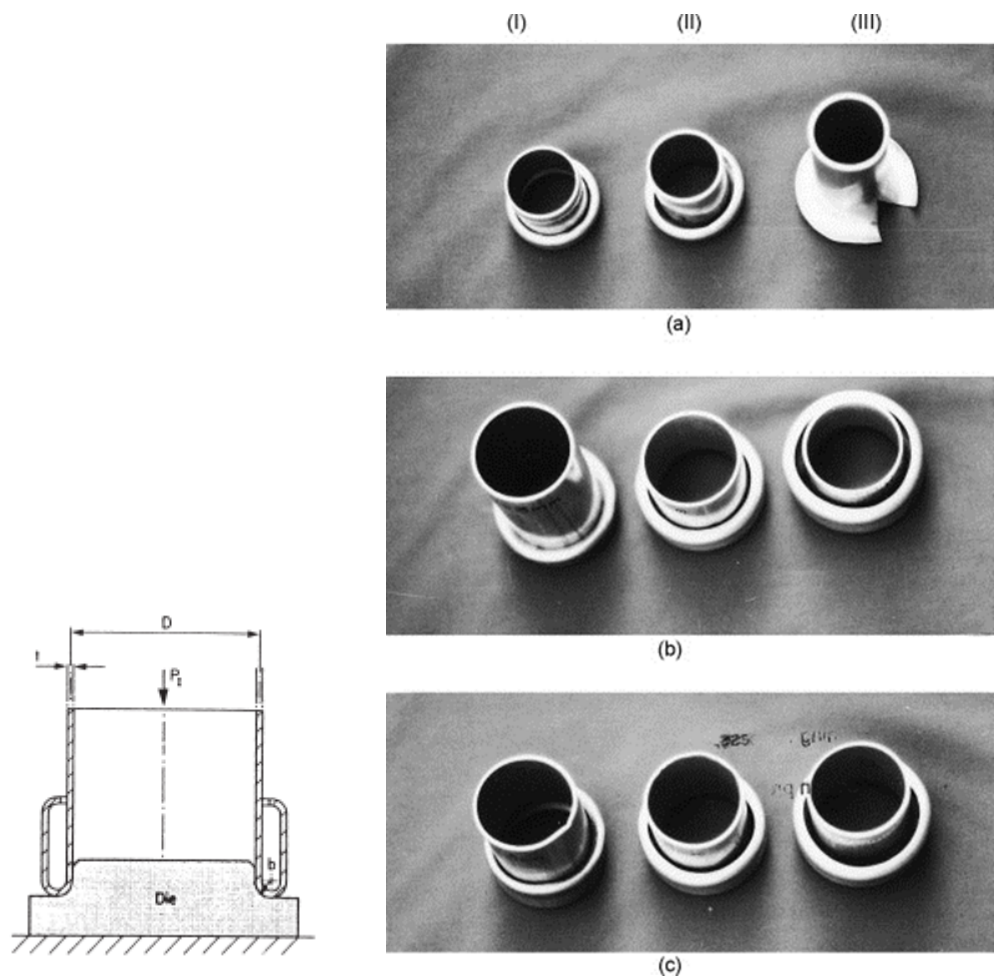
Τέτοιες κατασκευές απορρόφησης ενέργειας αποτελούμενες από λεπτότοιχους σωλήνες βρίσκουμε στα μπροστινά μέρη αυτοκίνητων και τρένων, σε υποδαπέδιες κατασκευές αεροσκαφών, σε προστατευτικές δομές ανατροπής βαρέων οχημάτων (Rollover Protective Structures – R.O.P.S.) όπως μπουλντόζες και καρότσες φορτηγών.

Ένα σημαντικό μέρος έρευνας έχει πραγματοποιηθεί πάνω στην ενεργεία που διαχέεται από λεπτότοιχους σωλήνες. Τα κύρια ευρήματα, περιγράφονται και παρουσιάζονται στη δημοσίευση των Olabi και Alghamdi. Εκτενής αναφορά και ανάλυση των δομών απορρόφησης ενέργειας και υλικών, μπορούν να βρεθούν στο βιβλίο των Lu και Yu.

Οι λεπτότοιχοι σωλήνες μπορούν να απορροφούν την κινητική ενεργεία, ως αποτέλεσμα πολλών διαφορετικών τύπων παραμόρφωσης, το οποίο οδηγεί σε ποικίλες απαντήσεις σχετικά με την απορρόφηση ενέργειας.

Οι κύριοι μηχανισμοί πλαστικής παραμόρφωσης σωλήνων, περιλαμβάνουν τις παρακάτω μορφές :

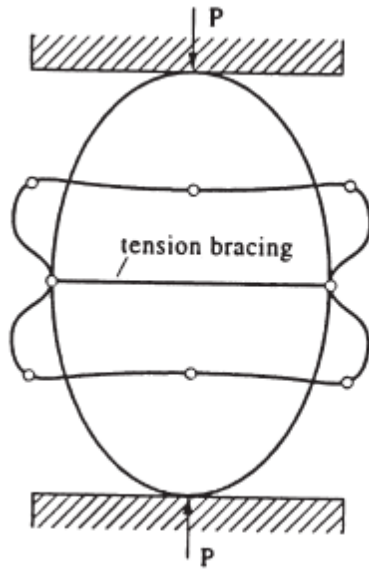
- ✓ πλευρική συμπίεση (lateral flattening),
- ✓ την αξονική θλίψη (axial crushing),
- ✓ την πλαστική αναστροφή των πλευρικών επιφανειών λόγω θλιπτικού φορτίου (inside-out tube inversion)
- ✓ την πλαστική απότμηση λόγω αξονικής φόρτισης (tube splitting).



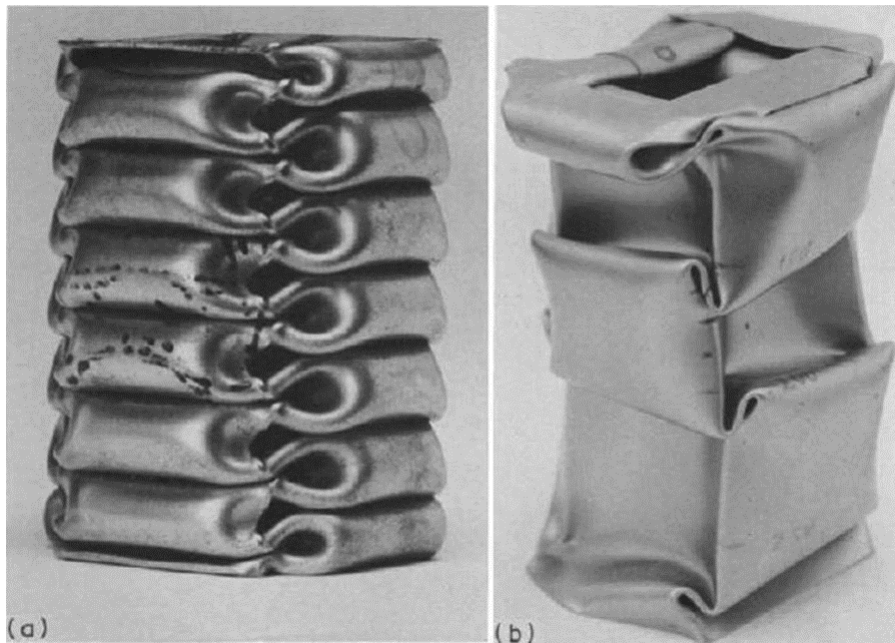
Εικόνα 1.2 Πλαστική αναστροφή των πλευρικών επιφανειών λόγω θλιπτικού φορτίου



Εικόνα 1.3. Φάσεις πλαστικής απότμησης λόγω αξονικής φόρτισης



Εικόνα 1.4. Πλευρική συμπίεση



Εικόνα 1.5. Αξονική θλίψη

Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφερθεί ότι υπάρχει και άλλη μια σημαντική διάκριση του τρόπου επιβολής του φορτίου στα δοκίμια. Συγκεκριμένα εδώ κυριαρχούν ο δυναμικός και ο οιονεί-στατικός τρόπος φόρτισης. Ο δυναμικός τρόπος φόρτισης λαμβάνει υπόψιν τις αδρανειακές δυνάμεις που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στις μεγάλες ταχύτητες σύγκρουσης, ενώ ο οιονεί-στατικός τρόπος φόρτισης που αφορά χαμηλές ταχύτητες

πρόσκρουσης, αγνοεί τις αδρανειακές δυνάμεις και ομοιάζει με το στατικό. Ο επικρατέστερος είναι ο οιονεί-στατικός τρόπος φόρτισης, καθώς εμπεριέχει τα πλεονεκτήματα του στατικού και προσομοιάζει ικανοποιητικά αρκετές περιπτώσεις συγκρούσεων που εμφανίζονται στην πράξη.

1.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διαφόρων μηχανισμών παραμόρφωσης.

Το μέγεθος της απορρόφησης ενέργειας από πλευρικά συμπιεσμένους σωλήνες , μπορεί να αυξηθεί βοηθώντας τους σωλήνες να καταρρεύσουν με κάποιον εναλλακτικό τρόπο, διατηρώντας όμως την εμφάνιση των πλαστικών αρθρώσεων.

Οι αξονικά φορτιζόμενοι σωλήνες ή σωλήνες που καταπονούνται από διάτμηση ή λόγω αναστροφής παρουσιάζουν συγκεκριμένες ατέλειες. Για παράδειγμα οι αξονικά φορτιζόμενοι σωλήνες, οδηγούν σε απόκριση δύναμης-παραμόρφωσης η οποία εμφανίζει πολύ υψηλό φορτίο κατάρρευσης , το οποίο ακολουθείται από μεγάλες διακυμάνσεις του φορτίου γύρω από τη μέση τιμή του.

Αυτές οι διακυμάνσεις γύρω από το μέσο φορτίο μπορούν να φτάσουν και το 50% του φορτίου κατάρρευσης. Σαν συνεπεία, τα φορτία της κρούσης τα οποία μεταφέρονται στην κατασκευή που είναι για προστασία, δεν θα έχουν το ελάχιστο δυνατό μέγεθος και έτσι η επιβράδυνση της δύναμης σε αυτό το σημείο θα είναι υψηλή.

Είναι μια συνήθης καλή πρακτική να σχεδιάζουμε έναν αποσβέστη ενέργειας, έτσι ώστε το μέγιστο φορτίο του να είναι σχετικά κοντά με το μέσο φορτίο. Αντίθετα η λειτουργία παραμόρφωσης ενός πλευρικά συμπιεσμένου σωλήνα είναι αυτή της κάμψης και για αυτό το αποτέλεσμα είναι μια ομαλή αντίδραση χωρίς καμία σχεδόν συχνότητα ταλαντώσεων.

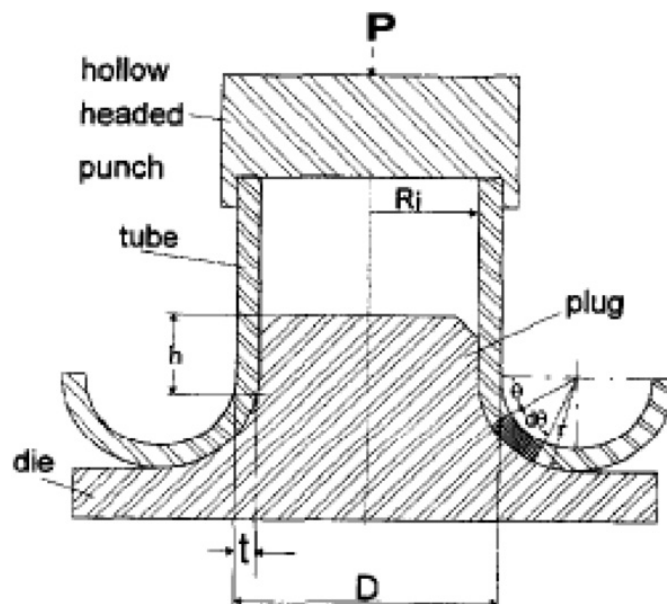
Σχετικά με τα αξονικά συμπιεσμένα συστήματα επιτυχής φόρτιση μπορεί να επιτευχτεί μόνο αν ο άξονας της εφαρμοζόμενης εξωτερικής δύναμης είναι σε σχέση με τον διαμήκη άξονα του αποσβεστήρα, μικρότερη από 15%. Σε περιπτώσεις εφαρμογών στις μεταφορές , τέτοια συμπεριφορά είναι μη επιθυμητή και είναι πολύ δύσκολο η δύναμη της κινητικής ενέργειας να εφαρμοστεί μέσα σε αυτό το εύρος του 15%.

Σε αντίθεση με τα παραπάνω η πλευρική φόρτιση μπορεί να πραγματοποιηθεί και σε γωνίες κρούσης μεγαλύτερης του 15%, δεδομένου ότι οι σωλήνες θα συνεχίζουν να εκκινούν

να παραμορφώνονται για το μεγαλύτερο μέρος της διαδρομής παραμόρφωσης πριν η συμμετρία αρχίσει να χάνεται.

Σωλήνες που συμπιέζονται αξονικά μπορούν να γίνουν ασταθείς λόγω του γεγονότος ότι συχνά μεταπίπτουν σε μια λειτουργία λογισμού τύπου Euler, ειδικά οι σωλήνες με μεγάλους λόγους L/D . Ως αποτέλεσμα αυτού η δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας τέτοιων συστημάτων μπορεί να μειωθεί σημαντικά.

Οι πλευρικά φορτιζόμενοι σωλήνες είναι ευκολότερα κατασκευάσιμες συσκευές σε σύγκριση με τους αξονικά χωριζόμενους και τους αξονικά αναστραμμένους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι θα έπρεπε να φτιαχτούν ειδικές μήτρες και στελέχη με πολύ υψηλό επίπεδο ακριβείας για να εξασφαλίσουν αποτελεσματική λειτουργία και να επιτευχθεί η επιθυμητή τελική απόκριση. Ένα τυπικό παράδειγμα μιας μήτρας που χρησιμοποιείται για αξονική αναστροφή σωλήνων στο σχήμα.



Εικόνα 1.6 Μήτρα που χρησιμοποιείται για κατασκευή σωλήνων αξονικής αναστροφής

Παρά τα αναμφίβολα μειονεκτήματα των αξονικά συμπιεζόμενων σωλήνων, φαίνεται να λαμβάνουν περισσότερη προσοχή όσον αφορά την έρευνα σε αντίθεση με τους πλευρικά συμπιεσμένους. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι οι αξονικά φορτιζόμενοι έχουν μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα στην κρούση λόγω της εγγενώς μεγαλύτερης διαδρομής. Εκτός από αυτό το μέγεθος της δύναμης του αξονικά συμπιεσμένου σωλήνα, είναι αρκετές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από τους πλευρικά συμπιεσμένους το οποίο είναι προφανώς το μεγαλύτερο τους πλεονέκτημα.

Η επιτυχής αναστροφή σωλήνων είναι δυνατή μόνο όταν το υλικό τους είναι ορισμένης ολκιμότητας και η τάση σκλήρυνσης δεν είναι σημαντική. Εκτός από αυτό, οι

συνολικές διαστάσεις της ακτίνας της μήτρας πρέπει να είναι μέσα σε συμβατά όρια σε συνδυασμό με κατάλληλες ιδιότητες του υλικού έτσι ώστε να επιτευχτεί η επιθυμητή δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας. Επομένως είναι προφανές ότι η αξονική αναστροφή ενός ελατού υλικού είναι μια πολύπλοκη διαδικασία.

Για συστήματα που κυριαρχεί η κάμψη, μπορούμε να επιλέξουμε από μια μεγάλη γκάμα μαλακών υλικών, έτσι ώστε να μετατρέψουμε την κινητική ενεργεία σε πλαστικό έργο και αυτό με σχετικά μικρή προσπάθεια στον σχεδιασμό.

Η επιλογή του κατάλληλου μηχανισμού παραμόρφωσης, η επιλογή των υλικών και ο τύπος των σωλήνων που θα χρησιμοποιηθούν, εξαρτάται από τις γνώσεις του μηχανικού και την ικανότητα του να επιλέξει τον καλύτερο σχεδιασμό έτσι ώστε να επιτευχτεί η περισσότερο επιθυμητή απόκριση απορρόφησης ενέργειας του συστήματος.

1.7 Σύγκριση αξονικά και πλευρικά καταπονούμενων σωλήνων

Οι αξονικά φορτιζόμενοι σωλήνες έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως ως δομές απορρόφησης ενέργειας, και έχουν λάβει σημαντική προσοχή από τους ερευνητές, λόγω του γεγονότος ότι οι σωλήνες σε αξονική θλίψη έχουν συγκριτικά υψηλή ικανότητα απορρόφησης. Αυτό, οφείλεται στο ότι κατά την αξονική φόρτιση, το περισσότερο υλικό του σωλήνα παραμορφώνεται πλαστικά, συμβάλλοντας έτσι σημαντικά στην απορρόφηση. Χαρακτηριστικό είναι ότι σε σύγκριση μεταξύ αξονικής και πλευρικής συμπίεσης, προέκυψε ότι κατά την αξονική συμπίεση παρουσιάστηκε περίπου 10 φορές μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας από την πλευρική.



Εικόνα 1.7 Κυλινδρικό δοκίμιο φορτιζόμενο αξονικά

Ωστόσο αυτές οι δομές έχουν ορισμένα μειονεκτήματα, όπως οι πολύ μεγάλες διακυμάνσεις του φορτίου, καταρρεύσεις σε σχέση με το μέσο φορτίο και πολύ ασταθείς λειτουργίες παραμόρφωσης.

Το μέγεθος της ενέργειας απορρόφησης που μπορούν να απορροφήσουν πλευρικά πεπλατυσμένοι σωλήνες, βρέθηκαν να είναι μεγαλύτερη από εκείνη των σωλήνων με πλευρικές εσοχές, αλλά όχι τόσο όση αυτών με την αξονική σύνθλιψη.

Το κύριο πλεονέκτημα των πλευρικά φορτισμένων σωλήνων είναι ότι η κατάσταση της κατάρρευσης σε κάμψη που παράγεται από πλευρική (lateral) φόρτιση, γίνεται με μια ομαλή απόκριση της δύναμης με την παραμόρφωση. Ακόμα, οι πλευρικά φορτιζόμενοι σωλήνες δεν υφίστανται κανενός είδους ασταθή παραμόρφωση ακόμα και όταν αυτοί φορτίζονται εκτός άξονα. Παρά αυτά τα πλεονεκτήματα, οι σωληνώσεις σε πλευρική φόρτιση έχουν λάβει σχετικά περιορισμένη προσοχή στην ερευνά σχετικά με τους απορροφητές ενέργειας.



Εικόνα 1.8 Πειραματική δοκιμή πλευρικής φόρτισης κυκλικού σωλήνα πριν και μετά

1.8 Σύγχρονες εξελίξεις και τάσεις στο σχεδιασμό των συσκευών απορρόφησης ενέργειας

Στην βιομηχανία των μεταφορών, υπάρχει μια σημαντική τάση για μείωση του βάρους των οχημάτων, κυρίως με την χρήση ελαφρότερων υλικών όπως τα κράματα αλουμινίου και το μαγνήσιο, αλλά παράλληλα διατηρώντας την αξιοπιστία των συσκευών απορρόφησης ενέργειας κάτω από συνθήκες σύγκρουσης.

Αυτή η σχεδιαστική απαίτηση, επιτυγχάνεται επί του παρόντος μέσω μιας νέας μορφής διαδικασίας κατασκευής η οποία ονομάζεται Υδρομορφοποίηση. Η διαδικασία αυτή είναι πλέον μια δημοφιλής μέθοδος για την παραγωγή πολύπλοκων κατασκευαστικών σχημάτων και είναι ο πιο χρησιμοποιούμενος αυτή τη στιγμή τρόπος κατασκευής στην αυτοκινητοβιομηχανία.

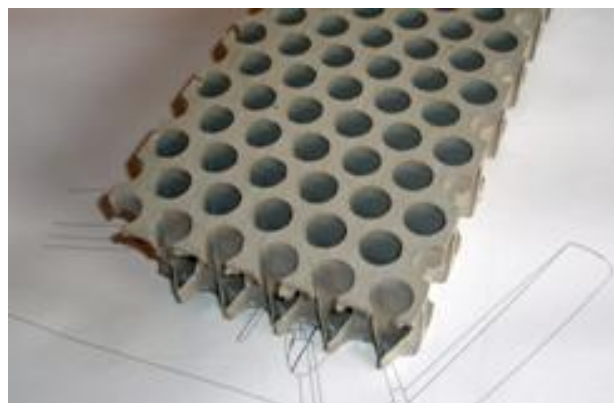
Στην Υδρομορφοποίηση μια πίεση μέσω ρευστού εφαρμόζεται εσωτερικά σε σωλήνα προκαλώντας την παραμόρφωση του και δημιουργώντας έτσι την εναρμόνιση του με μια προσαρμοσμένου σχήματος μήτρα. Μια τέτοια διαδικασία οδηγεί σε πολύ πιο ακριβείς διαστάσεις του κάθε εξαρτήματος, σε μείωση του βάρους καθώς και σε αυξημένη ακαμψία

και αντοχή. Με αυτή την διαδικασία, επιτυγχάνεται η παραγωγή εξαρτημάτων ενιαίου σώματος, που σε άλλη περίπτωση θα αποτελούντο από πολλά διαφορετικά εξαρτήματα.

Αυτή η τεχνολογία αιχμής, έχει ως αποτελέσματα μια συνολική μείωση του κόστους παραγωγής και τη βελτίωση των χαρακτηριστικών των συσκευών απορρόφησης ενέργειας, σε αντίθεση με παλαιότερες τεχνικές όπως η σφυρηλάτηση και η συγκόλληση. Η διαδικασία της Υδρομορφοποίησης, μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί ώστε να παραχθούν απορροφητές ενέργειας κυκλικού, τετραγωνικού ή και κόλουρου κώνου σχήματος.

Με την αύξηση της υπολογιστικής ισχύς, η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Fine Element Method) χρησιμοποιείται ως το πιο ισχυρό εργαλείο των μηχανικών για να βελτιστοποιηθεί το πολύπλοκο προφίλ της εγκάρσιας τομής του σχεδιασμού ενιαίων σωμάτων που κατασκευάζονται με Υδρομορφοποίηση, έτσι ώστε να επιτευχθεί ελάχιστο βάρος, μέγιστη ακαμψία και αντοχή. Όλα δηλαδή τα χαρακτηριστικά που πρέπει να παρουσιάζουν οι συσκευές απορρόφησης ενέργειας.

Ταυτόχρονα, αναπτύσσονται νέα υλικά από τους ερευνητές τα οποία βρίσκουν εφαρμογή στις συσκευές απορρόφησης ενέργειας. Αυτά τα υλικά χρησιμοποιούνται κυρίως με την μορφή αφρού σε διάταξη κηρήθρας. Τα υλικά με μορφή κηρήθρας είναι το βασικό δομικό στοιχείο σε πάνελ μορφής «sandwich» και θεωρούνται πολύ καλοί απορροφητές ενέργειας. Τους βρίσκουμε σε διατομές διάφορων σχημάτων όπως τριγωνικά, τετράγωνα, ρομβοειδή, κυκλικά και εξαγωνικά. Τα υλικά από τα οποία αποτελούνται αυτοί οι απορροφητές ενέργειας είναι κυρίως πολυμερή, μέταλλα, κεραμικά, πλαστικά αλλά και χαρτί. Η δομή τους είναι ουσιαστικά δισδιάστατη και αρκετά απλή.

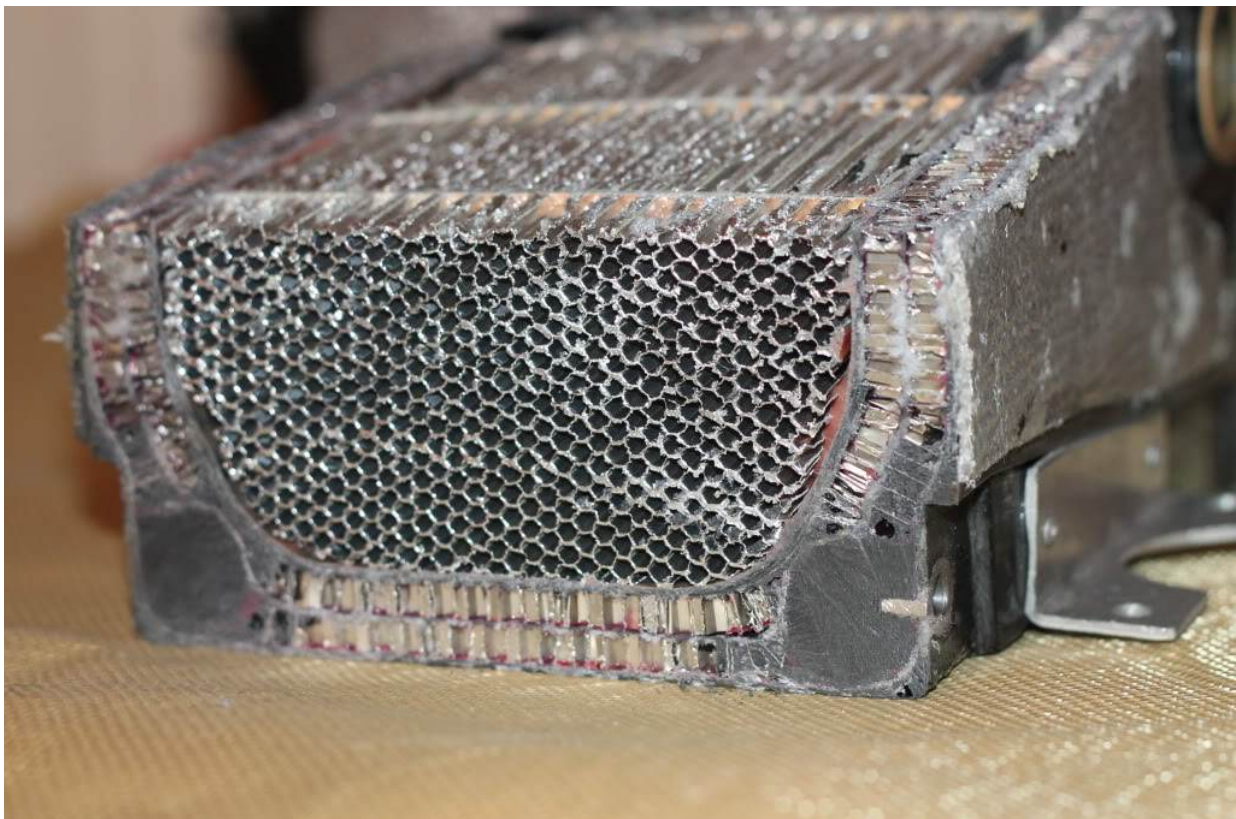


Εικόνα 1.9 Απορροφητής ενέργειας κυκλικής κυψελωτής διάταξης από αφρό πολυουρεθάνης

Οι αφροί είναι μια τρισδιάστατη μορφή κυψέλης και μπορούν να ταξινομηθούν είτε ως ανοιχτών κελιών (αφροί πολυουρεθάνης) ή κλειστών κελιών (αφροί πολυαιθυλενίου). Πιο πρόσφατα, αφροί από μέταλλο έχουν αναδειχθεί ως μια καινούργια και πρωτοπόρα κατηγορία υλικού που παρουσιάζουν μεγάλες δυνατότητες για εφαρμογή σε συσκευές απορρόφησης ενέργειας αλλά και σε άλλες εφαρμογές.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι επεξεργασίας που διατίθενται για την κατασκευή των μεταλλικών αφρών, όπως οι φυσαλίδες αερίου μέσα από τετηγμένο κράμα μετάλλου, η ανάμιξη ενός παράγοντα δημιουργίας αφρού μέσα σε τετηγμένο κράμα μετάλλου και με στερεοποίηση μεταλλικής σκόνης με συγκεκριμένους παράγοντες δημιουργίας αφρού.

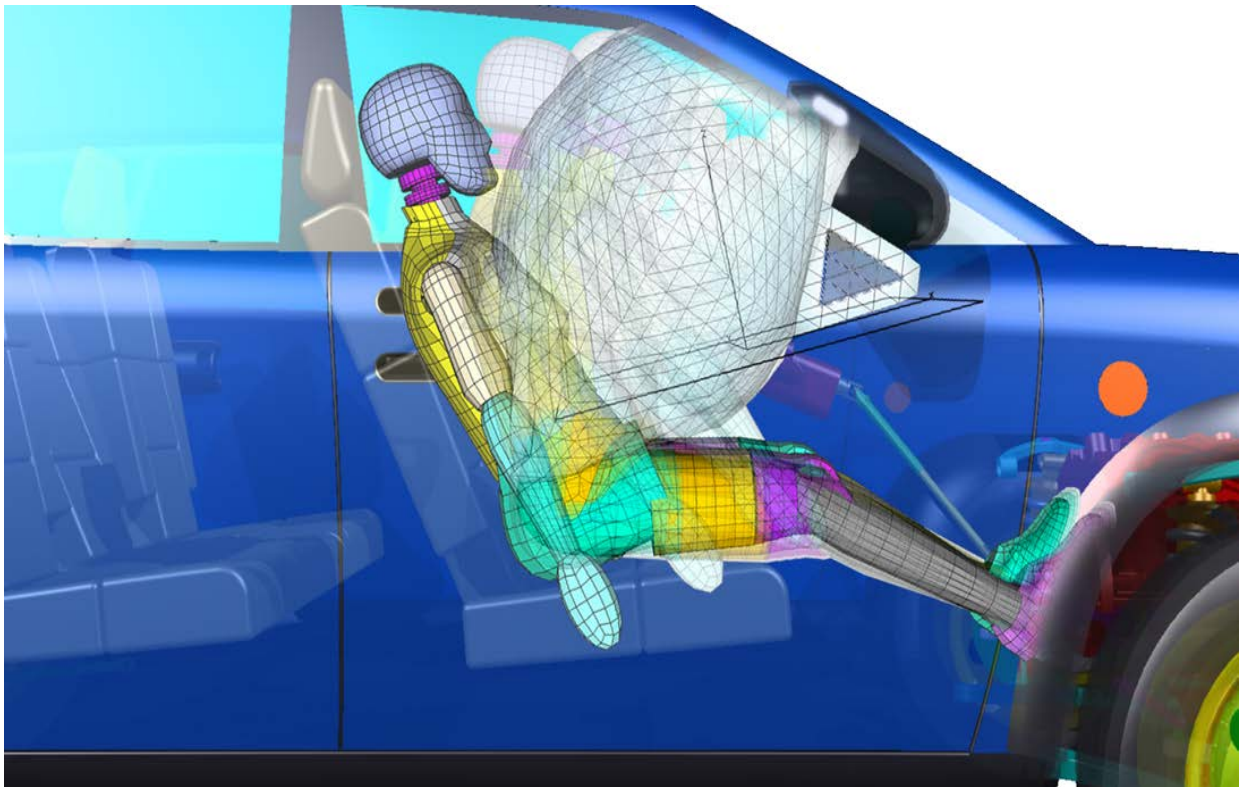
Συνηθέστερα, το αλουμίνιο και το νικέλιο χρησιμοποιούνται για εφαρμογή σε αφρούς μετάλλου. Αυτοί, έχουν χαμηλή πυκνότητα, με καλή αντοχή στη διάτμηση και την θραύση και είναι ιδανικοί στη δημιουργία sandwich panels. Η εξαιρετική τους ικανότητα να απορροφούν μεγάλες ποσότητες ενέργειας με σχεδόν σταθερή δύναμη, μας οδηγούν σε ευρεία χρήση τους. Από προφυλακτήρες αυτοκινήτων έως κυλιόμενες κλίμακες και ανελκυστήρες.



Εικόνα 1.10 Εγκάρσια τομή αγωνιστικού οχήματος, όπου φαίνεται η κυψελωτού σχήματος διάταξη του απορροφητή ενέργειας

Όσον αφορά την αντοχή σε κρούση των αυτοκινήτων και των συσκευών καθ' οδόν προστασίας, έχουν γίνει τεράστιες πρόοδοι με τη χρήση πανίσχυρων υπολογιστικών τεχνικών που επιτρέπουν στους ερευνητές μηχανικούς να προσομοιώνουν πολλά διαφορετικά σενάρια κρούσης και να προβλέπουν την αντίδραση οχήματος και επιβατών σε τέτοια περίπτωση. Αυτή η δυνατότητα πρόβλεψης οδηγεί σε πιο αποδοτικό χρόνο έρευνας και αποτελεσματικότερη συλλογή δεδομένων έτσι ώστε να βοηθηθεί σημαντικά η σχεδιαστική βελτιστοποίηση των μεταφερόμενων δομών.

Μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων οχημάτων σε κοινή χρήση, που περιλαμβάνουν οδικές κατασκευές, μετακινούμενες δομές ή και επιβαίνοντες, έχουν αναπτυχτεί σε πολλά και διαφορετικά επίπεδα λεπτομέρειας και πολυπλοκότητας, επιτρέποντας έτσι σε ερευνητές και μηχανικούς σε όλο τον κόσμο, να διεξάγουν την πολύτιμη έρευνα ασφάλειας των μεταφορών. Μια από τις βασικές προκλήσεις, είναι να απεικονιστεί ρεαλιστικά η φυσική αντίδραση της πρόσκρουσης του οχήματος. Για να επιτευχτεί αυτό, τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να περιλαμβάνουν όλες τις πληροφορίες της γεωμετρίας ενός οχήματος, οι οποίες μπορεί και να αφορούν πάνω από ένα εκατομμύριο στοιχεία.



Εικόνα 1.11 Προσομοίωση κρούσης με την χρήση υπολογιστικού πακέτου
Πεπερασμένων Στοιχείων

Επιπλέον, τα μοντέλα αυτά θα πρέπει να περιλαμβάνουν πολύπλοκες μη γραμμικές ιδιότητες που δεν αφορούν το αυτοκίνητο, όπως το έδαφος, το τσιμέντο, το ξύλο, η πολυουρεθάνη και άλλα υλικά. Επιπρόσθετη δυσκολία, είναι ότι η προσομοίωση αυτών των επιπτώσεων, πραγματοποιείται σε χρόνο εκτέλεσης από 500ms έως 1sec.

Υπάρχει μια αυξανόμενη απαίτηση για βελτίωση στη προσομοίωση και στη πρόβλεψη της αστοχίας σε υλικά και συναρμολογούμενα μέρη των οχημάτων και αυτό πρέπει να επιτευχθεί έτσι ώστε να αποφεύγεται η κατασκευή πολλών πρωτότυπων μοντέλων.

Η διαθεσιμότητα υψηλής απόδοσης υπολογιστών, θα βοηθήσει τους μηχανικούς να ξεπεράσουν αυτές τις προκλήσεις. Πλέον, οι υπολογιστές μεγάλης ισχύος αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα στην μοντελοποίηση και την προσομοίωση όσον αφορά την αξιοπιστία συσκευών σε κρούση. Και έτσι θα συνεχίσει να είναι στο προβλεπόμενο μέλλον, επιτρέποντας έτσι να βελτιώνεται συνεχώς η αξιοπιστία σε περίπτωση κρούσης μεταφερόμενων σωμάτων.

Κεφάλαιο 2.

Μηχανική Ανάλυση της πλευρικής φόρτισης λεπτότοιχων διατομών

2.1 Εισαγωγή

Η χρήση κυκλικών μεταλλικών σωλήνων και δακτυλίων στον σχεδιασμό συστημάτων ανθεκτικών στη σύγκρουση έχει προσελκύσει την προσοχή πολλών ερευνητών, όπως των Johnson και Reid. Τα κυκλικά τμήματα σωληνώσεων είναι επίσης ευρέως διαδεδομένα ως φτηνά και εύκολα κατασκευάσιμα δομικά στοιχεία. Ως εκ τούτου, για την καλύτερη αξιοποίηση σωληνοειδών δομών, πρέπει να υπάρξει μια διεξοδική κατανόηση του μηχανισμού κατάρρευσης τους.

Τέτοιες μεταλλικές δομές, σωλήνες και δακτύλιοι, μπορούν να είναι τοποθετημένοι σε διαφορετικές μορφές και να φορτίζονται προς παραμόρφωση με διαφορετικούς τρόπους ώστε να λειτουργούν σε μεγάλο εύρος φορτίων και κρούσεων.

Η συμπεριφορά των κυκλικών μεταλλικών σωλήνων κάτω από αξονική και πλευρική φόρτιση έχει μελετηθεί σε αρκετές έρευνες. Η περίπτωση της πλευρικής (διαμετρικής ή κεντρικής) φόρτισης έχει κάποια πλεονεκτήματα έναντι της αξονικής καθώς είναι και πιο εύκολο να κατασκευαστεί έναντι των περισσότερων άλλων συσκευών απόσβεσης ενέργειας.

Ως πρώτο βήμα για να καθορίσουμε τη χαρακτηριστική καμπύλη φορτίου/ παραμόρφωσης, τέτοιων δομών σε συνθήκες κρούσης, συνήθως μελετάμε τη συμπεριφορά τους κάτω από οιονεί-στατική φόρτιση.

2.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση στην έρευνα των συσκευών απορρόφησης ενέργειας

Η εξέταση σχετικής βιβλιογραφίας μας δείχνει ότι οι έρευνες σχετικά με την πλαστική παραμόρφωση σωληνοειδών τμημάτων είναι ολοένα και αυξανόμενες και αυτό, λόγω των συγκεντρωμένων και τοπικών ομοιόμορφων κατανεμημένων φορτίων που αυτά παρουσιάζουν.

Προκειμένου να αποκτήσουμε μια ασφαλή γνώση των φαινομένων κρούσεων όσο αφορά οχήματα μεταφοράς και κατασκευές θα πρέπει να έχουμε έναν συνδυασμό γνώσεων σχετικών θεμάτων όπως η Μηχανική των Υλικών, Μηχανική Κατασκευών, Δυναμική Κρούσεων και Πλαστικότητα. Πολλές πηγές σχετικής βιβλιογραφίας είναι διαθέσιμες για τον οποιοδήποτε ενδιαφερόμενο, έτσι ώστε να αποκτήσει μια αναλυτική σκόπηση στο πεδίο αποσβεστήρων ενέργειας.

Το περιοδικό International Journal of Mechanical Science το οποίο πρωτοεκδόθηκε το 1960, έχει πολλές μελέτες (επιστημονικά – ερευνητικά άρθρα) σχετικά με τον μηχανισμό των κατασκευών. Το περιοδικό Internal Journal of Impact Engineering est. 1983 είναι μια ακόμα μεγάλη πηγή σχετικής βιβλιογραφίας. Αυτό, δημοσιεύει έρευνες σχετικές με την αντίδραση κατασκευών και σωμάτων που υπόκεινται σε δυναμικά φόρτια αναπτυσσόμενα από έκθεση σε εκρήξεις, συγκρούσεις, καταρρεύσεις, ή άλλες μορφές κρούσεων. Ένα πιο πρόσφατο περιοδικό, το International Journal of Crashworthiness est. 1996 το οποίο είναι αφιερωμένο στις συμπεριφορές πρόσκρουσης οχημάτων κατασκευών, υλικών και της εμβιομηχανικής κρούσεων.

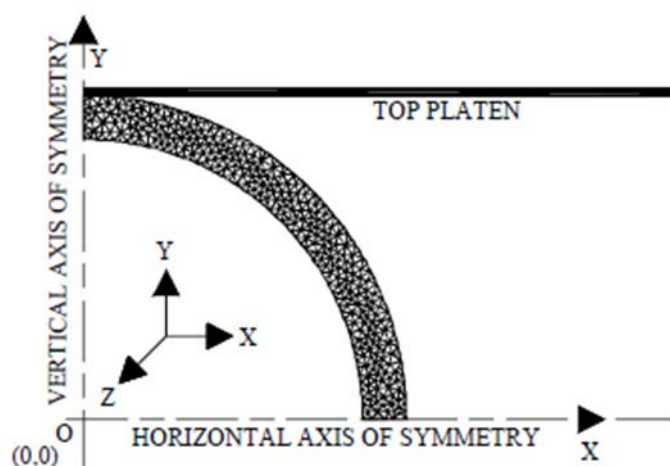
Σχετική βιβλιογραφία μπορεί να αναζητηθεί στα παρακάτω επιστημονικά περιοδικά: International Journal of Solids and Structures, International Journal of Pressure Vessels and Piping and the Journal of Thin-Walled Structures.

Σκληρόδετα χειρόγραφα όπως τα Crashworthiness of Vehicles επιμελημένα από τους Johnson and Mamalis, το Structural Impact and Crashworthiness επιμελημένο από τον Morton, το Structural Crashworthiness and Failure επιμελημένο από τους

Jones and Wierzbicki μας παρέχουν πολύ αξιόλογες πληροφορίες. Τέλος οι Lu και Yu δημοσίευσαν ένα χειρόγραφο το οποίο συνδυάζει θεμελιώδεις γνώσεις σχετικές με τους αποσβέστες ενέργειας έτσι ώστε να αποκτηθεί μια ασφαλής κατανόηση των μηχανισμών που διέπουν τα φόρτια κρούσεων.

Ο J. Zukas δημιούργησε χρήσιμους πίνακες για να περιγράψει τα χαρακτηριστικά του υπολογιστικού κώδικα των Πεπερασμένων Στοιχείων (Fine Element Method) που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση χαμηλών και υψηλών ταχυτήτων κρούσης κατασκευών, που αφορούν την ανθεκτικότητα σε σύγκρουση οχημάτων μεταφοράς με ασφάλεια.

Αρκετοί ερευνητές έχουν αναλύσει διεξοδικά τη συμπίεση ενός σωλήνα μεταξύ άκαμπτων πλακών και έχουν καταλήξει σε ένα μηχανισμό παραμόρφωσης τέτοιο που μπορεί να περιγράψει τη διαδικασία της πλευρικής συμπίεσης.



Εικόνα 2.1 Προτεινόμενο μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων για υπολογιστική μελέτη συμπιεζόμενων σωλήνων από μεταλλικές πλάκες

Οι De Runtz & Hodge ανέλυσαν την συμπίεση ενός σωλήνα από μαλακό χάλυβα που υποβάλλεται σε οιονεί-στατική πλευρική φόρτιση. Ένα άκαμπτο, πλήρως πλαστικό υλικό χρησιμοποιήθηκε σαν μοντέλο για την πρόβλεψη της απόκρισης μεταξύ φορτίου-παραμόρφωσης. Το στοιχείο της ακαμψίας υπολογιζόταν μέσα σε αυτό το θεωρητικό μοντέλο. Ωστόσο, είχε παραβλεφθεί το ποσοστό της αύξησης και αυτό λόγω της παράβλεψης των φαινομένων σκλήρυνσης του υλικού λόγω παραμόρφωσης. Το παραμορφωμένο περίγραμμα του σωλήνα αποτελείται από

τέσσερα κυκλικά τόξα τα οποία είχαν διατηρήσει την αρχική τους ακτίνα ενώ η πλαστική παραμόρφωση πραγματοποιήθηκε μόνο κατά τις αρθρώσεις που δημιουργήθηκαν.

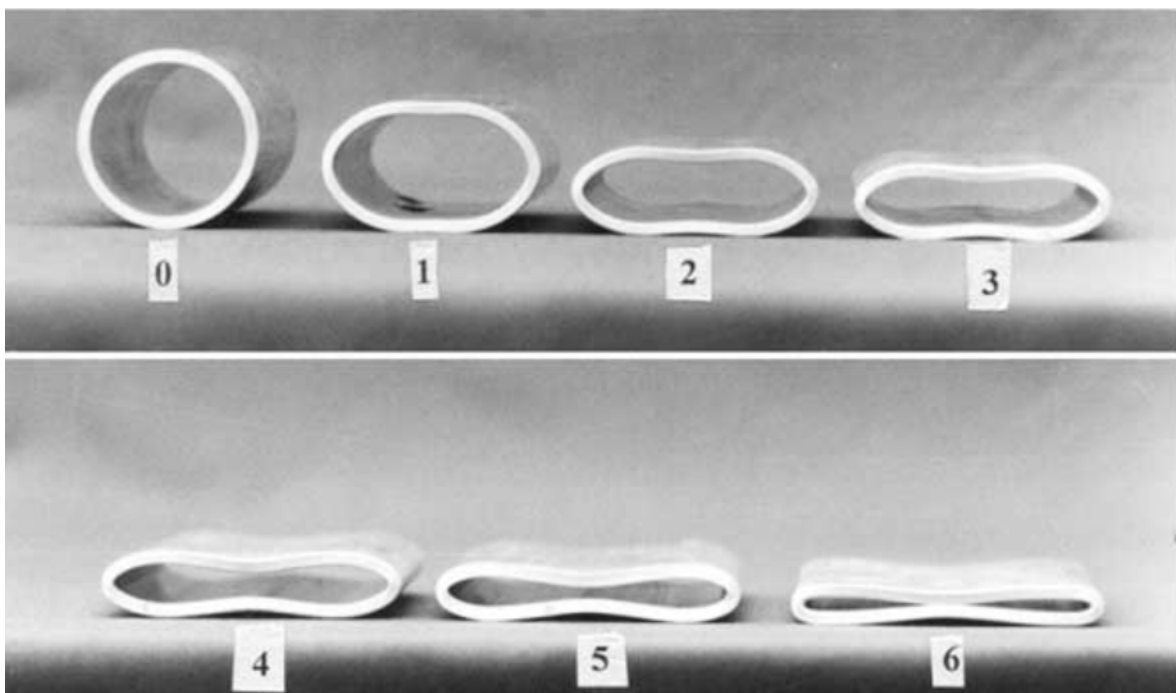
Ο Redwood προσπάθησε να συμπεριλάβει την επίδραση της σκλήρυνσης του υλικού λόγο παραμόρφωσης πράγμα που είχε παραλειφτεί από τον De Runtz. Χρησιμοποιήθηκε ένα άκαμπτο, γραμμικά παραμορφωμένο μοντέλο σε σχέση με την σκλήρυνση (σε αντίθεση με ένα άκαμπτο τέλεια πλαστικό μοντέλο), για να προβλέψει τη δύναμη και την απορρόφηση ενέργειας.

Η επίδραση της σκλήρυνσης από την παραμόρφωση εξετάστηκε περαιτέρω από τους Reid & Reddy. Το θεωρητικό μοντέλο που δημιουργήθηκε από αυτούς βασίστηκε σε ένα άκαμπτο δοκίμιο γραμμικής σχέσης παραμόρφωσης/σκλήρυνσης και είναι το πιο ακριβές που έχουμε ως σήμερα. Οι συγγραφείς βελτίωσαν την πρόβλεψη της σχέσης παραμόρφωσης/σκλήρυνσης, αντικαθιστώντας τις τοπικές αρθρώσεις με ένα τόξο στο οποίο το μήκος αλλάζει με την παραμόρφωση. Ως εκ τούτου, αυτό το θεωρητικό μοντέλο λάμβανε υπόψη τόσο τη γεωμετρική όσο και την επίδραση της σκλήρυνσης λόγω καταπόνησης του υλικού.

Αναπτύχθηκε λοιπόν έτσι μια πολύ σημαντική αδιάστατη παράμετρος η οποία διέπει το σχήμα της καμπύλης δύναμης– παραμόρφωσης. Αυτή η παράμετρος ορίζεται ως mR και είναι συνάρτηση της τάσης διαρροής σε εφελκυσμό, της μέσης ακτίνας R του σωλήνα, του δείκτη σκλήρυνσης– παραμόρφωσης E_p και το πάχος t . Σύμφωνα με τους Reid & Reddy είναι δυνατόν να μεγιστοποιήσουμε την ικανότητα ενεργειακής απορρόφησης αν επιλέξουμε τις κατάλληλες διαστάσεις σωλήνα, τέτοιες ώστε η τιμή του mR να ελαχιστοποιείται δεδομένου ότι αυτός είναι συνάρτηση της γεωμετρίας του σωλήνα.

Οι Reddy & Reid μελέτησαν τα φαινόμενα που σχετίζονται με την σύνθλιψη μεταλλικών σωλήνων ανάμεσα σε άκαμπτες πλάκες. Χρησιμοποιήθηκαν αλουμινένιοι και μαλακού χάλυβα σωληνώσεις, οι οποίες συμπιεστήκαν πλευρικά σε μια μηχανή Instron. Διαπιστώθηκε ότι οι σωλήνες που ήταν κατά διαστήματα ανοπτημένοι αντιστοιχούσε παρόμοια με την τέλεια πλαστική θεωρία. Αυτό οφειλόταν στο γεγονός ότι οι συνέπειες από τις επιδράσεις σκλήρυνσης– παραμόρφωσης, σταδιακά απομακρυνόντουσαν λόγω των ανοπτημένων τμημάτων. Ανάμεσα στους σωλήνες που είχαν υποβληθεί σε ανοπτηση και αυτούς που χρησιμοποιήθηκαν ως είχαν, βρέθηκαν πολύ μεγάλες διαφορές μεταξύ των πειραμάτων και της πλαστικής θεωρίας.

Ο Gurta πραγματοποίησε μια ολοκληρωμένη διερεύνηση, τόσο πειραματική όσο και υπολογιστική κυκλικών μεταλλικών σωλήνων, που υποβάλλονται σε οιονεί-στατική πλευρική φόρτιση. Τα δείγματα που αναλύθηκαν ήταν κατασκευασμένα τόσο από μαλακό χάλυβα όσο και αλουμίνιο, με διαφορετικούς λόγους διαμέτρου προς πάχος δοκιμίου. Τα αποτελέσματα από τις αντιστοιχίες δύναμης- παραμόρφωσης ελήφθησαν και εξετάστηκαν λεπτομερώς. Για να πραγματοποιηθούν αυτές οι αναλύσεις, το τεταρτημόριο ενός τυπικού σωλήνα χωρίστηκε σε ζώνες για να βοηθηθεί η περιγραφή του μηχανισμού παραμόρφωσης καθώς είχαν υποβληθεί σε μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις.



Εικόνα 2.2 Προφίλ πραγματικής παραμόρφωσης κυλίνδρων κυκλικής διατομής σε διαφορετικά στάδια της πλευρικής συμπίεσης

Οι Avellel & Goglio εξέτασαν το πεδίο της παραμόρφωσης που δημιουργείται από την πλευρική συμπίεση αλουμινένιων σωλήνων και προχώρησαν στον έλεγχο διάφορων θεωρητικών μοντέλων, βρίσκοντας τελικά ότι το μοντέλο Reid & Reddy είναι το πιο ρεαλιστικό όσον αφορά την περιγραφή της πραγματικής συμπεριφοράς του σωλήνα που πιέζεται πλευρικά τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά.

Οι Reid & Reddy εξέτασαν θεωρητικά και πειραματικά την οιονεί-στατική συμπίεση ενός σωλήνα ο οποίος περιορίζεται πλευρικά έτσι ώστε η οριζόντια διάμετρος να μην μπορεί να αυξηθεί. Αυτός είναι ένα τρόπος να αυξηθεί η ειδική

ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του σωλήνα, εισάγοντας με αυτόν τον τρόπο περισσότερες πλαστικές αρθρώσεις στην κατασκευή. Επίσης μελετήθηκε ο συσχετισμός μεταξύ ενός μονού σωλήνα και ενός συστήματος σωλήνων. Βρέθηκε ότι η ενέργεια που απορροφά ένα κλειστό σύστημα, πλευρικά περιορισμένο, είναι τρεις φορές περισσότερη από αυτό χωρίς τους περιορισμούς, ίδιας διάταξης. Συνολικά μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η εισαγωγή των πλευρικών περιορισμών και η δημιουργία ενός κλειστού συστήματος είναι μια εφικτή μέθοδος αύξησης της αποτελεσματικότητας απορρόφησης ενέργειας.

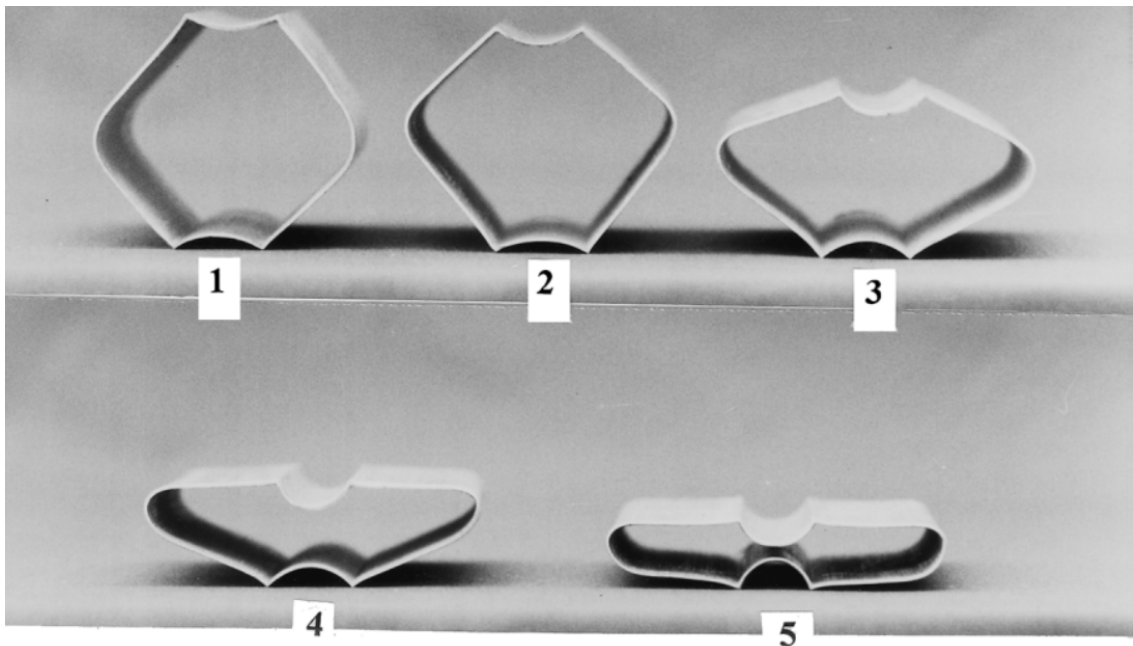
Ο Shrive ανέλυσε ένα ενσωματωμένο/ένθετο σύστημα, το οποίο αποτελείται από δυο ομόκεντρους δακτυλίους, οι οποίοι ανάμεσα τους περιέβαλαν μια σειρά μικρότερων σωλήνων, με όλους τους άξονες των δοκιμών να είναι παράλληλοι μεταξύ τους. Για να συνδεθούν μεταξύ τους οι δακτύλιοι με τους σωλήνες χρησιμοποιήθηκε σημειακή συγκόλληση (πονταρίσματα). Διαπιστώθηκε, ότι αυξανόμενη της ακαμψίας του συστήματος, εμφανιζόταν το μέγιστο φορτίο και η μέγιστη απορρόφηση ενέργειας, καθώς ο αριθμός των σημειακών συγκολλήσεων αυξανόταν. Από το πείραμα της φόρτισης σε κρούση, διαπιστώθηκε ότι δεν συνέβη η μέγιστη δυνατή παραμόρφωση, αλλά παρατηρήθηκαν μέγιστες δυνάμεις αντίδρασης, όμοιες με την οιονεί-στατική περίπτωση.

Ένα ένθετο σύστημα, με την διάταξη ορθογωνίων στρώσεων από σωλήνες αλουμινίου και μαλακού χάλυβα κάτω από οιονεί-στατική πλευρική συμπίεση ερευνήθηκαν από τον Johnson. Αυτό το ορθογωνικό σύστημα αποτελείται από μια σειρά σωλήνων στοιβαγμένους ο ένας πάνω στον άλλο, με κάθε δεύτερη σειρά όμως περιστρεμμένη κατά 90° . Ο συγγραφέας κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα ένθετα συστήματα που χρησιμοποιούν μαλακά υλικά είναι σημαντικά στο να μας δώσουν μια καμπύλη φορτίου/ παραμόρφωσης με μονοσήμαντη αντίδραση. Σε αντίθεση με αυτό, συστήματα τα οποία εμφανίζουν ρωγμές μετά την φόρτιση τους προκαλούν ταλαντώσεις στην καμπύλη και δεν βοηθούν στο να έχουμε μια συνολική κατάρρευση της διάταξης.

Η επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης στη δυναμική πλευρική συμπίεση των σωλήνων εξετάστηκε από τους Reid & Reddy. Προσπάθησαν να βρουν μια σχέση που να συνδέει την δυναμική και την οιονεί-στατική, χαρακτηριστική καμπύλη φορτίου/παραμόρφωσης για λεπτότοιχους σωλήνες που συμπιέζονται ανάμεσα σε άκαμπτες πλάκες. Ανέπτυξαν μια θεωρία η οποία μπορεί να δώσει μια καλή εκτίμηση

της δυναμικής αντίδρασης φορτίου/παραμόρφωσης και κατά συνέπεια την εκτίμηση της ενέργειας απορρόφησης σωλήνων μαλακού χάλυβα και αλουμινίου.

Ο Reid ανέλυσε πειραματικά την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και τον μηχανισμό κατάρρευσης, ενισχυμένων μεταλλικών σωλήνων όταν συμπιέζονται από άκαμπτες πλάκες. Ο σκοπός των πειραμάτων, ήταν να σχεδιαστεί ένας απορροφητής ενέργειας που θα μπορεί να ανταπεξέλθει στα φαινόμενα που είναι αποτέλεσμα πλευρικών, συγκρούσεων οχημάτων, όπως η επαναφορά του οχήματος στην αρχική του πορεία (Redirectional) και την συγκράτηση του οχήματος ώστε να αποφευχθούν δευτερεύοντες συγκρούσεις με άλλα επερχόμενα οχήματα (Trapping). Αρχικά διεξήγαγε πειράματα, σε εξαρτήματα μικρής κλίμακας ώστε να διερευνήσει την δυνατότητα επίτευξης της επιθυμητής απόκρισης. Αυτό το έκανε εισάγοντας αντηρίδες/στηρίγματα στην διάμετρο των σωλήνων μαλακού χάλυβα που χρησιμοποιούσε για τα πειράματα. Αναλύθηκαν διατάξεις σωλήνων τόσο μονών όσο και διπλών αντηρίδων (στηριγμάτων) σε διάφορες γωνίες. Συμπερασματικά κατέληξε ότι οι ενισχυμένοι, είτε μονά είτε διπλά σωλήνες, ήταν ευαίσθητοι στη διεύθυνση του φορτίου. Ωστόσο με αυτό τον τρόπο, επετεύχθητε μεγάλη βελτίωση στην απορρόφηση ενέργειας. Πλήρους κλίμακας πειράματα έλαβαν χώρα, με διπλά ενισχυμένους σωλήνες σε διαφορές διατάξεις δοκιμών κρούσης.



Εικόνα 2.3 Προφίλ πραγματικής παραμόρφωσης κυλίνδρων τετραγωνικής διατομής σε διαφορετικά στάδια της πλευρικής συμπίεσης

Οι Gurta & Ray μελέτησαν την κατάρρευση λεπτότοιχων τετραγωνικής διατομής σωλήνων, τόσο κενούς όσο και πληρωμένους με υλικό απορρόφησης. Χρησιμοποιήθηκαν διάφορα μεγέθη σωλήνων τόσο ακατέργαστων όσο και ανοπτημένων. Το πληρωτικό υλικό ήταν πολυουρεθάνη σε μορφή αφρού ή ξύλο από πεύκο. Παρουσιάστηκε μια θεωρητική ανάλυση για να υπολογιστεί το μέγιστο φορτίο και η απόκριση μεταξύ του φορτίου– παραμόρφωσης. Τα αποτελέσματα όσο της θεωρητικής προσέγγισης όσο και των πειραματικών μετρήσεων είχαν μεταξύ τους πολύ καλή προσέγγιση. Όπως είχε προβλεφτεί το υλικό πλήρωσης στις σωλήνες αυξάνει την ικανότητα απορρόφησης ειδικής ενέργειας. Επιπλέον, το κυριότερο πλεονέκτημα της χρήσης πυρωτικού υλικού είναι ότι, η μετά την κατάρρευση απόκριση μεταξύ φορτίου-παραμόρφωσης αυξάνεται χωρίς όμως αύξηση του φορτίου κατάρρευσης.

Παρατηρώντας το πόσο σημαντικό είναι το φαινόμενο της σκλήρυνσης του υλικού λόγω τάσης σε περιπτώσεις κρούσης, εξαιτίας υψηλών τιμών πίεσης και των μεγάλων παραμορφώσεων, οι Sherbourne & Lu ανέλυσαν θεωρητικά τη συμπίεση σωλήνων από άκαμπτες πλάκες χρησιμοποιώντας την «Μέθοδο των Μετακινουμένων Αρθρώσεων» (Moving Hinge Method). Αν και αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για χρήση από μοντέλα που είναι άκαμπτα, τέλεια πλαστικά υλικά, οι Sherbourne & Lu επιχείρησαν να συμπεριλάβουν τις συνέπειες της σκλήρυνσης από τάση σε αυτό το μοντέλο.

Διαπιστώθηκε ότι τα αποτελέσματα από το παραπάνω μοντέλο ήταν σε σχετικά καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα. Ακόμα, σε σύγκριση με άλλες θεωρίες που είχαν αναπτυχτεί για την πρόβλεψη του φορτίου κατάρρευσης, το μοντέλο των Μετακινουμένων Αρθρώσεων επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία χωρίς να υπάρχει συμβιβασμός στην ακρίβεια.

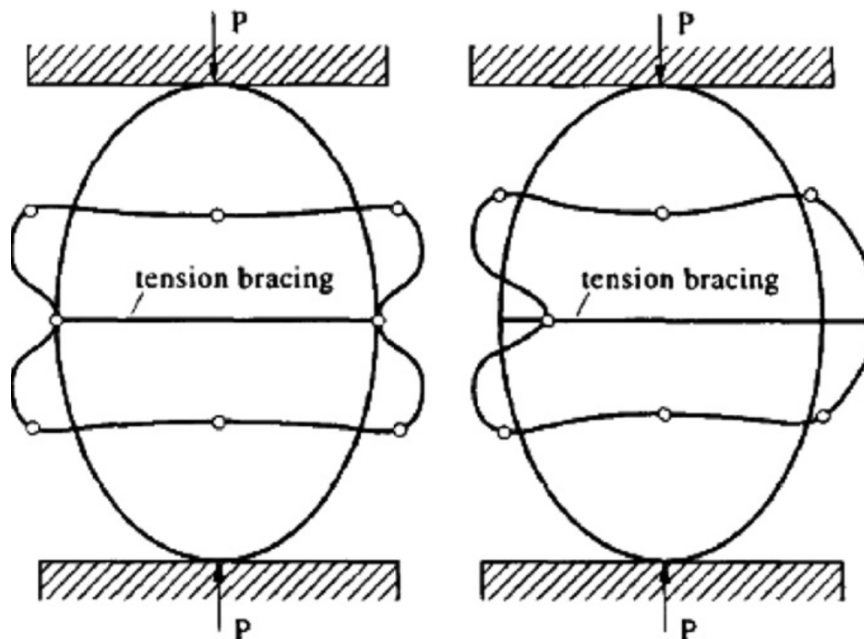
Τέλος, διαπιστώθηκε ότι η Μέθοδος των Μετακινουμένων Αρθρώσεων μπορεί να εφαρμοστεί και σε άλλους τύπους παραμόρφωσης όπως η αξονική συμπίεση. Αυτό είναι ένα μεγάλο πλεονέκτημα αφού οι άλλες μέθοδοι εφαρμόζονται μόνον σε καταστάσεις πλευρικής συμπίεσης.

Οι Wu & Camrey ανέλυσαν διεξοδικά την αρχική κατάρρευση ενισχυμένων ελλειπτικών σωλήνων υπό πλευρική καταπόνηση. Οι ελλειπτικοί σωλήνες παρέχουν ένας σαφές πλεονέκτημα απέναντι στους κυκλικούς σωλήνες το οποίο είναι η μεγαλύτερη αποδοτικότητα θραύσης. Αυτό σημαίνει ότι το μέγεθος της ειδικής

ενέργειας που μπορεί να απορροφηθεί από τέτοιες συσκευές αυξάνεται, το οποίο είναι ένα επιθυμητό χαρακτηριστικό στον σχεδιασμό μηχανισμών εξασθένηση της κρούσης.

Μια άλλη μέθοδος για την αύξηση της ικανότητας απορρόφησης ειδικής ενέργειας είτε σε ελλειπτικούς είτε σε κυκλικούς σωλήνες είναι με την τοποθέτηση μεταλλικών στηριγμάτων είτε οριζόντια είτε υπό γωνία. Αυτό δημιουργεί μια αύξηση του φορτίου κατάρρευσης και ως εκ τούτου την αύξηση της ικανότητας απορρόφησης της ειδικής ενέργειας.

Από τον Reid ορίστηκαν τρεις πιθανοί μηχανισμοί κατάρρευσης ενισχυμένων κυκλικών σωλήνων αλλά και ενισχυμένων ελλειπτικών. Αυτές οι τρεις περιπτώσεις είναι σωλήνες με μικρή γωνία τοποθέτησης των ενισχύσεων, σωλήνες με οριζόντια τοποθέτησή τους και σωλήνες με μεγάλη γωνία τοποθέτησης αυτών των στηρίξεων. Διαπιστώθηκε, ότι το αρχικό φορτίο κατάρρευσης ενισχυμένων ελλειπτικών σωλήνων, εξαρτάται τόσο από την αναλογία των αξόνων της έλλειψης b/a , όσο και από τη γωνία στηρίγματος.

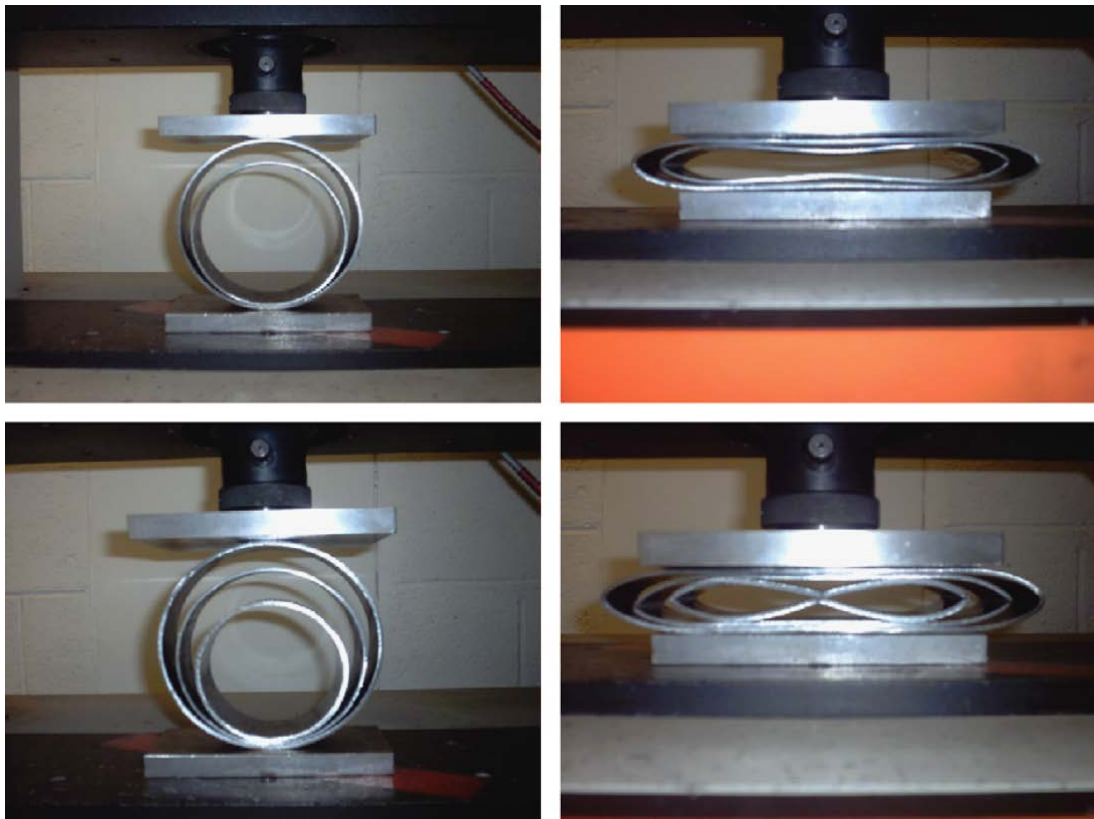


Εικόνα 2.4 Συμμετρική και μη-Συμμετρική παραμόρφωση ελλειπτικών σωληνώσεων με 0° γωνία ενισχύσεων

Στη δημοσίευση των Wu & Camrey παρουσιάστηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα ενισχυμένων ελλειπτικών σωλήνων που συμπιέζονται από άκαμπτες πλάκες. Αυτό έγινε για να επιβεβαιώσουν τα αριθμητικά και θεωρητικά

αποτελέσματα στην αρχική τους δημοσίευση. Διαπιστώθηκε ότι για την αναλογία $b/a= 1$ δηλαδή για κυκλικούς σωλήνες, τα αρχικά φόρτια κατάρρευσης που υπολογιζόντουσαν από υπολογιστικές μεθόδους ήταν συγκρίσιμα με τα πειραματικά ειδικά για μικρές γωνίες των στηριγμάτων. Ωστόσο για μεγάλες γωνίες τοποθέτησης των ενισχύσεων τα πειραματικά αποτελέσματα ήταν πολύ χαμηλότερα από τα θεωρητικά και σύμφωνα με τους συγγραφείς, αυτό οφείλεται στο ότι οι σωλήνες είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι στις γεωμετρικές ατέλειες.

Ο Morris ανέλυσε την οιονεί στατική πλευρική καταπόνηση ένθετων συστημάτων σωλήνων ανάμεσα σε άκαμπτες πλάκες, τόσο πειραματικά όσο και αριθμητικά. Αυτοί οι απορροφητές ενέργειας που αποτελούνται από σύστημα δυο και τριών σωλήνων, τοποθετηθήκαν σε μια συνεπίπεδη (In Plane), διάταξη όπως φαίνεται στην **εικόνα 2.5**.



Εικόνα 2.5 Συνεπίπεδη (*in plane*) διάταξη κυλίνδρων

Αυτός ο όρος περιγράφει δυο ή περισσότερους σωλήνες, διαφορετικών διαμέτρων, οι οποίοι έχουν τοποθετηθεί ο ένας μέσα στον άλλο και οι άξονες τους βρίσκονται σε παραλληλία. Αυτού του είδους οι απορροφητές ενέργειας

συμπιεστήκαν από επίπεδες απαραμόρφωτες πλάκες σε ταχύτητα 3mm/min έτσι ώστε να εξασφαλιστεί ότι δεν θα υπήρχε η εμφάνιση δυναμικών φαινομένων. Παρουσιάστηκε με αυτόν τον τρόπο ότι τέτοια συστήματα είναι κατάλληλα για εφαρμογές όπου οι χωρικοί περιορισμοί είναι πολύ σημαντικοί στον σχεδιασμό ενός εξαρτήματος, χωρίς όμως να υπάρχει συμβιβασμός στις απαιτήσεις απορρόφησης ενέργειας.

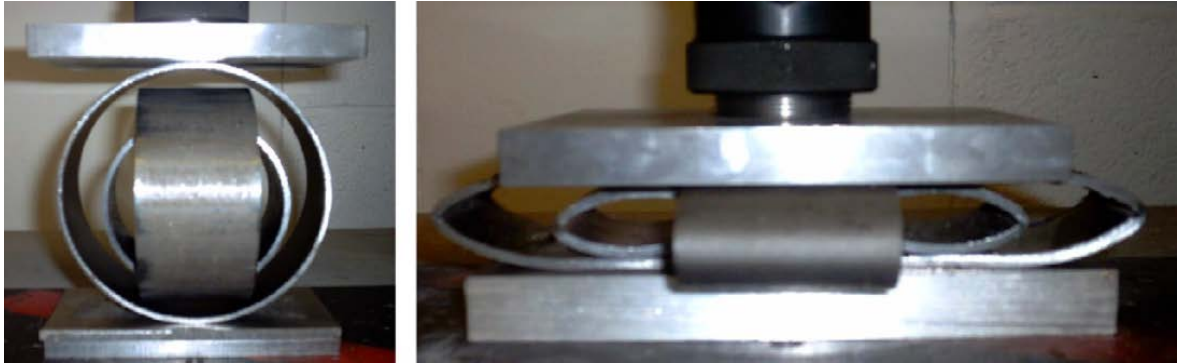
Επίσης ο Morris, ανέλυσε την αντίδραση μετά την κατάρρευση ένθετων συστημάτων σωλήνων με πλευρικούς χωρικούς περιορισμούς όπως φαίνεται στην **εικόνα 2.6**. Στη μελέτη αυτή φαίνεται πως η παρουσία των εξωτερικών περιορισμών επιτρέπουν σε μεγαλύτερο όγκο του υλικού εντός της δομής της διάταξης να παραμορφώνεται πλαστικά μετά τη φάση της κατάρρευσης, απορροφώντας έτσι περισσότερη ενέργεια. Ένθετα συστήματα, αποτελούμενα από μικρού μήκους σωλήνες διαφορετικών διαμέτρων τοποθετημένων ο ένας μέσα στον άλλο σε έκκεντρη διάταξη. Και οι δυο τεχνικές, πειραματική και υπολογιστική, χρησιμοποιήθηκαν για να αναλύσουν την οιονεί-στατική αντίδραση τέτοιων συστημάτων. Τα αριθμητικά αποτελέσματα που εξήχθηκαν βρεθήκαν σε σχετική συμφωνία με τα πειραματικά.



Εικόνα 2.6 Κατάρρευση ένθετων συστημάτων σωλήνων με πλευρικούς χωρικούς περιορισμούς.

Σε μια σχετική εργασία του ο Morris τροποποίησε το συνεπίπεδο (In Plane) σύστημα, έτσι ώστε ο κεντρικός σωλήνας να είναι περιστρεμμένος κατά 90° δημιουργώντας έτσι ένα έκκεντρο σύστημα (out of plane) όπως αυτό φαίνεται στην **εικόνα 2.7**. Με αυτό το τρόπο, η απόκριση δύναμης- παραμόρφωσης άλλαξε από μη-μονοτονική χωρίς όμως να θυσιάζεται η ικανότητα σε απορρόφηση ενέργειας. Η

οιονεί-στατική πλευρική συμπίεση, επιτεύχθηκε χρησιμοποιώντας διαφορετικές συσκευές.



Εικόνα 2.7 Έκκεντρο σύστημα (out of plane) κυλίνδρων

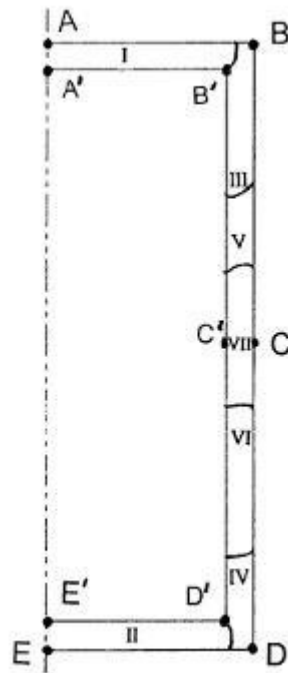
2.3 Θεωρητική Προσέγγιση του Μηχανισμού κατάρρευσης

Η συνολική ανάλυση της ολικής παραμόρφωσης ακόμα και της απλούστερης κατασκευής είναι πολύ περίπλοκη. Γι' αυτό το λόγο συνήθως χρησιμοποιούνται απλουστευτικές υποθέσεις οι οποίες οδηγούν σε κατά προσέγγιση εκφράσεις της σχέσης φορτίου-παραμόρφωσης.

Ειδικότερα, όταν η κάμψη είναι η λειτουργία που κυριαρχεί κατά την παραμόρφωση του δοκιμίου, είναι το πλέον σύνηθες να υποθέτουμε ότι το υλικό είναι τέλεια πλαστικό και ότι δημιουργούνται πλαστικές αρθρώσεις –άξονες- σε κρίσιμα τμήματα της σωλήνωσης. Η γεωμετρία της δομής τροποποιείται με την παραδοχή ότι τα άκαμπτα τμήματα υποβάλλονται σε περιορισμένες περιστροφές γύρω από τις πλαστικές αρθρώσεις και έτσι το φορτίο μπορεί να αυξηθεί πέρα από το όριο κατάρρευσης του υλικού.

2.4 Πλευρική κατάρρευση σωλήνων ορθογωνικής και τετραγωνικής διατομής

Για τη μελέτη σωλήνων ορθογωνικής και τετραγωνικής διατομής είναι βολικό να χωριστεί η διαδικασία παραμόρφωσης σε τρία στάδια: αρχικό, ενδιάμεσο και τελικό. Επίσης θα μελετηθεί μόνο το δεξί μισό μέρος των σωλήνων αφού είναι συμμετρικοί ως προς το διαμήκη άξονά τους. Έτσι χωρίζουμε ένα σωλήνα στη μέση (ζώνες I έως VII) και ορίζουμε τα σημεία A, B, C, D, E και τα A', B', C', D', E' που βρίσκονται στην εξωτερική και εσωτερική πλευρά του σωλήνα αντίστοιχα όπως φαίνεται παρακάτω στην **εικόνα 2.8**.



Εικόνα 2.8 Διατομή σωλήνα ορθογωνικής διατομής πριν την συμπίεση (ζώνες και σημεία ενδιαφέροντος)

Στην αρχή της διαδικασίας οι πάνω και κάτω επιφάνειες του σωλήνα (AB και DE) βρίσκονται σε επαφή με την άνω και κάτω πλάκα αντίστοιχα. Σε αυτή τη φάση, μπορούμε να θεωρήσουμε τις πάνω και κάτω πλευρές ως δοκούς που δέχονται κατανομημένο φορτίο καθ' όλο το μήκος τους. Οι δοκοί φέρουν δύο στηρίξεις στα άκρα τους και (τις κατακόρυφες πλευρές) και η συνεχιζόμενη συμπίεση προκαλεί κάμψη των φορτισμένων δοκών αλλά και

λυγισμό των κατακόρυφων πλευρών. Τα κεντρικά σημεία των δύο δοκών χάνουν αρχικά επαφή με τις πλάκες.

Με την περαιτέρω συμπίεση η περιοχή της επαφής σταδιακά μειώνεται μέχρις ότου να περιοριστεί σε μια μικρή περιοχή μεταξύ των ακραίων σημείων Β και D. Καθώς η παραμόρφωση εξελίσσεται, η τριβή μεταξύ της διεπιφάνειας σωλήνα-πλακών αντιστέκεται στην κάμψη των οριζόντιων πλευρών. Οι λεγόμενοι πλαστικοί αρμοί σχηματίζονται στα σημεία τομής των κάθετων και οριζόντιων πλευρών Β και D. Στη συνέχεια αρχίζει να εμφανίζεται το φαινόμενο του λυγισμού στις κατακόρυφες πλευρές όπου και αναπτύσσεται ένα δεύτερο σύνολο πλαστικών αρμών.

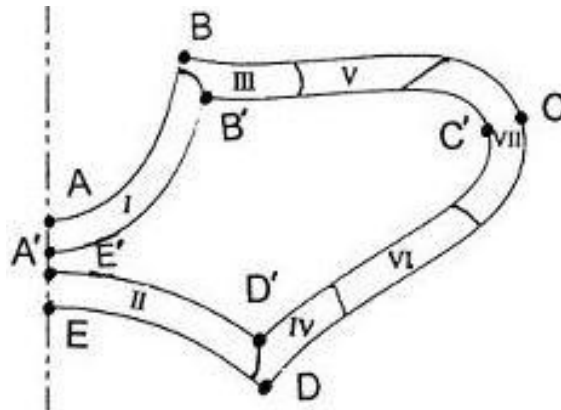
Δεδομένου ότι η κάμψη στις άνω και κάτω πλευρές του σωλήνα είναι διαφορετική λόγω του άνισου πάχους τους, η θέση των πλαστικών αρμών δεν είναι στο μέσο του ύψους του. Έτσι η απόσταση του αρμού από το παχύτερο οριζόντιο τοίχωμα είναι μεγαλύτερη σε σχέση με το λεπτότερο και αντιστρόφως. Στο τέλος της αρχικής φάσης της διαδικασίας συμπίεσης, οι πλαστικοί αρμοί έχουν αναπτυχθεί πλήρως στα σημεία τομής των κάθετων και οριζόντιων πλευρών Β και D. Ωστόσο ο σχηματισμός των πλαστικών αρμών στη ζώνη VII βρίσκεται ακόμα σε πρώιμο στάδιο. Το φορτίο στις πλάκες παίρνει μια μέγιστη τιμή λίγο πριν την έναρξη του λυγισμού στη ζώνη VII.

Κατά το ενδιάμεσο στάδιο της συμπίεσης, η μεταφορά του φορτίου από τις πλάκες στο σωλήνα γίνεται μέσα σε μικρές περιοχές γύρω από τα σημεία Β και D. Περεταίρω παραμόρφωση εντοπίζεται κυρίως μέσα στην ζώνη VII. Ο σωλήνας γύρω από την ζώνη VII κινείται συνεχώς προς τα έξω, με αποτέλεσμα ο λεγόμενος μοχλοβραχίονας (δηλαδή η απόσταση μεταξύ του σημείου δράσης του φορτίου και του κέντρου της ζώνης VII) να αυξάνει συνεχώς. Ως εκ τούτου, το φορτίο της πλάκας τείνει να μειωθεί και συνεπώς η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης παρουσιάζει αρνητική κλίση. Στο τέλος του ενδιάμεσου σταδίου, ο λυγισμός των κατακόρυφων προχωρά τόσο πολύ ώστε το τμήμα BC γίνεται σχεδόν επίπεδο και στιγμιαία έρχεται σε επαφή με τις πλάκες.

Ακριβώς μετά, η επαφή σωλήνα-πλάκας μετατοπίζεται απότομα από το σημείο Β προς το σημείο C (κοντά στον αρμό στο σημείο C). Τώρα το φορτίο των πλακών αρχίζει να αυξάνεται σχετικά απότομα μέχρι να φτάσει μια δεύτερη κορυφή.

Ωστόσο η δεύτερη αυτή κορυφή της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης ποτέ δεν φτάνει το ύψος της πρώτης. Ο αρμός στο σημείο C προσπαθεί να κυλήσει προς τη ζώνη VI. Περαιτέρω παραμόρφωση εντοπίζεται στις περιοχές γύρω από το σημείο C. Το φορτίο αρχίζει να μειώνεται και πάλι και η παραμόρφωση συνεχίζεται με τη μείωση του φορτίου

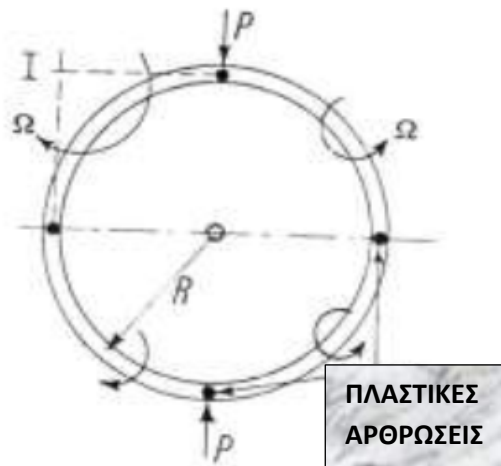
μέχρι οι άνω και κάτω πλευρές να έρθουν σε επαφή μεταξύ τους. Μετά τη διαδικασία συμπίεσης ο σωλήνας έχει την παρακάτω μορφή της εικόνας 2.9.



Εικόνα 2.9 Διατομή σωλήνα ορθογωνικής διατομής μετά την συμπίεση (ζώνες και σημεία ενδιαφέροντος)

2.5 Πλευρική κατάρρευση σωλήνων κυλινδρικής διατομής

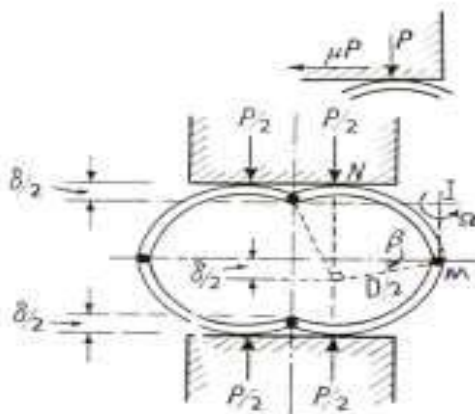
Ένας λεπτός κυκλικός σωλήνας δεν είναι αρκετά εύκαμπτος όσον αφορά την μέση ακτίνα $-R-$ όταν αυτός υποβάλλεται σε φορτίο $-P-$ κατά την διάμετρο του και μπορεί να καταρρεύσει πλαστικά μόνο όταν δημιουργηθούν τέσσερις τέτοιες αρθρώσεις, που θα του επιτρέψουν να λειτουργήσει σαν ένας μηχανισμός **εικόνα 2.10**. Αυτές οι αρθρώσεις συμπεραίνουμε ότι εμφανίζονται στις περιοχές όπου παρουσιάζεται η μέγιστη ελαστικότητα.



Εικόνα 2.10 Σημεία Εμφάνισης Πλαστικών Αρθρώσεων σε Κυκλικούς Σωλήνες

Εάν το κέντρο του σωλήνα παραμένει σταθερό, τότε κατά την κατάρρευση, τα τέσσερα αυτά άκαμπτα τμήματα που υπάρχουν μεταξύ των αρθρώσεων περιστρέφονται με γωνιακή ταχύτητα Ω γύρω από ένα στιγμιαίο κέντρο – I – και η δύναμη – P – κινείται προς το κέντρο του σωλήνα με ταχύτητα $R \cdot \Omega$.

Όταν μια συνεχιζόμενη, οιονεί-στατική θλίψη ενός σωλήνα πραγματοποιείται μεταξύ παράλληλων και άκαμπτων επιφανιών, είναι προφανές ότι η δύναμη σύνθλιψης – P – αυξάνεται ταυτόχρονα με την μείωση της κάθετης διαμέτρου του δοκιμίου. Όσο η κάθετη παραμόρφωση συνεχίζεται, παρατηρούμε ότι οι αρχικές τέσσερις αρθρώσεις παραμένουν, αλλά τα σημεία όπου εφαρμόζονται οι δυνάμεις συμπίεσης απομακρύνονται από την κεντρική γραμμή χωριζόμενες σε δυο ίσες συνιστώσες $P/2$. Ενδεικτικά η παραμόρφωση αναμένεται να είναι όπως στο σχήμα



Εικόνα 2.11 Διαδικασία Παραμόρφωσης σε Κυκλικούς Σωλήνες

Κάθε τέταρτο του δακτυλίου του σωλήνα μπορεί να θεωρηθεί ότι περιστρέφεται γύρω από το παραμένον άκαμπτο τμήμα.

Ανάλυση της ισοδύναμης παραμόρφωσης στα χαρακτηριστικά σημεία

Η πλευρική συμπίεση ενός σωλήνα κυλινδρικής διατομής απεικονίζεται ως ένα πρόβλημα επίπεδης παραμορφωσιακής κατάστασης η οποία παρουσιάζει διπλή συμμετρία της παραμόρφωσης. Έτσι μελετάται μόνο το άνω δεξιά τμήμα του σωλήνα και ονομάζεται τομέας, ο οποίος χωρίζεται σε τρεις ζώνες (I, II και III).

Μπορεί κανείς να επισημάνει δώδεκα χαρακτηριστικά σημεία (A1, A2, A3, G1, G2, G3, H1, H2, H3, B1, B2, και B3) και δύο ευθείες (A1A3 και B1B3).

Τα σημεία A2, G2, H2 και B2 βρίσκονται στο κέντρο των ευθειών A1A3, G1G3, και B1B3 αντίστοιχα.

Οι ευθείες H2H3 και G1G3 βρίσκονται υπό κλίση 30° και 60° αντίστοιχα σε σχέση με τον οριζόντιο άξονα (εικόνα 2.12).

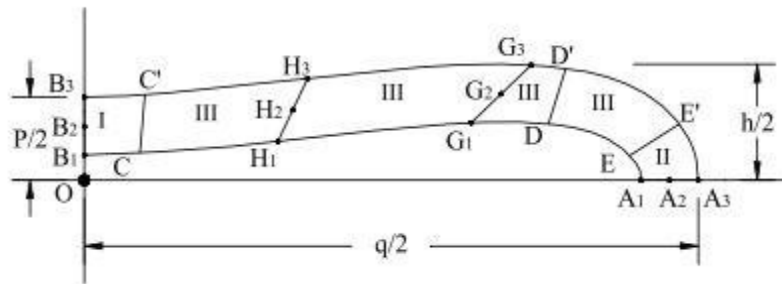
Η ισοδύναμη παραμόρφωση στα σημεία A1, A2 και A3 αυξάνεται κατά τη διαδικασία της συμπίεσης. Συγκρίνοντας τις τρεις τιμές μεταξύ τους μπορεί κανείς να δει ότι αυτή του σημείου A1 είναι η μεγαλύτερη, του A2 έχει μια μέση τιμή και του A3 είναι μικρότερη. Αυτό υποδεικνύει πως ο σωλήνας υπόκειται σε συμπίεση και κάμψη. Η αύξηση των τιμών της ισοδύναμης παραμόρφωσης εμφανίζεται λόγω ύπαρξης αυξανόμενης αξονικής δύναμης και κάμψης στην ευθεία A1A3.

Στα σημεία G1, G2 και G3 η ισοδύναμη παραμόρφωση παραμένει σχεδόν ίση με το μηδέν μέχρι ένα στάδιο της συμπίεσης και έπειτα αυξάνει απότομα. Αυτή η διακύμανση δείχνει πως η περιοχή γύρω από την ευθεία G1G3 μένει απαραμόρφωτη πριν από αυτό το στάδιο της συμπίεσης και στη συνέχεια η παραμόρφωση αυξάνει στην γύρω περιοχή. Η θέση της ευθείας G1G3 σε αυτό το στάδιο παραμένει ακριβώς αριστερά από το σημείο επαφής σωλήνα- πλακών.

Η ισοδύναμη παραμόρφωση στα σημεία H1 και H3 παραμένει αρχικά σχεδόν ίση με το μηδέν μέχρι ένα στάδιο της συμπίεσης. Έπειτα ξαφνικά αρχίζει να αυξάνει. Με περαιτέρω συμπίεση η ισοδύναμη παραμόρφωση των δύο σημείων μειώνεται ξανά και τελικά παίρνει πάλι σχεδόν μηδενική τιμή. Η ισοδύναμη παραμόρφωση στο

σημείο H2 παραμένει μηδέν καθ' όλη τη διάρκεια της συμπίεσης.

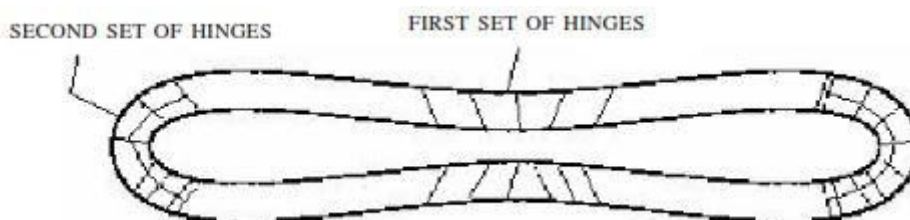
Με την εφαρμογή πλευρικής συμπίεσης η ισοδύναμη παραμόρφωση στα σημεία B1 και B3 αρχικά αυξάνεται ομοιόμορφα και στη συνέχεια μειώνεται πλησιάζοντας το μηδέν. Η ισοδύναμη παραμόρφωση στο σημείο B1 είναι σχετικά με αυτή του σημείου B3 μεγαλύτερη. Αυτό ισχύει γιατί το σημείο B3 είναι πιο κοντά στις πλάκες.



Εικόνα 2.12 Διατομή σωλήνα κυλινδρικής διατομής μετά την συμπίεση (ζώνες και σημεία ενδιαφέροντος)

Ανάπτυξη πλαστικών αρμών

Είναι σαφές πως οι πλαστικοί αρμοί σχηματίζονται στις ζώνες I και II (περιοχή γύρω από τον κατακόρυφο οριζόντιο άξονα συμμετρίας αντίστοιχα). Οι ευθείες B1B3 και A1A3 κινούνται πάνω στους άξονες γ και x αντίστοιχα κατά τη διάρκεια της πλευρικής συμπίεσης. Άρα οι συντεταγμένες των σημείων αυτών αλλάζουν συνεχώς. Επίσης σε αυτά τα σημεία δεν εμφανίζεται καθόλου διατμητική τάση. Μετά από ένα σημείο της συμπίεσης η ζώνη I μπαίνει στην πλαστική περιοχή και ακολουθεί η ζώνη II. Ο κυλινδρικός σωλήνας γίνεται σταδιακά επίπεδος λόγω του σχηματισμού τεσσάρων πλαστικών αρμών στους άξονες συμμετρίας.



Εικόνα 2.13 Εμφάνιση πλαστικών αρμών σε σωλήνα κυλινδρικής διατομής

2.4 Δείκτες ενεργειακής απορρόφησης

Όπως επισημάνθηκε προηγουμένως, το *Crashworthiness* μελετά την ικανότητα απορρόφησης της κινητικής ενέργειας κατά την κρούση και μετατροπής της σε πλαστικό έργο από τους ενεργειακούς απορροφητές. Συνεπώς, κρίνεται απαραίτητο να περιγραφούν οι τρόποι με τους οποίους μετράται η απορρόφηση ενέργειας από τις συγκεκριμένες διατάξεις.

Το βασικότερο εργαλείο, από το οποίο προκύπτουν όλοι οι δείκτες ενεργειακής απορρόφησης, είναι η καμπύλη φορτίου/ μετατόπισης. Μετρώντας ταυτόχρονα το φορτίο που ασκεί το έμβολο στο δοκίμιο και τη μετατόπισή του, προκύπτουν τα σημεία τα οποία σχηματίζουν την καμπύλη φορτίου- μετατόπισης. Προφανώς, το φορτίο που ασκεί το έμβολο στο δοκίμιο, είναι και η δύναμη που δέχεται το δοκίμιο (Νόμος Newton δράσης- αντίδρασης) και η μετατόπιση του εμβόλου αποτελεί αντίστοιχα τη βράχυνση του δοκιμίου. Συνεπώς, η καμπύλη φορτίου/μετατόπισης του εμβόλου αποτελεί ταυτόχρονα και καμπύλη φορτίου/βράχυνσης του δοκιμίου.

Ένα από τα μεγέθη που προκύπτουν από την καμπύλη και είναι ενδεικτικό για τη μελέτη της ενεργειακής απορρόφησης, είναι το μέγιστο φορτίο **P_{max}**. Στις περισσότερες περιπτώσεις κατάρρευσης το αρχικό τοπικό μέγιστο αποτελεί και το ολικό μέγιστο στην καμπύλη. Για το λόγο αυτό, το αρχικό μέγιστο (**peak**) φορτίο, αποτελεί ένδειξη του τρόπου απορρόφησης ενέργειας και του ποσού που μπορεί να παραλάβει το δοκίμιο.

Ένα εξίσου σημαντικό μέγεθος που προκύπτει από την καμπύλη φορτίου- μετατόπισης, είναι το μέσο φορτίο **P_{mean}**. Το μέσο φορτίο είναι ένα θεωρητικό μέγεθος, που μας επιτρέπει να έχουμε μια εικόνα για το πόσο φορτίο κατά μέσο όρο μπορεί να παραλάβει το δοκίμιο κατά την κατάρρευση.

Το σημαντικότερο μέγεθος που προκύπτει από την καμπύλη είναι το πλαστικό έργο. Έτσι, υπολογίζοντας το εμβαδό του χωρίου που εμπεριέχεται κάτω από την καμπύλη φορτίου/μετατόπισης, υπολογίζουμε την απορροφούμενη ενέργεια, δηλαδή το πλαστικό έργο **W**.

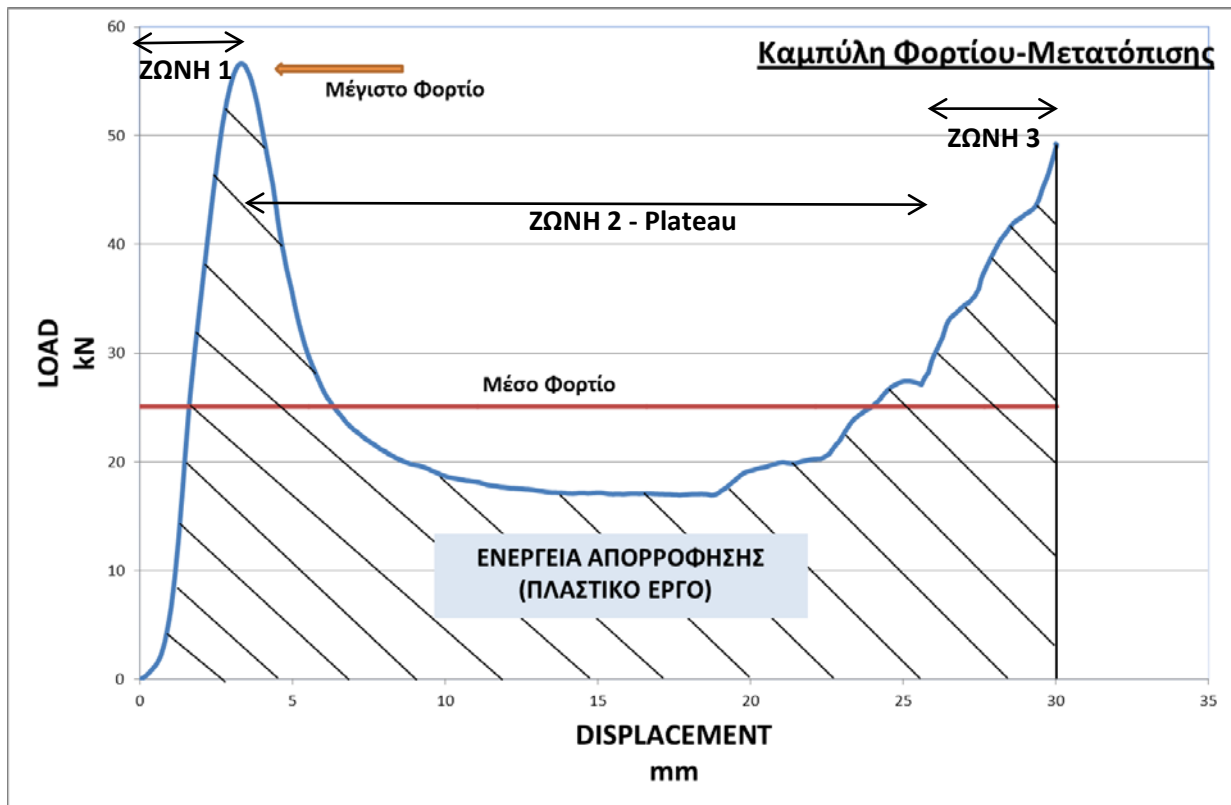
Ο πιο εύκολος τρόπος υπολογισμού του W είναι με το μέσο φορτίο και τη μετατόπιση. Έτσι με χρήση της σχέσης $W = P_m \times I$, όπου I : βράχυνση δοκιμίου, υπολογίζουμε την ενέργεια που απορροφάται από το δοκίμιο.

Μελετώντας την κατάρρευση των ενεργειακών απορροφητών, μας ενδιαφέρει να επιτυγχάνουμε ομοιομορφία στην κατανομή του φορτίου. Ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου, που εμφανίζεται στη βιβλιογραφία ως **Crush Force Efficiency**, ορίζεται ως ο λόγος του αρχικού μέγιστου φορτίου προς το μέσο φορτίο (**c.f.e.** = initial peak load/mean load) και είναι αδιάστατο μέγεθος ή μετράται σε επί τις εκατό ποσοστό %.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, θέλουμε να έχουμε όσο το δυνατό μεγαλύτερη ομοιομορφία στην κατανομή του φορτίου, συνεπώς επιδιώκουμε ο λόγος αυτός να είναι κοντά στη μονάδα. Εξασφαλίζοντας ομοιομορφία στην κατανομή φορτίου, προσπαθούμε να επιτύχουμε προοδευτική κατάρρευση του δοκιμίου, κάτι που είναι πολύ σημαντικό στην απορρόφηση κρουστικών φορτίων.

Στο **διάγραμμα 2.14** παρουσιάζονται τα βασικά μεγέθη που μπορούν να υπολογιστούν από ένα διάγραμμα Φορτίου/Παραμόρφωσης, που αναφέρθηκαν προηγούμενα, εκτός από τον δείκτη ομοιομορφίας φορτίου δεν φαίνεται στο διάγραμμα γιατί είναι ένα καθαρά υπολογιστικό μέγεθος.

Μπορούμε να παρατηρήσουμε, ότι σε κάθε διάγραμμα φορτίου μετατόπισης η καμπύλη που απεικονίζεται από τη σειρά των δεδομένων, δημιουργεί τρεις διακριτές περιοχές-ζώνες σε αυτό. Η πρώτη φαίνεται από την αρχή της κρούσης μέχρι ένα αρχικό πρώτο μέγιστο του φορτίου το οποίο δημιουργείται λόγω της επαφής του εμβόλου με τα δοκίμια και της δημιουργίας πλαστικής-μόνιμης παραμόρφωσης ενός ή και περισσότερων δοκιμίων. Διακόπτεται από μια μεγάλης κλίσης πτώση της καμπύλης του φορτίου.



Διάγραμμα 2.14 Παρουσίαση χαρακτηριστικών μεγεθών και περιοχών στην καμπύλη φορτίου –μετατόπισης.

Η δεύτερη περιοχή-ζώνη της καμπύλης βρίσκεται μετά το πρώτο αυτό αρχικό μέγιστο και συνήθως, ανάλογα με την μορφή των δοκιμών, του τύπου της καταπόνησης (Αξονική, Πλευρική, Αναστροφή, Απότμηση) αλλά και του είδους του υλικού, ακολουθεί μία σχεδόν σταθερή τιμή με μικρές μη ομοιόμορφες διακυμάνσεις και είναι αυτό που φαίνεται στο μεγαλύτερο μήκος της μετατόπισης και ονομάζεται πλατό (Plateau) του διαγράμματος.

Η τρίτη περιοχή-ζώνη του διαγράμματος οριοθετείται από το τέλος του πλατό και παρουσιάζει μια μονοτονικής σκλήρυνσης περιοχή που σχετίζεται με την μεγάλη μείωση του όγκου του υλικού και την δημιουργία και νέων αρθρώσεων.

Κεφάλαιο 3.

Πειραματική διαδικασία

3.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο της εργασίας θα γίνει περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε. Συγκεκριμένα, θα γίνει παρουσίαση των δοκιμών, της μηχανής στην οποία διεξήχθησαν τα πειράματα και τις συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιήθηκαν.

3.2 Περιγραφή του πειραματικού εξοπλισμού

Η πειραματική διεργασία της παρούσας διπλωματικής εργασίας, έγινε σε μηχανική πρέσα (μηχανισμός κοχλία-περικόχλιου), με ονομαστικό φορτίο 100kN. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η πρέσα δοκιμών INSTRON 4482 της παρακάτω εικόνας για την πλευρική στατική καταπόνηση των δοκιμών.



Εικόνα 3.1 Η πρέσα που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές

Η πρέσα INSTRON 4482 αποτελείται όπως παρατηρείται από τρία κύρια μέρη:

- α) Το πλαίσιο μορφής O, που συμπεριλαμβάνει το τραπέζι στερέωσης του δοκιμίου και τον μηχανισμό κίνησης του εργαλείου διαμόρφωσης,
- β) τον μηχανισμό της κινητής κεφαλής και
- γ) τον πίνακα ελέγχου, ο οποίος διαθέτει θύρα επικοινωνίας συμβατή με το πρωτόκολλο IEEE, συνδεδεμένη μέσω παράλληλης θύρας με ηλεκτρονικό υπολογιστή.

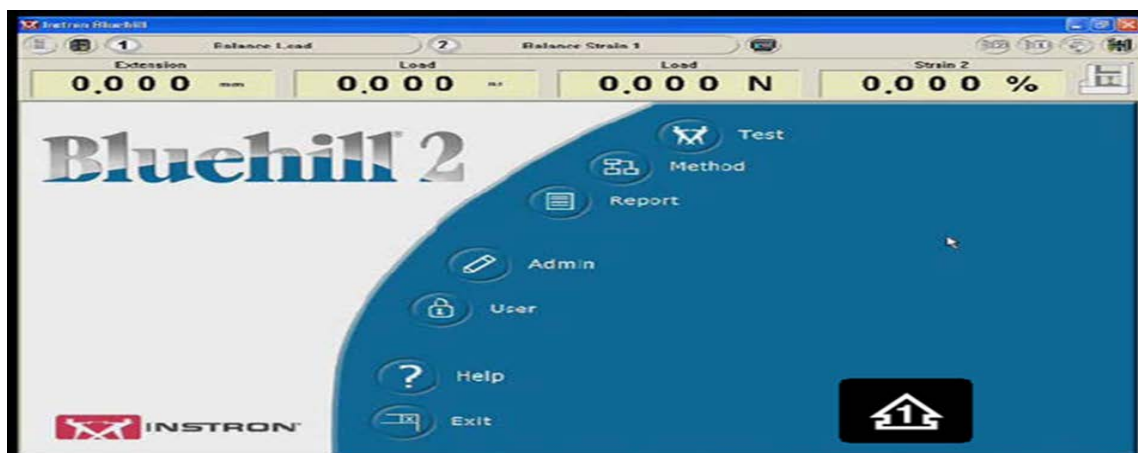
Τα κύρια λειτουργικά χαρακτηριστικά της πρέσας είναι:

1. Ονομαστική δύναμη 100kN
2. Μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής 500mm x min⁻¹
3. Ταχύτητα επιστροφής κινητής κεφαλής στην αρχική θέση 600mm x min⁻¹
4. Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο στη μέγιστη ταχύτητα 75kN
5. Μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής σε μέγιστο φορτίο 250mm min⁻¹
6. Ευαισθησία κεφαλής πρέσας 2mV V⁻¹

Ο πίνακας ελέγχου έχει ενσωματωμένο μικροεπεξεργαστή που αναλαμβάνει τη ρύθμιση όλων των παραμέτρων κατεργασίας και την επεξεργασία των απαραίτητων υπολογισμών. Αποτελείται από τέσσερις κύριους τομείς:

1. Τον κεντρικό τομέα
2. Τον τομέα οθονών υγρών κρυστάλλων
3. Τον τομέα οριοθέτησης
4. Τον τομέα κίνησης κεφαλής

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την συλλογή και την καταγραφή των αποτελεσμάτων είναι το Bluehill 2.



Εικόνα 3.2 Αρχική οθόνη του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε στην επεξεργασία των μετρήσεων.

Πρόκειται για ένα πλήρες πακέτο εφαρμογών που δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να χρησιμοποιήσει τυποποιημένες μεθόδους δοκιμών ή να τις τροποποιήσει κατ'επιλογήν.

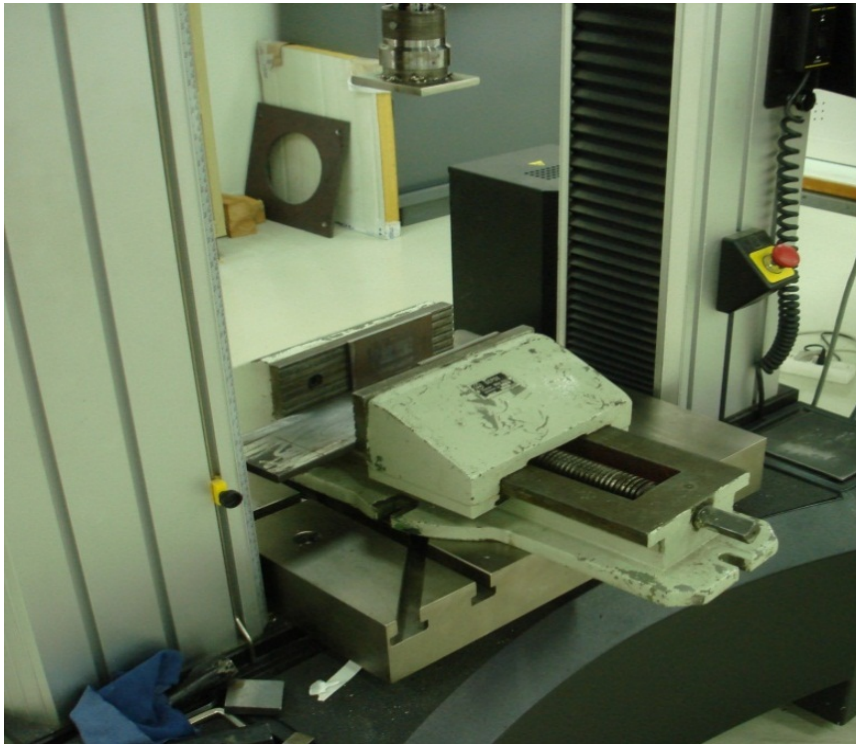
Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στην οθόνη του ηλεκτρονικού υπολογιστή σε πραγματικό χρόνο. Μετά το πέρας της διαδικασίας υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης αναφοράς με τα ζητούμενα μεγέθη και εξαγωγής αρχείου *.raw με όλα τα αριθμητικά δεδομένα που καταγράφηκαν. Αυτά τα αρχεία χρησιμοποιήθηκαν και επεξεργάστηκαν αργότερα μέσω του πακέτου Excel έτσι ώστε να εξαχθούν τα παρακάτω παρουσιαζόμενα διαγράμματα και τα χαρακτηριστικά στοιχεία κάθε πειράματος.

3.3 Κατασκευή της πειραματικής διάταξης

Για τις ανάγκες του πειράματος, κατασκευάστηκε από το προσωπικό του εργαστηρίου διάταξη κατάλληλη για να μπορεί να προσαρμοστεί στην πρέσα του εργαστηρίου, με μια παράλληλη πλάκα διαστάσεων 90x80 mm συγκολλημένη σε αυτή.

Για τις ανάγκες επίσης των πειραμάτων, χρησιμοποιήθηκε μία μέγγενη από το εργαστήριο του κτηρίου Ξ, εξασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο στιβαρότητα και σταθερότητα στη διάρκεια των διαδικασιών και επίσης οριοθετώντας έτσι τον χώρο των

πειραμάτων, χωρίς να χρειάζεται κάθε φορά να ρυθμίζουμε από την αρχή τα πλευρικά όρια του συστήματος.



Εικόνα 3.3 Η μέγγενη και οι μεταλλικές πλάκες κατάλληλα προσαρμοσμένες στην πρέσα INSTRON

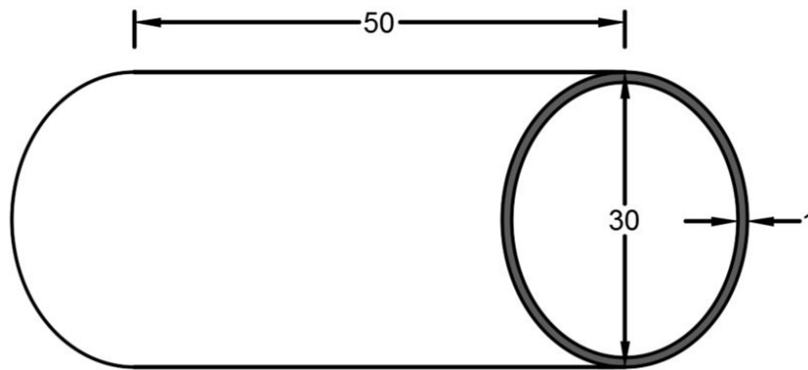
Επίσης χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικές πλάκες αρκούντως λειασμένες για την αποφυγή κατά το δυνατόν παρουσίας τριβών στα πλευρικά όρια του πειράματος.

3.4 Δοκίμια

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα ήταν από κράμα αλουμινίου. Η μέθοδος κατασκευής των δοκιμίων έγινε με κοπή κυλινδρικών σωλήνων ώστε να πάρουμε κάθε φορά την επιθυμητή διάσταση.

Συνολικά κατασκευάστηκαν **84** δοκίμια, **42** με πάχος υλικού *1,0mm* και **42** με πάχος υλικού *1,5mm*. Κάθε ένα από τα παραπάνω δοκίμια μετά την κοπή του, υποβλήθηκε σε κατεργασία λείανσης στις ακμές του, εσωτερικά και εξωτερικά, έτσι ώστε πιθανές δυνάμεις από τριβή να είναι το δυνατόν οι ελάχιστες.

3.5 Διαστάσεις δοκιμίων



Εικόνα 3.4 Σκαρίφημα του δοκιμίου που χρησιμοποιήθηκε στις εργαστηριακές δοκιμές

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα, είχαν τις παρακάτω διαστάσεις:

- ✓ Μήκος $L=50\text{mm}$,
- ✓ Εξωτερική διάμετρος $D_{\text{εξ}}=30\text{mm}$ και
- ✓ δύο διαφορετικά πάχη δοκιμίων $t_1=1\text{mm}$ και $t_2=1,5\text{mm}$

3.6 Απαραμόρφωτα παρεμβλήματα

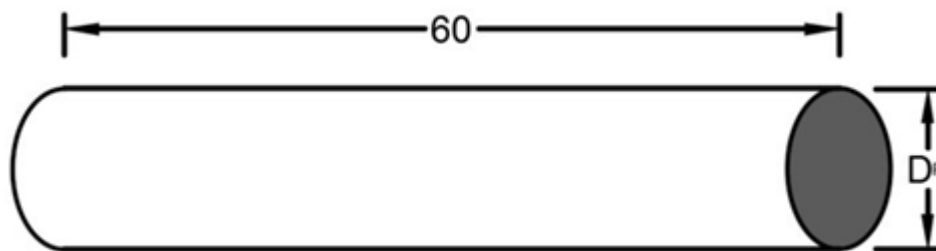
Τα απαραμόρφωτα παρεμβλήματα που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα, κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο με κατεργασία τόννευσης από το προσωπικό του εργαστηρίου. Το υλικό τους είναι μασίφ χάλυβας και απαιτήθηκαν για τις ανάγκες των διαφορετικών διατάξεων των πειραμάτων παρεμβλήματα σε τέσσερις διαφορετικές διαστάσεις όσον αφορά στη διάμετρό τους.

Αυτές ήταν οι ακόλουθες:

$D_{R1} = 12,40 \text{ mm}$, $D_{R2} = 7,50 \text{ mm}$, $D_{R3} = 5,10 \text{ mm}$ & $D_{R4} = 4,60 \text{ mm}$

Το μήκος των παρεμβλημάτων ήταν σταθερό και ίσο με $L=60\text{mm}$.

Το μήκος αυτό επιλέχθηκε σκόπιμα μεγαλύτερο από εκείνο των δοκιμών, έτσι ώστε να διασφαλιστεί ότι η κατανομή του φορτίου από την πρέσα θα ήταν όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη και δεν θα υπήρχαν διαρροές πειραματικού υλικού εκτός των ορίων της διάταξης.



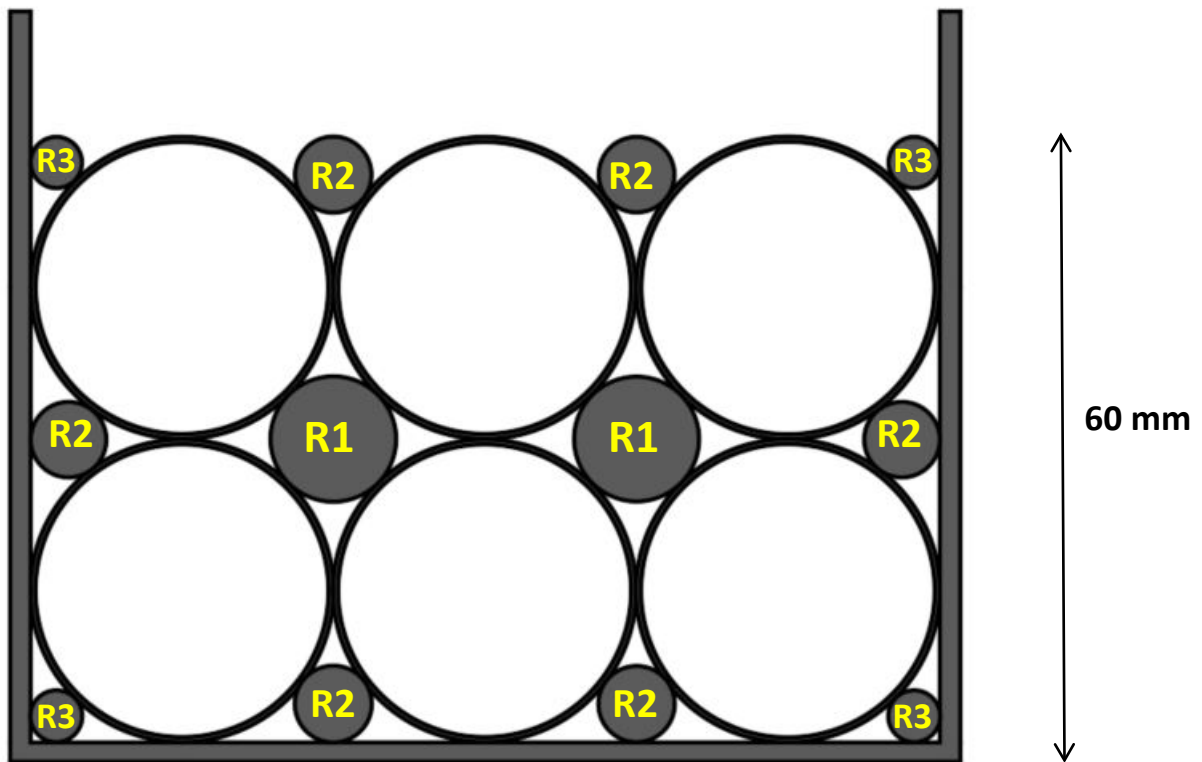
Εικόνα 3.5 Σκαρίφημα των παρεμβλημάτων που χρησιμοποιήθηκαν στις εργαστηριακές δοκιμές

3.7 Διατάξεις Πειραματικών Διαδικασιών και τρόπος διεξαγωγής πειραμάτων

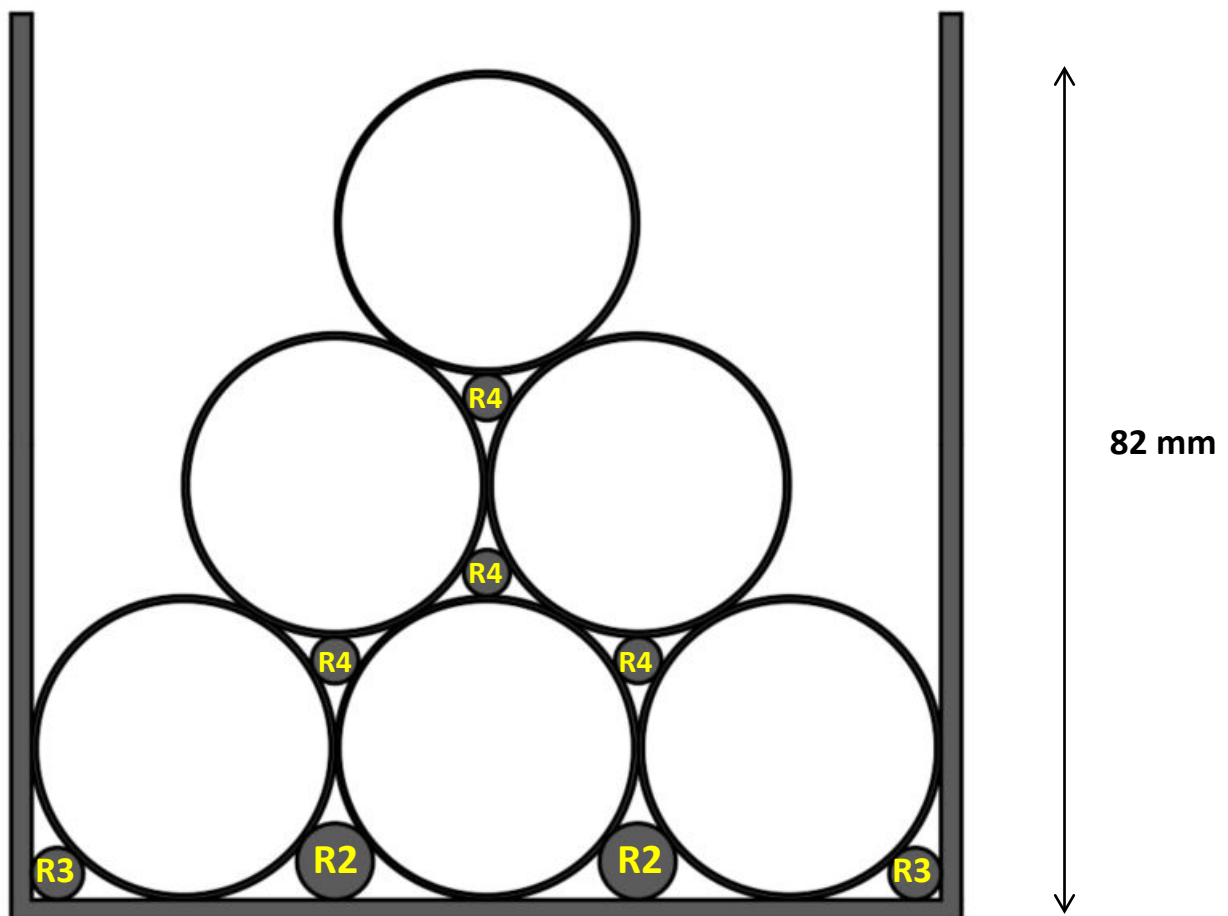
Οι πειραματικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε δύο διαφορετικών σχηματισμών διατάξεις. Της ορθογωνικής και της τριγωνικής. Η πρώτη, στην παρουσίαση των πειραμάτων αναφέρεται ως -rect- από το *rectangular* (ορθογωνικό) και η δεύτερη ως -tri- από το *triangle* (τριγωνικό) για λόγους κωδικοποίησης και συντομίας.

Στην περίπτωση της ορθογωνικής διάταξης το ύψος της ήταν 60mm, με διαδρομή εμβόλου 30mm.

Στην περίπτωση της τριγωνικής διάταξης το ύψος της ήταν 82mm, με διαδρομή εμβόλου 52mm.



Εικόνα 3.6 Παρουσίαση ορθογωνικής διάταξης των πειραμάτων με τα παρεμβλήματα



Εικόνα 3.7 Παρουσίαση τριγωνικής διάταξης των πειραμάτων με τα παρεμβλήματα

Οι διαστάσεις τόσο των κυλινδρικών δοκιμίων όσο και των άκαμπτων παρεμβλημάτων έχουν παρουσιαστεί προηγουμένα στο παρόν κεφάλαιο.

Και στις δύο μορφές διατάξεων, η ταχύτητα με την οποία το έμβολο πραγματοποιούσε την διαδρομή ήταν **10mm/min**, ταχύτητα η οποία είναι πάρα πολύ καλή όσον αφορά την προσέγγιση στατικών συνθηκών.

Τα πειράματα διεξήχθησαν με τους εξής τρόπους και σειρά. Αρχικά πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα των ορθογωνικών διατάξεων των ενός και των ενάμιση χιλιοστών, χωρίς αλλά και με την χρήση των παραμόρφωτων παρεμβλημάτων. Δευτερευόντως, έλαβαν χώρα τα πειράματα των τριγωνικών διατάξεων με τον ίδιο τρόπο. Πρώτα τα δοκίμια πάχους ενός χιλιοστού, χωρίς και με τα παρεμβλήματα και κατόπιν αυτά των ενάμιση με τον ίδιο τρόπο.

Αφού παρατηρήθηκαν οι τελικές μορφές των δοκιμίων από τα οχτώ πρώτα πειράματα και ταυτόχρονα αξιολογήθηκαν τα δεδομένα που παρείχε μέσω του Η/Υ η πρέσα, αποφασίστηκε η διεξαγωγή περαιτέρω πειραμάτων, διατάξεων μικτού πάχους **-t-** δοκιμίων και με την παρουσία ή μη των απαραμόρφωτων παρεμβλημάτων.

Όλα τα παραπάνω πειράματα, που είναι και το κύριο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, παρουσιάζονται και σχολιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 4.

Παρουσίαση Πειραματικών Αποτελεσμάτων

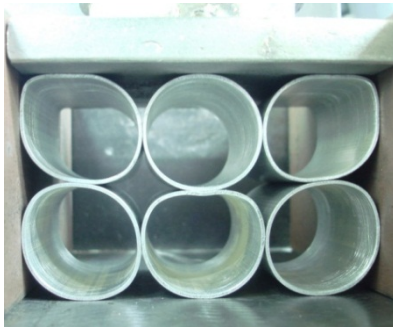
4.1 Γενικά

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται τα πειράματα που διεξήχθησαν στο εργαστήριο και αφορούν την εγκάρσια φόρτιση κυλίνδρων διατεταγμένων σε ορθογώνια ή τριγωνική διάταξη με και χωρίς παρεμβλήματα.

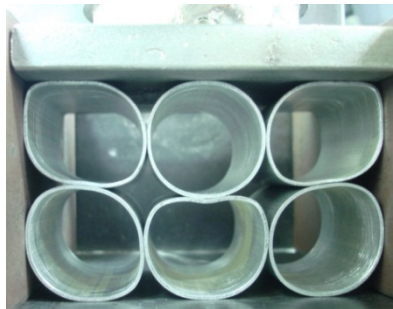
Συγκεκριμένα απεικονίζονται καταρχήν στις αντίστοιχες φωτογραφίες η σταδιακή αύξηση της παραμόρφωσης της διάταξης που λαμβάνει χώρα ως αποτέλεσμα της επιβολής της εξωτερικής δύναμης του εμβόλου της πρέσας και υπό τη μορφή πίνακα τα χαρακτηριστικά του κάθε πειράματος. Στη συνέχεια υπό τη μορφή διαγραμμάτων, παρουσιάζεται η μεταβολή του φορτίου σε σχέση με τη μετατόπιση, ενώ τέλος σχολιάζονται οι μεταβολές που απεικονίζονται, δίνοντας έμφαση στα χαρακτηριστικά σημεία που εντοπίζονται και επισημαίνονται σε κάθε διάγραμμα.

4.2 Ορθογωνική Διάταξη Πάχους 1.0mm απουσία άκαμπτων παρεμβλημάτων

Σημείο 1 στα 4.7 mm



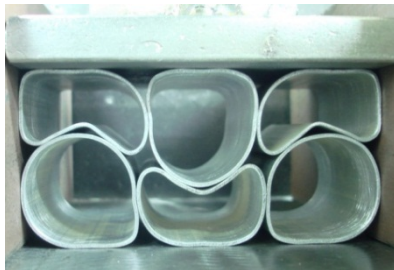
Σημείο 2 στα 6.1mm



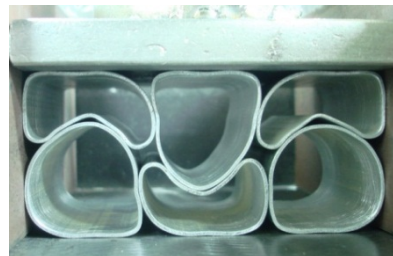
Σημείο 3 στα 11.4mm



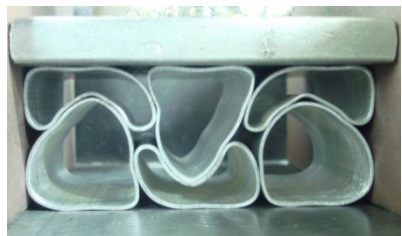
Σημείο 4 στα 16.5mm



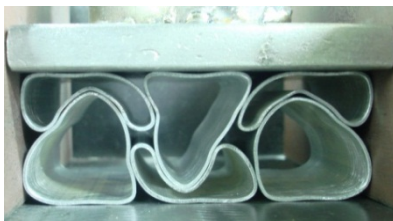
Σημείο 5 στα 19.7mm



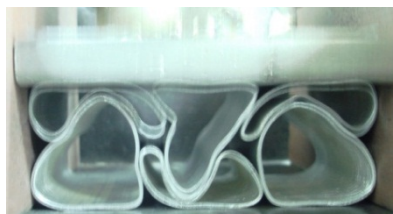
Σημείο 6 στα 24.1mm



Σημείο 7 στα 27.1mm



Σημείο 8 στα 29.9mm



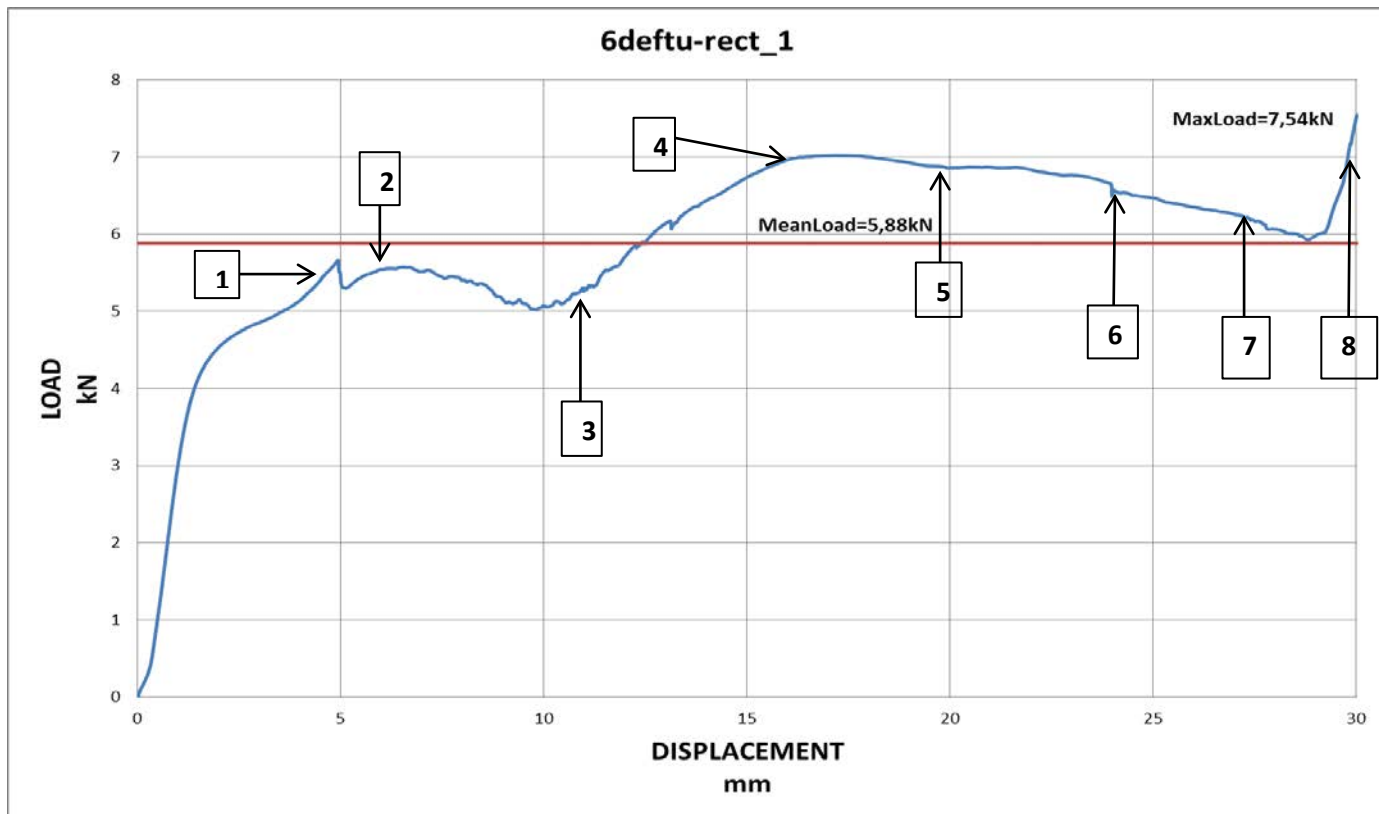
Σημείο 9 στα 30.0mm



ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Διαδρομή Εμβόλου:	S=30mm
Μέσο Φορτίο:	P _{mean} =5,88kN
Μέγιστο Φορτίο:	P _{max} =7,55kN
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου:	c.f.e.=0,77
Ενέργεια απορρόφησης:	E _{abs} =176,4Joule

Διαγραμματική Απεικόνιση του πειράματος



Σχόλια επί του πειράματος :

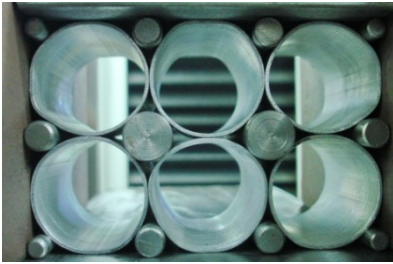
Στα 4,7 mm διαδρομής του εμβόλου παρατηρούμε ότι το υλικό έχει υποχωρήσει ομαλά και ομοιόμορφα, περισσότερο εμφανώς στα επάνω δοκίμια και λιγότερο στα κάτω. Σημειώνουμε την δημιουργία των αρθρώσεων οι οποίες είναι και υπεύθυνες για την αύξηση απορρόφησης της ενέργειας του φορτίου.

Από τα 11,4mm έως τα 16,5mm δημιουργούνται αρθρώσεις και στην κάτω σειρά της διάταξης προκαλώντας έτσι και δεύτερη μεγάλη ένδειξη αύξησης φορτίου. Μέχρι τα 27mm περίπου το διάγραμμα ακολουθεί ένα σχετικά σταθερό μέγεθος φορτίου. Η τελική απότομη αύξηση σε αυτό οφείλεται κυρίως στην επαφή απέναντι εσωτερικών πλευρών των δοκιμίων λόγω περιορισμού του χώρου.

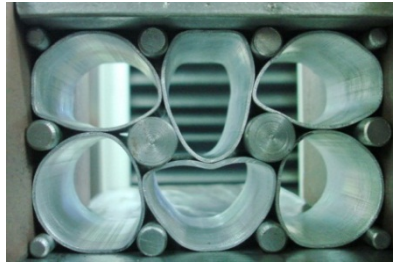
Ως προς το τελικό αποτέλεσμα, έχουμε έναν πολύ καλό συντελεστή ομοιομορφίας $c_{fe}=0,77$ αλλά η Ενέργεια Απορρόφησης $E_{abs}=176,4$ Joule είναι πολύ χαμηλή.

4.3 Ορθογωνική Διάταξη Πάχους 1.0mm παρουσία άκαμπτων παρεμβλημάτων

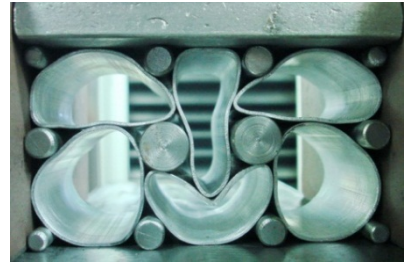
Σημείο 1 στα 2.5mm



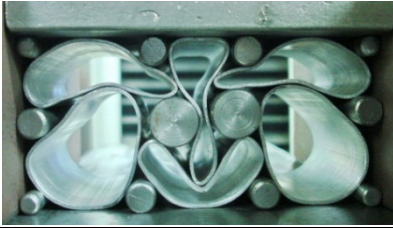
Σημείο 2 στα 5.0mm



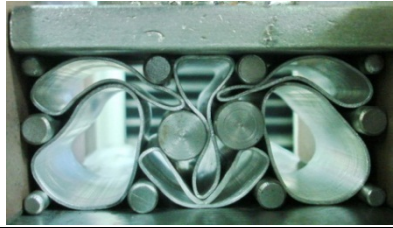
Σημείο 3 στα 11.4mm



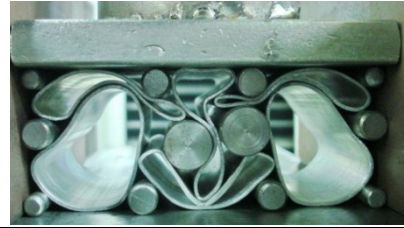
Σημείο 4 στα 17.9mm



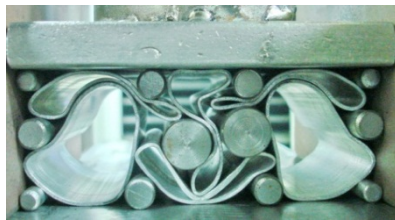
Σημείο 5 στα 22.6mm



Σημείο 6 στα 25.6mm



Σημείο 7 στα 27.5mm



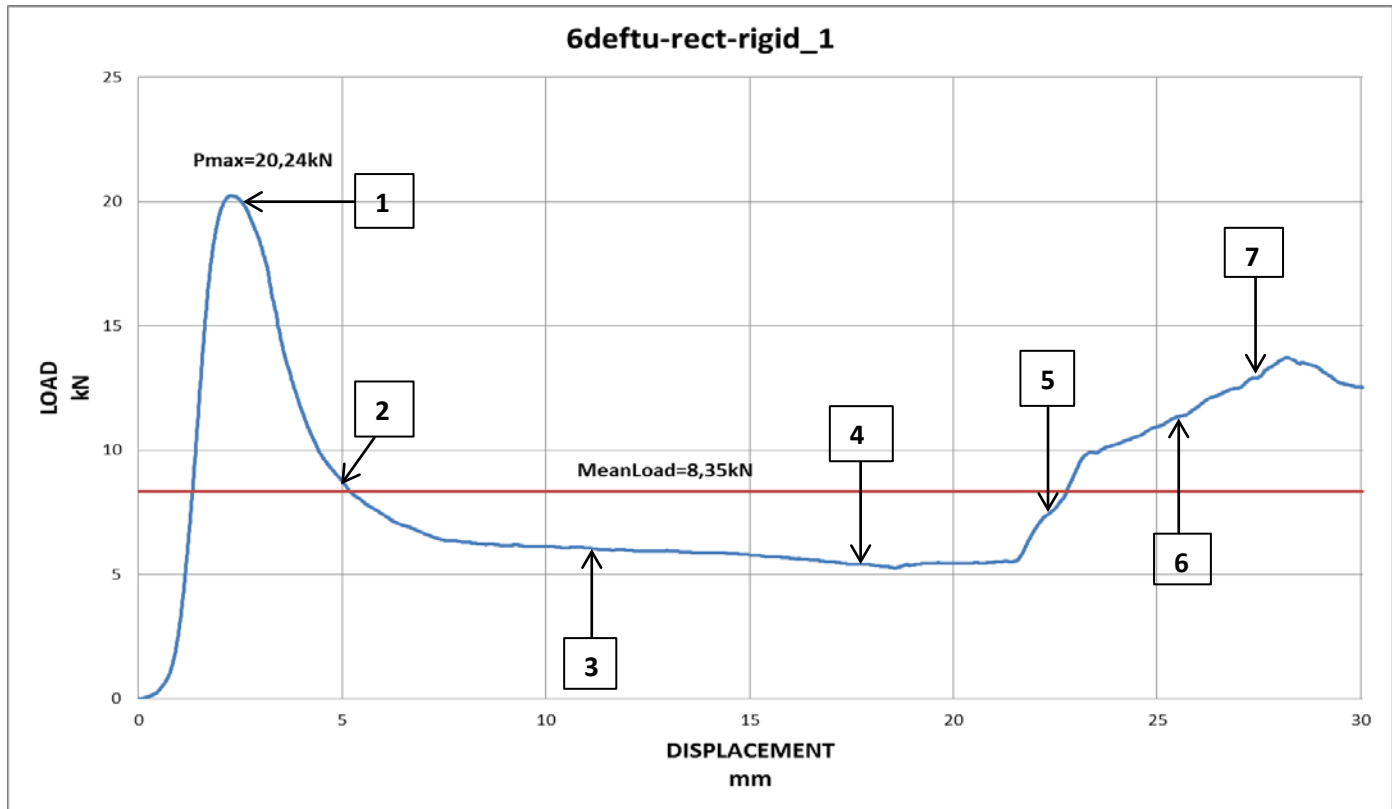
Σημείο 8 στα 30.0mm



ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Διαδρομή Εμβόλου:	S=30mm
Μέσο Φορτίο:	P _{mean} =8,35kN
Μέγιστο Φορτίο:	P _{max} =20,24kN
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου:	c.f.e.=0,41
Ενέργεια απορρόφησης:	E _{abs} =250,5Joule

Διαγραμματική Απεικόνιση του πειράματος



Σχόλια επί του πειράματος :

Η παρουσία των άκαμπτων παρεμβλημάτων έχει επιταχύνει την δημιουργία των αρθρώσεων στα δοκίμια γι' αυτό και παρατηρείται η πολύ απότομη αρχική αύξηση του φορτίου στα 2,5mm. Μετά την επαναφορά της δύναμης σε περιοχή λίγο κάτω από το μέσο φορτίο κοντά στα 5mm διαδρομής, αυτή παραμένει σχετικά σταθερή έως και τα 22,6mm.

Στο κάτω μεσαίο δοκίμιο φαίνεται η δημιουργία μικρής ρωγμής η οποία όμως δεν καταλήγει σε κατάρρευση εξαιτίας του μικρού πάχους του δοκιμίου. Η τελική αύξηση οφείλεται στον περιορισμό του χώρου και στη επαφή μεταξύ τους των δοκιμίων.

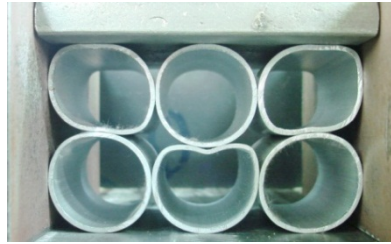
Τα τελικά δοκίμια είναι ομοιόμορφα παραμορφωμένα. Επίσης έχουμε έναν μέτριο συντελεστή ομοιομορφίας $c_{fe}=0,44$ και μία μικρή αύξηση στην ενέργεια απορρόφησης $E_{abs}=250,5\text{ Joule}$.

4.4 Ορθογωνική Διάταξη Πάχους 1.5mm απουσία άκαμπτων παρεμβλημάτων

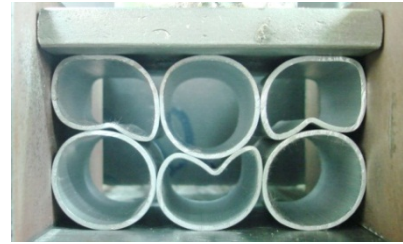
Σημείο 1 στα 2.6mm



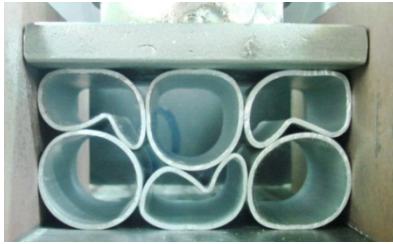
Σημείο 2 στα 5.4mm



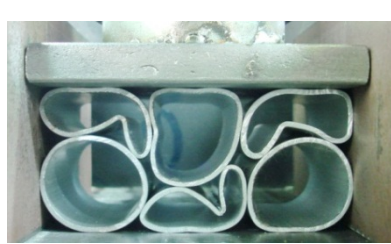
Σημείο 3 στα 8.0mm



Σημείο 4 στα 12.4mm



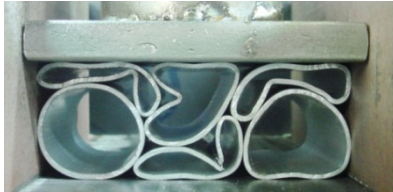
Σημείο 5 στα 17.1mm



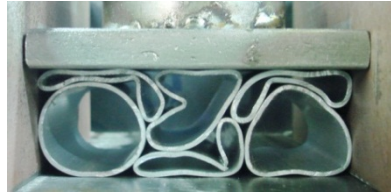
Σημείο 6 στα 19.4mm



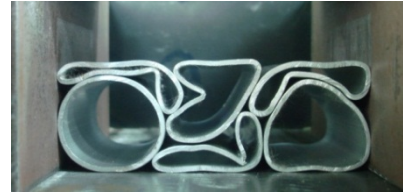
Σημείο 7 στα 24.5mm



Σημείο 8 στα 28.9mm



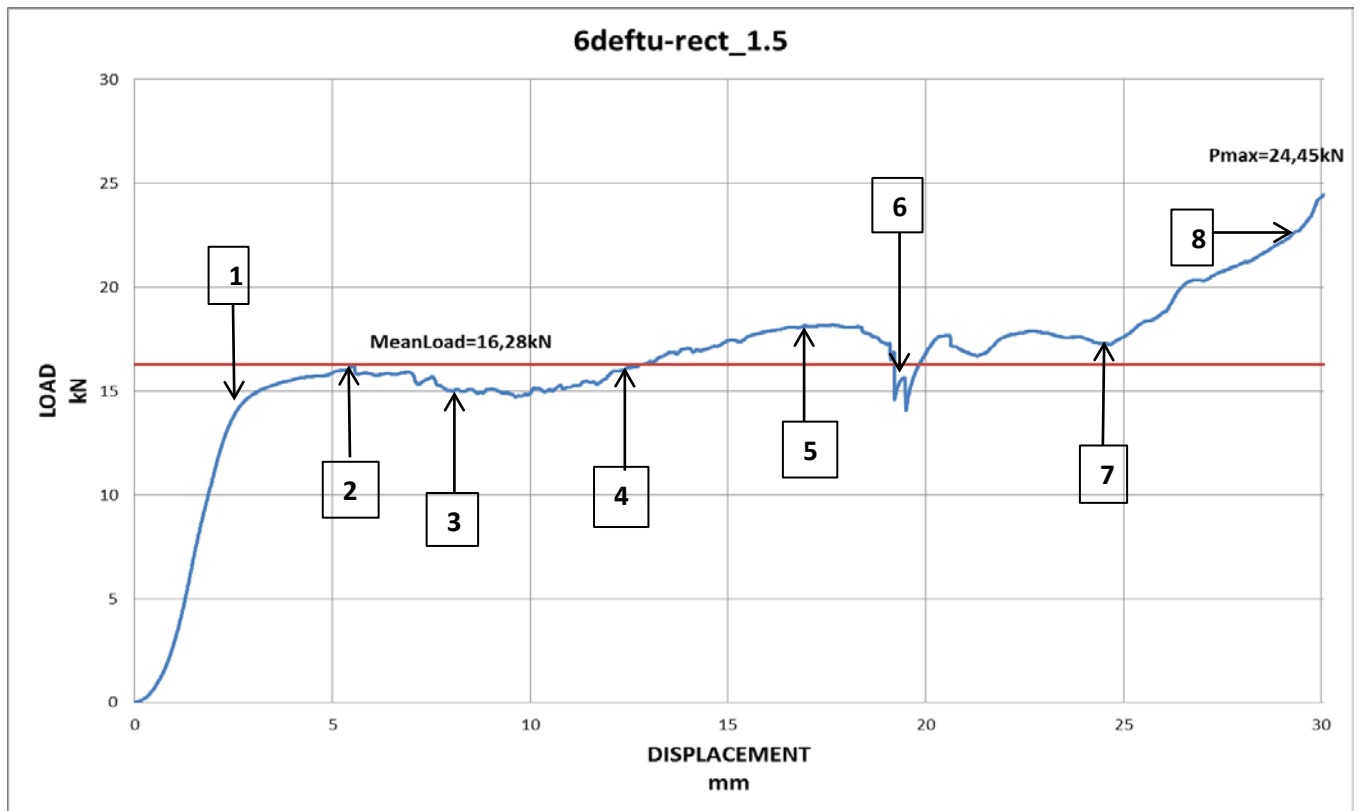
Σημείο 9 στα 30.0mm



ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Διαδρομή Εμβόλου:	S=30mm
Μέσο Φορτίο:	P _{mean} =16,28kN
Μέγιστο Φορτίο:	P _{max} =24,45kN
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου:	c.f.e.=0,66
Ενέργεια απορρόφησης:	E _{abs} =488,4Joule

Διαγραμματική Απεικόνιση του πειράματος



Σχόλια επί του πειράματος :

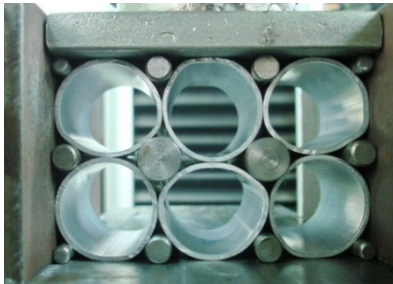
Στα 2,6mm το φορτίο της πλευρικής καταπόνησης έχει φτάσει κοντά στο μέσο φορτίο P_{mean} , έχοντας ξεκινήσει να δημιουργεί τις πλαστικές αρθρώσεις στα δοκίμια και κυρίως στο μεσαίο της κάτω σειράς. Μετά από αυτό το σημείο, παρατηρούμε ότι διατηρείται σχεδόν σταθερή και γύρω από το μέσο φορτίο, με τα δοκίμια να παραμορφώνονται συμμετρικά.

Το μεσαίο δοκίμιο έχει δημιουργήσει μεγάλη καμπυλότητα και τελικά, στα 19mm περίπου διαδρομής του εμβόλου έχουμε την θραύση του στο σημείο ακριβώς που είχαμε την μεγάλη κάμψη. Αυτό στο διάγραμμα παρατηρείται με την κατακόρυφη πτώση της καμπύλης στο συγκεκριμένο σημείο. Από το σημείο εκείνο και μετά, η καμπύλη εξακολουθεί να κινείται ακολουθώντας το πριν την θραύση μοτίβο, ενώ η τελική αύξηση του φορτίου οφείλεται στον περιορισμό του χώρου που έχουν τα δοκίμια για να παραμορφωθούν και στις μεταξύ τους δυνάμεις από επαφές.

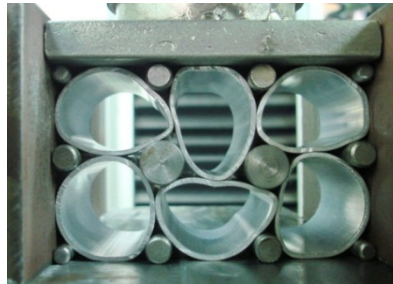
Τα τελικά δοκίμια είναι ομοιόμορφα στρεβλωμένα, ενώ μπορούμε να πούμε ότι οι κάτω ακραίοι σωλήνες δεν συμμετείχαν ιδιαίτερα στην απορρόφηση κρουστικής δύναμης αφού παρέμειναν σε πολύ καλή κατάσταση.

4.5 Ορθογωνική Διάταξη Πάχους 1.5mm παρουσία άκαμπτων παρεμβλημάτων

Σημείο 1 στα 2.3mm



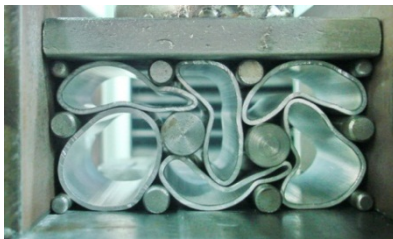
Σημείο 2 στα 3.8mm



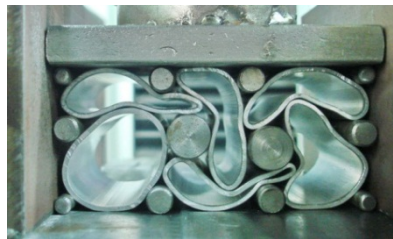
Σημείο 3 στα 9.9mm



Σημείο 4 στα 16.2mm



Σημείο 5 στα 18.4mm



Σημείο 6 στα 20.4mm



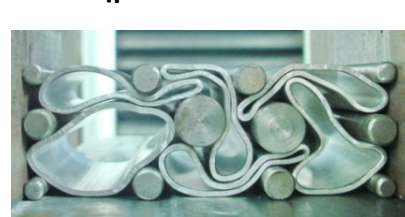
Σημείο 7 στα 26.1mm



Σημείο 8 στα 28.1mm



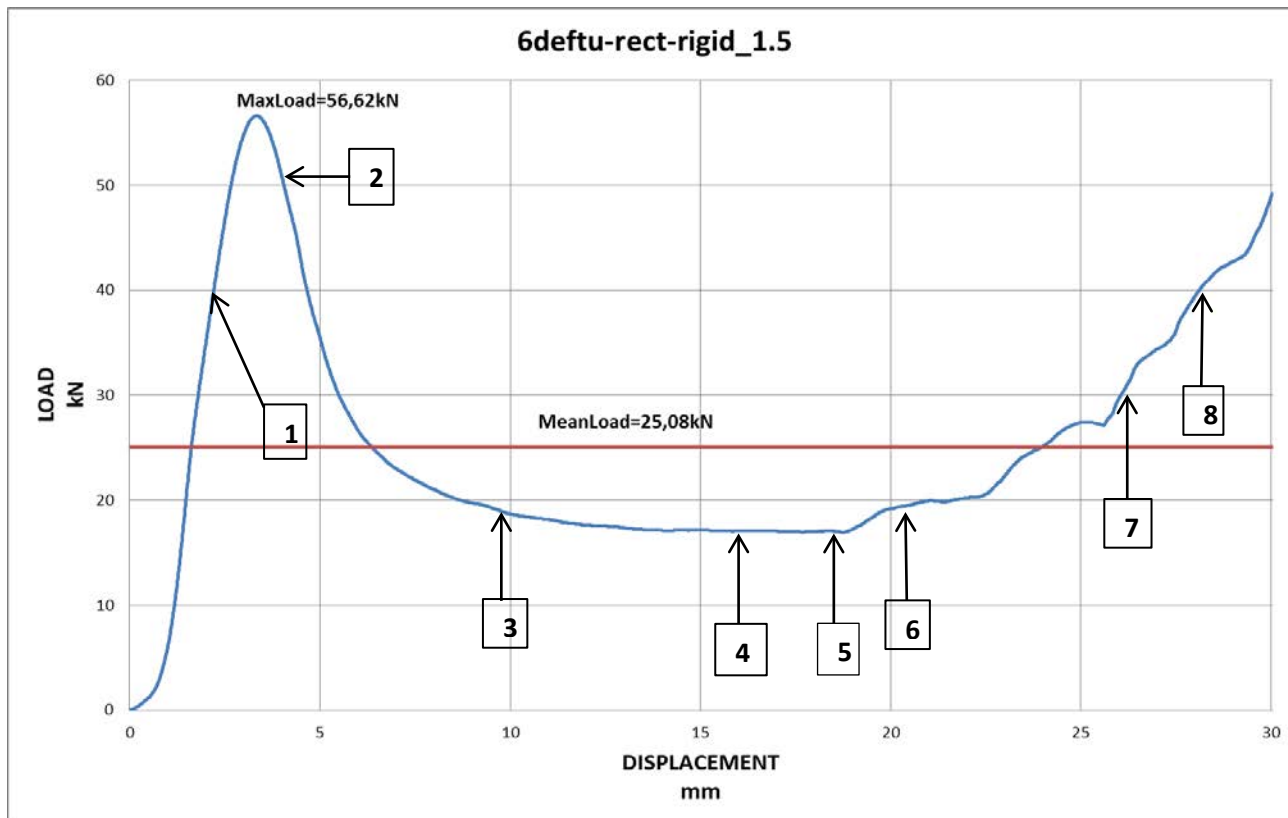
Σημείο 9 στα 30.0mm



ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Διαδρομή Εμβόλου:	S=30mm
Μέσο Φορτίο:	P _{mean} =25,08kN
Μέγιστο Φορτίο:	P _{max} =56,62kN
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου:	c.f.e.=0,44
Ενέργεια απορρόφησης:	E _{absor} =752,4 Joule

Διαγραμματική Απεικόνιση του πειράματος



Σχόλια επί του πειράματος :

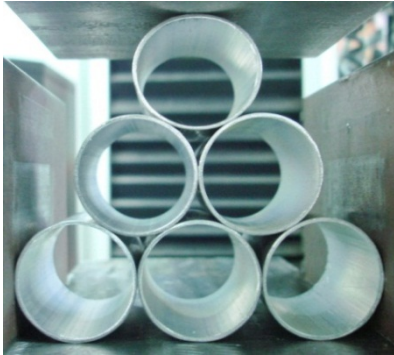
Στα 2,3mm παρατηρούμε την απότομη αύξηση του φορτίου λόγω της εκκίνησης δημιουργίας πλαστικών αρθρώσεων. Τα άκαμπτα παρεμβλήματα είναι υπεύθυνα για την μεγαλύτερη τιμή του φορτίου σε σχέση με το προηγούμενο πείραμα που ήταν ίδιου πάχους. Μετά την αρχική αύξηση βλέπουμε την σχεδόν κατακόρυφη πτώση της καμπύλης και την είσοδο μας στην περιοχή ομοιομορφίας όπου παραμένει μέχρι και σχεδόν τα 22,5mm πολύ μικρές αυξομειώσεις του φορτίου. Παρατηρούμε την ομοιομορφία της παραμόρφωσης στις φωτογραφίες 2, 3, 4,5 & 6.

Από το σημείο εκείνο και ύστερα, έχουμε την άνοδο της καμπύλης του φορτίου όπως φαίνεται από τις φωτογραφίες, λόγω της μείωσης του όγκου των δοκιμίων και των επαφών των εσωτερικών επιφανειών ιδίων δοκιμίων μεταξύ τους.

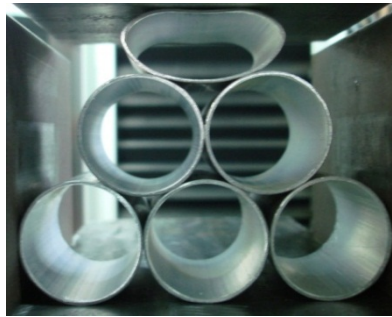
Δεν παρατηρήθηκε καμία θραύση δοκιμίου, ενώ η μεγάλη απορρόφηση ενέργειας είναι κυρίως αποτέλεσμα της αρχικής και τελικής αύξησης της δύναμης, πράγμα που φαίνεται και από τον μικρό συντελεστή ομοιομορφίας **cfe**.

4.6 Τριγωνική Διάταξη Πάχους 1.0mm απουσία άκαμπτων παρεμβλημάτων

Σημείο 1 στα 2.4mm



Σημείο 2 στα 12.0mm



Σημείο 3 στα 17.6mm



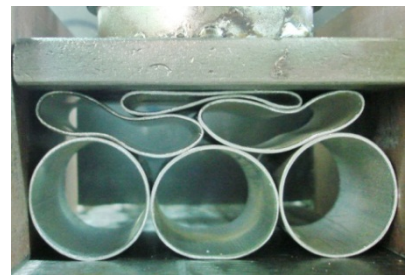
Σημείο 4 στα 26.2mm



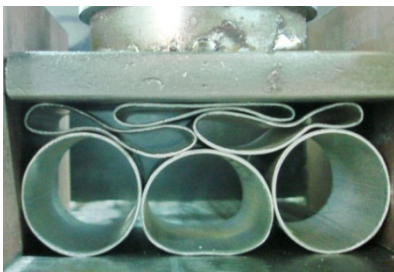
Σημείο 5 στα 35.0mm



Σημείο 6 στα 41.8mm



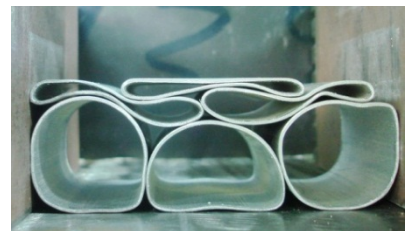
Σημείο 7 στα 45.8mm



Σημείο 8 στα 51.9mm



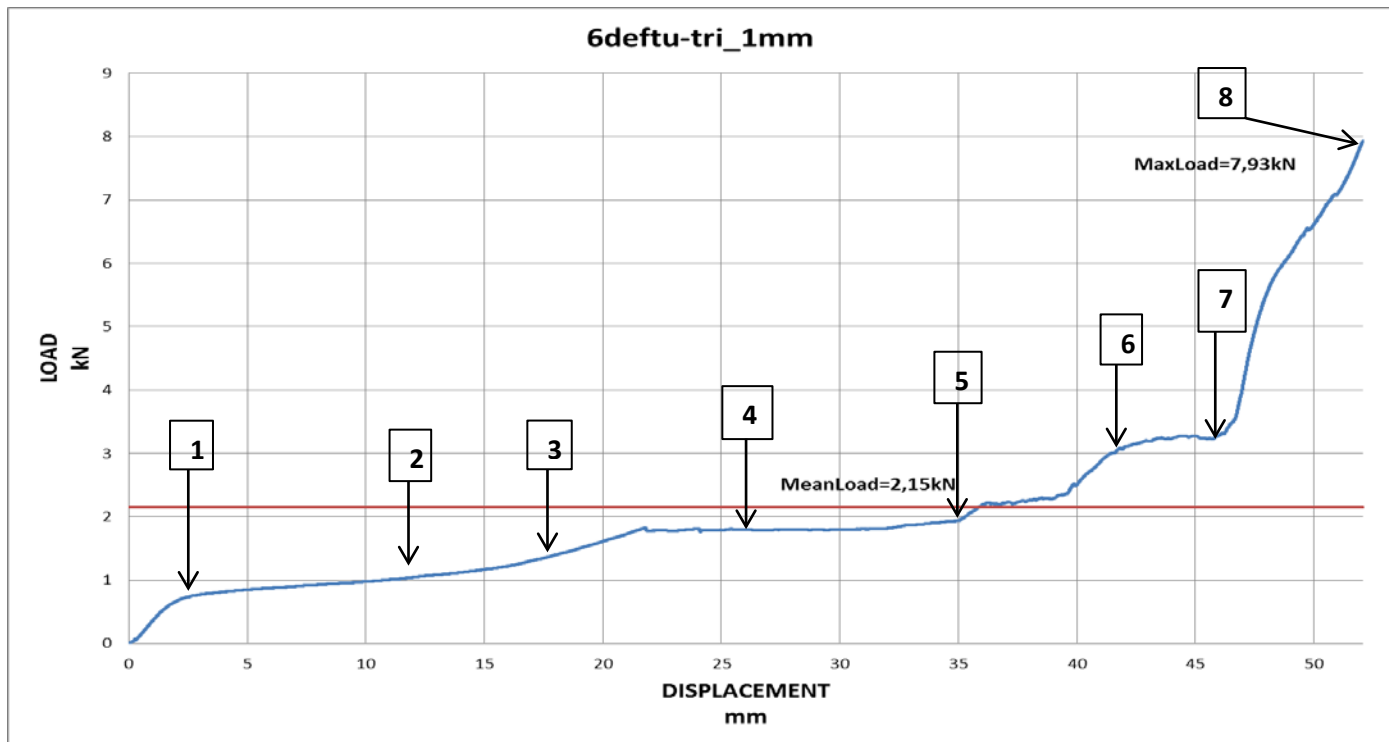
Σημείο 9 στα 52.0mm



ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Διαδρομή Εμβόλου:	S=52
Μέσο Φορτίο:	P _{mean} =2,15kN
Μέγιστο Φορτίο:	P _{max} =7,93kN
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου:	c.f.e.=0,27
Ενέργεια απορρόφησης:	E _{abs} =111,8Joule

Διαγραμματική Απεικόνιση του πειράματος



Σχόλια επί του πειράματος :

Από την αρχή βλέπουμε μία πολύ ομαλή αλλά ταυτόχρονα πολύ μικρής τιμής αύξηση της δύναμης συμπίεσης. Αυτό είναι αποτέλεσμα του μικρού πάχους των δοκιμίων και της μη ύπαρξης τριβών, αφού η διάταξη δεν περιορίζεται αρχικά τουλάχιστον από τις πλευρικές πλάκες. Έτσι, βλέπουμε τις πλαστικές αρθρώσεις να σχηματίζονται πολύ αργά και τις κατώτερες σειρές να μην παίρνουν μέρος στην απορρόφηση ενέργειας, αφού μέχρι και τα 17,5mm περίπου, τα δοκίμια τους παραμένουν απαραμόρφωτα όπως φαίνεται από τις φωτογραφίες 1,2 & 3.

Αντίστοιχα και όταν η δεύτερη σειρά αρχίζει να παραμορφώνεται μετά τα 22mm περίπου βάση διαγράμματος, η τρίτη παραμένει με μικρές μόνο αλλοιώσεις στο κεντρικό δοκίμιο, όπου και αρχίζει η δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων. Η τελική απότομη αύξηση, οφείλεται στην μείωση του όγκου όπου τα δοκίμια μπορούν να παραμορφωθούν και στην επαφή εσωτερικών τοιχωμάτων των ίδιων δοκιμίων μεταξύ τους.

Τελικά το μικρό πάχος των δοκιμίων σε συνδυασμό με την απουσία πλευρικών ορίων για το μεγαλύτερο μήκος μετατόπισης του εμβόλου, δεν δημιουργεί ρωγμές και το ποσό ενέργειας που απορροφά η συγκεκριμένη διάταξη είναι πολύ χαμηλή.

4.7 Τριγωνική Διάταξη Πάχους 1.0mm παρουσία άκαμπτων παρεμβλημάτων

Σημείο 1 στα 2.5mm



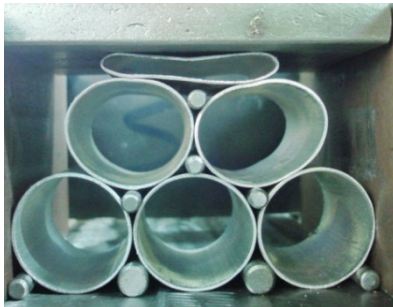
Σημείο 2 στα 11.8mm



Σημείο 3 στα 17.0mm



Σημείο 4 στα 23.4mm



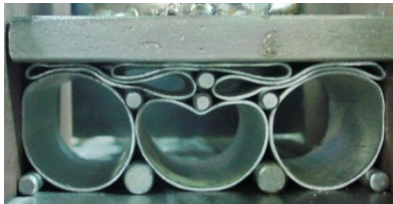
Σημείο 5 στα 36.7mm



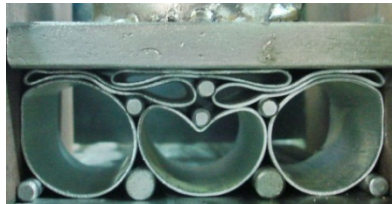
Σημείο 6 στα 40.3mm



Σημείο 7 στα 51.3mm



Σημείο 8 στα 51.9mm



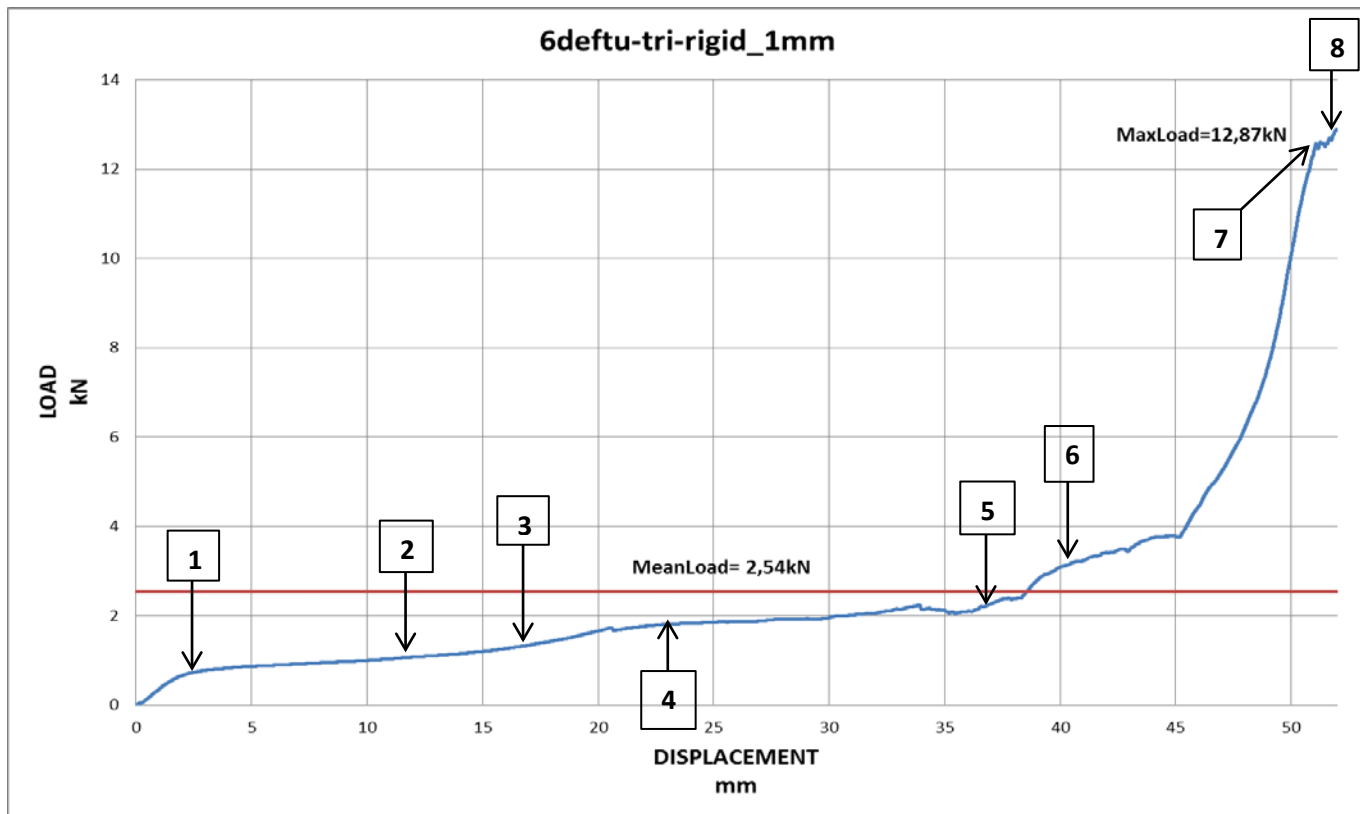
Σημείο 9 στα 52.0mm



ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Διαδρομή Εμβόλου:	S=52mm
Μέσο Φορτίο:	P _{mean} =2.54kN
Μέγιστο Φορτίο:	P _{max} =12,88kN
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου:	c.f.e.=0,19
Ενέργεια απορρόφησης:	E _{abs} =132,08Joule

Διαγραμματική Απεικόνιση του πειράματος



Σχόλια επί του πειράματος :

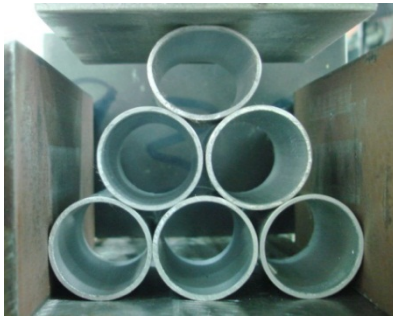
Από την αρχή του πειράματος και παρά την ύπαρξη των άκαμπτων παρεμβλημάτων, η αύξηση της καμπύλης του φορτίου είναι πολύ χαμηλή και μέχρι σχεδόν τα 21mm τα δοκίμια της μεσαίας σειράς παραμένουν απαραμόρφωτα, όπως αυτό φαίνεται από τις φωτογραφίες 1,2 &3 καθώς και από το διάγραμμα. Στην 4^η φωτογραφία παρατηρούμε την δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων και στη μεσαία σειρά των δοκιμών χωρίς όμως αυτό να ακολουθείται από κάποια σημαντική αύξηση του φορτίου.

Τελικά, η παραμόρφωση της τρίτης σειράς, η εισχώρηση του παρεμβλήματος στο μεσαίο δοκίμιο καθώς και η ολοκληρωτική συμπίεση των επάνω δοκιμών οδηγούν στην απότομη αύξηση του φορτίου κρούσης-απορρόφησης. Ταυτόχρονα παρατηρείται η δημιουργία ρωγμής στο κεντρικό δοκίμιο, η οποία όμως δεν οδηγεί σε ολική θραύση εξαιτίας του μικρού πάχους των δοκιμών.

Το τελικό προφίλ της διάταξης είναι πολύ συμμετρικό αλλά τα δεδομένα που μας δίνει (E_{abs} , $c.f.e.$, P_{mean}) δεν είναι ικανοποιητικά.

4.8 Τριγωνική Διάταξη Πάχους 1.5mm απουσία άκαμπτων παρεμβλημάτων

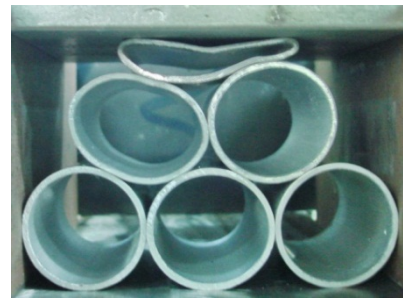
Σημείο 1 στα 4.1mm



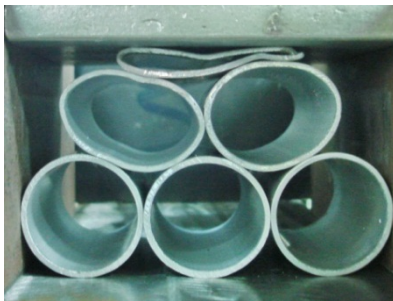
Σημείο 2 στα 17.3mm



Σημείο 3 στα 22.4mm



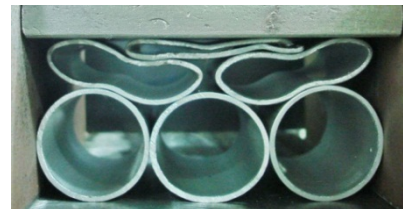
Σημείο 4 στα 27.0mm



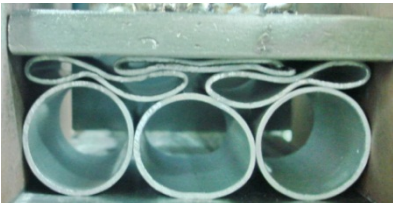
Σημείο 5 στα 36.4mm



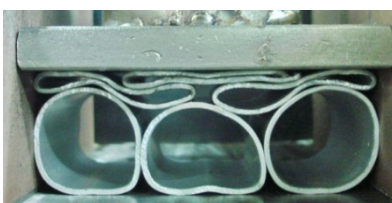
Σημείο 6 στα 40.0mm



Σημείο 7 στα 45.8mm



Σημείο 8 στα 50.4mm



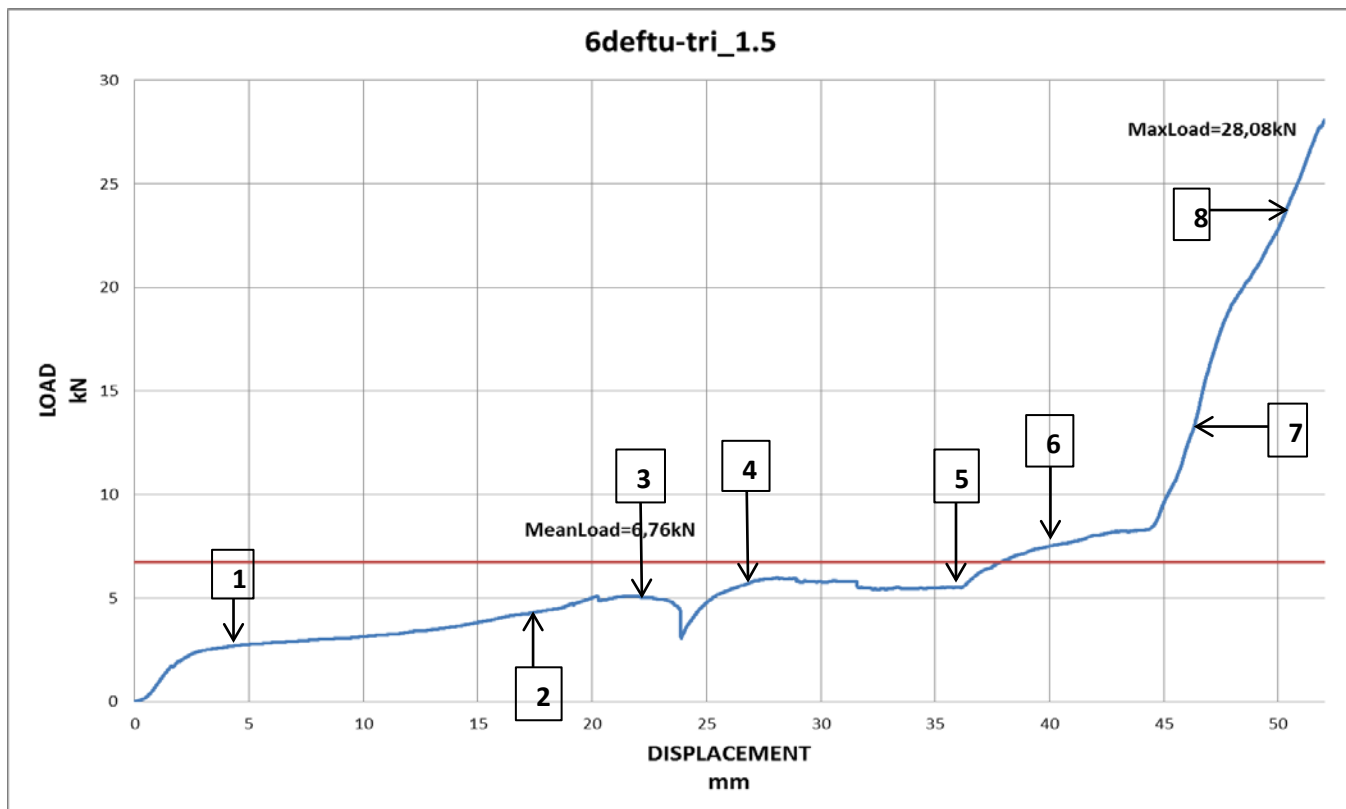
Σημείο 9 στα 52.0mm



ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Διαδρομή Εμβόλου:	S=52mm
Μέσο Φορτίο:	P _{mean} =6,76kN
Μέγιστο Φορτίο:	P _{max} =28,08kN
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου:	c.f.e.=0,24
Ενέργεια απορρόφησης:	E=351.52Joule

Διαγραμματική Απεικόνιση του πειράματος



Σχόλια επί του πειράματος :

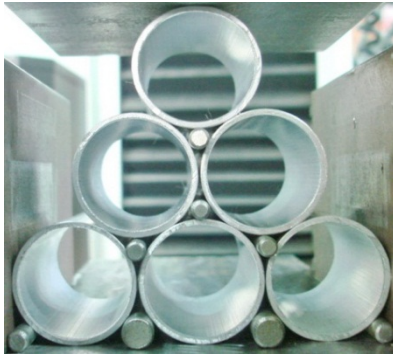
Η τριγωνική διάταξη με πάχος δοκίμων 1,5mm παρουσιάζει και αυτό ομαλή αύξηση του φορτίου κρούσης λόγω της μη ύπαρξης των πλευρικών περιορισμών και έτσι το κορυφαίο δοκίμιο παραμορφώνεται χωρίς να επηρεάζει τα υπόλοιπα τουλάχιστον μέχρι τα 17,5mm διαδρομής του εμβόλου, όπως φαίνεται από τις φωτογραφίες 1 & 2.

Ανάμεσα στις λήψεις 3 και 4 γίνεται θραύση του υλικού σε σημείο του κορυφαίου δοκίμιου που έχει δημιουργηθεί πλαστική άρθρωση, όπως απεικονίζεται και στο διάγραμμα με την μικρή κατακόρυφη πτώση της καμπύλης. Αυτό συμβαίνει επειδή η εφελκυστική τάση που δημιουργείται στα άκρα του είναι μεγαλύτερη από το όριο θραύσης του υλικού.

Στις εικόνες 5 & 6 βλέπουμε την δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στη μεσαία σειρά δοκίμων, χωρίς ακόμα την συμμετοχή της τελευταίας, αφού τα δοκίμια της παραμένουν απαραμόρφωτα. Λίγο πριν τα 45mm μετατόπισης του εμβόλου ξεκινάει η τελική και απότομη αύξηση του φορτίου αφού ο χώρος μειώνεται πολύ και τα τελευταία τρία δοκίμια ξεκινούν την δημιουργία των αρθρώσεων σε περιορισμένο πλέον χώρο.

4.9 Τριγωνική Διάταξη Πάχους 1.5mm παρουσία άκαμπτων παρεμβλημάτων

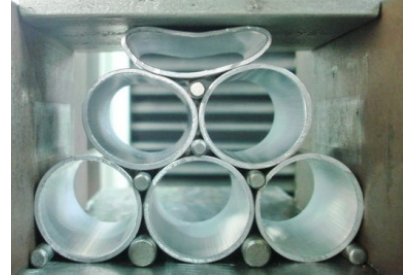
Σημείο 1 στα 2.2mm



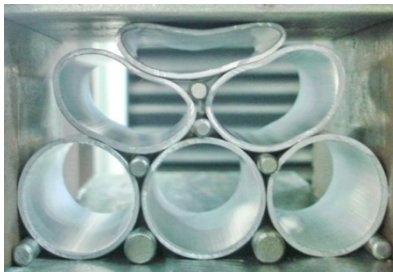
Σημείο 2 στα 7.0mm



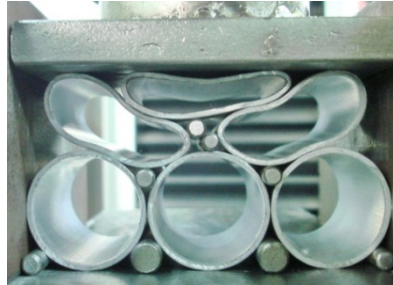
Σημείο 3 στα 17.8mm



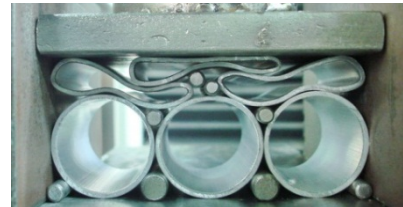
Σημείο 4 στα 25.4mm



Σημείο 5 στα 33.5mm



Σημείο 6 στα 42.7mm



Σημείο 7 στα 48.3mm



Σημείο 8 στα 51.9mm



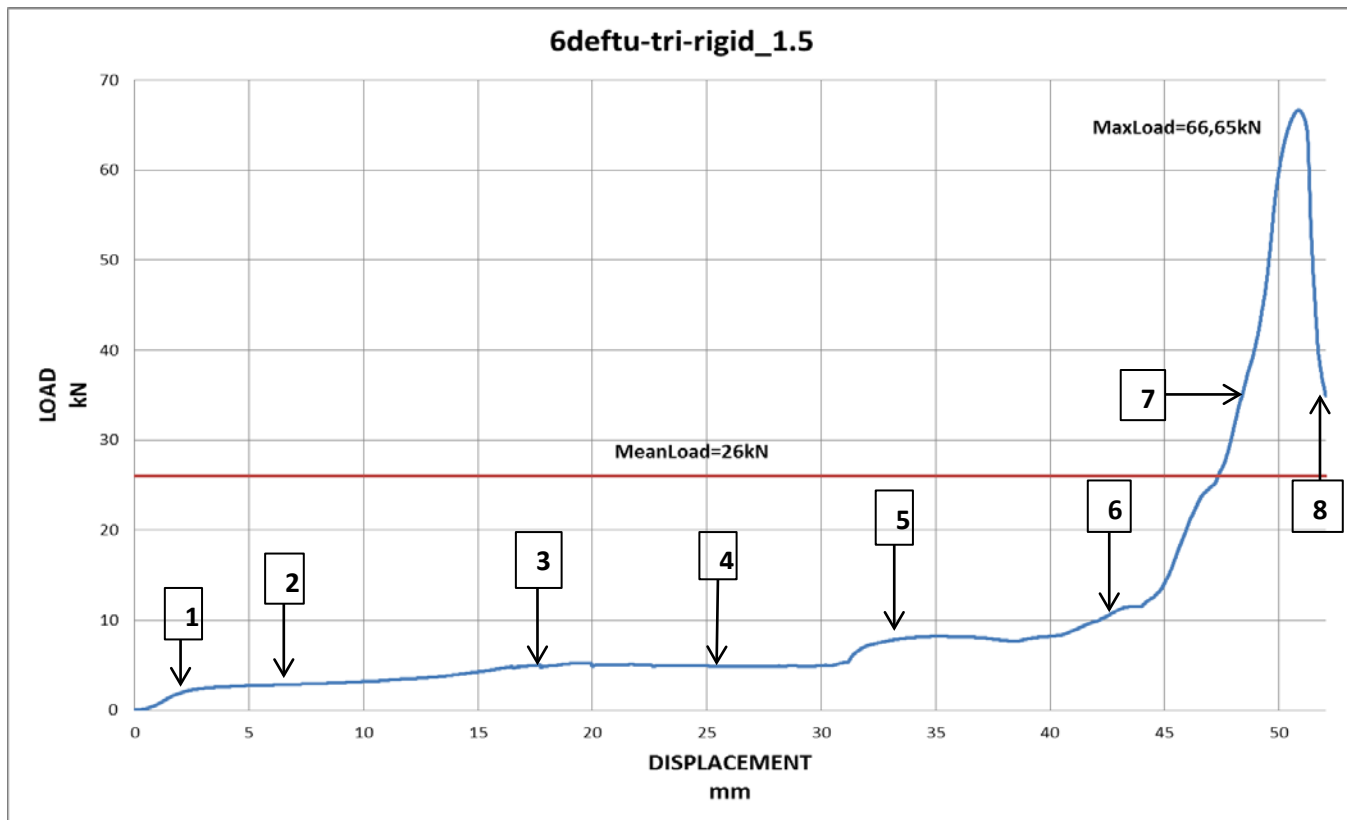
Σημείο 9 στα 52.0mm



ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Διαδρομή Εμβόλου:	S=52mm
Μέσο Φορτίο:	P _{mean} =26kN
Μέγιστο Φορτίο:	P _{max} =66,6565kN
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου:	c.f.e.=0,39
Ενέργεια απορρόφησης:	E _{abs} =1352Joule

Διαγραμματική Απεικόνιση του πειράματος



Σχόλια επί του πειράματος :

Η καμπύλη φορτίου παραμόρφωσης έχει πολύ ομαλή αύξηση σε όλο σχεδόν το μήκος πράγμα που μπορεί να διαπιστωθεί από την ομοιομορφία της παραμόρφωσης των δοκιμίων στις φωτογραφίες 1, 2, 3 & 4. Δημιουργούνται τοπικά οι αρθρώσεις αρχικά στο επάνω δοκίμιο και κατόπιν στις δεύτερης σειράς. Αυτό παρατηρείται στα σημεία 5 & 6.

Μετά τα 43mm μετατόπισης του εμβόλου και αφού τα κεντρικά παρεμβλήματα αρχίζουν να εισχωρούν στο κεντρικό δοκίμιο της κάτω σειράς, δημιουργείται και σε αυτό κεντρική άρθρωση με δημιουργία μεγάλης καμπυλότητας.

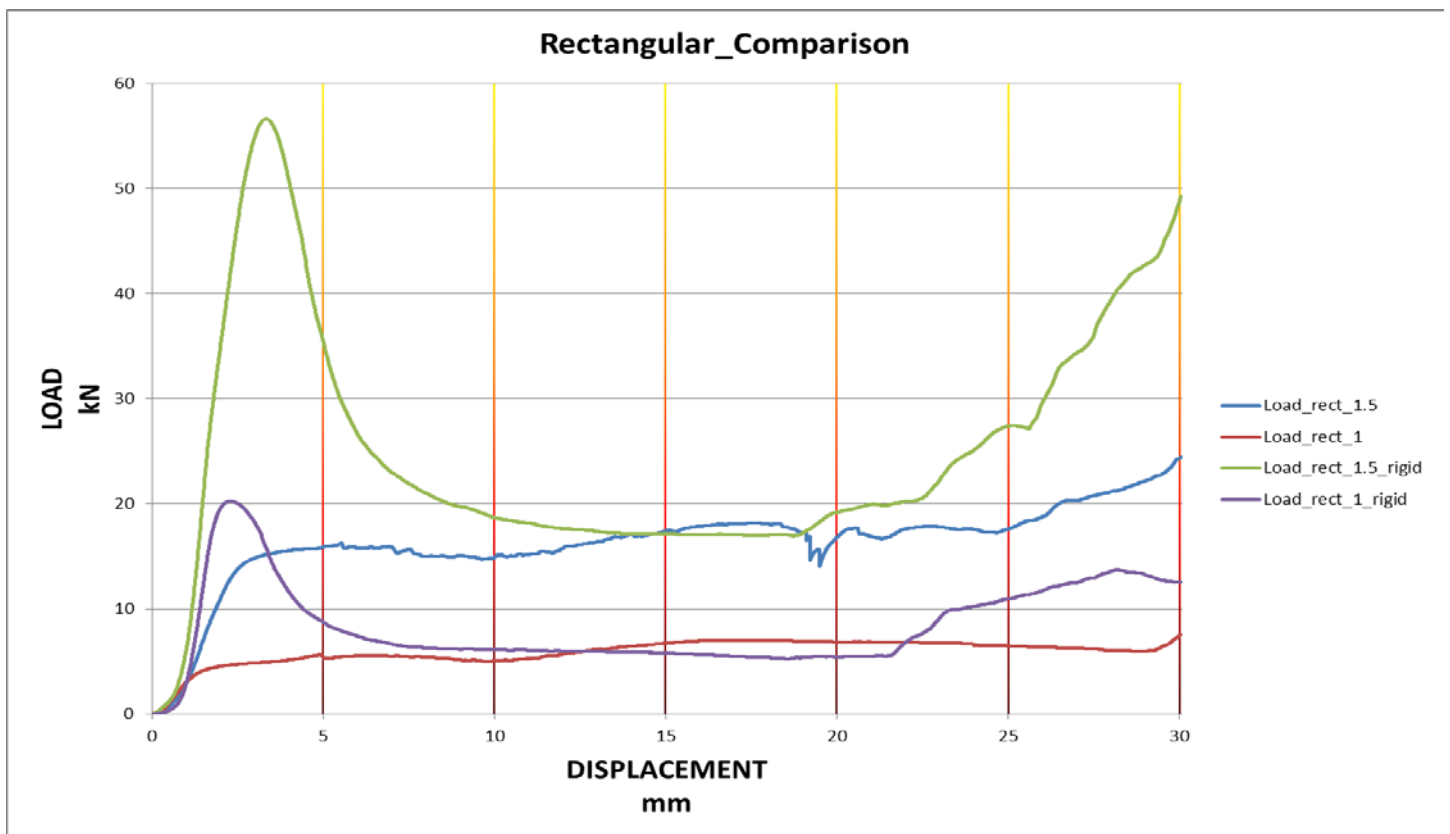
Και εδώ, η μείωση του όγκου όπου τα δοκίμια μπορούν να συμπιεστούν και η επαφή εσωτερικών επιφανειών ιδίων δοκιμίων είναι ο λόγος της απότομης αύξησης του φορτίου. Η τελική απότομη πτώση της καμπύλης, οφείλεται στην θραύση της δεξιάς άρθρωσης του δεξιού μεσαίου δοκιμίου.

4.10 Παρατηρήσεις και συγκριτικά αποτελέσματα επί των αρχικών πειραμάτων

4.10.1 Ορθογωνικές διατάξεις

Ξεκινώντας από τα αρχικά πειράματα των ορθογωνικών διατάξεων μπορούμε να κάνουμε τις εξής γενικές παρατηρήσεις.

Οι δύο μορφές διατάξεων, με και χωρίς παρεμβλήματα, παρουσιάζουν διαφορετικής μορφής καμπύλες. Συγκεκριμένα, οι διατάξεις χωρίς παρεμβλήματα έχουν μία ομαλή και με μικρότερη κλίση της καμπύλης μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική περιοχή και τείνουν προοδευτικά αυξανόμενα μέχρι και το τέλος του πειράματος όπου και αποκτούν την μέγιστη τιμή του φορτίου επιβολής P_{max} .



Συγκεντρωτικό Διάγραμμα των αρχικών ορθογωνικών διατάξεων

Αντίθετα, οι διατάξεις παρουσία των παρεμβλημάτων, εκκινούν απότομα, σχεδόν κατακόρυφα λαμβάνοντας έτσι την μέγιστη τιμή πολύ νωρίς στο πείραμα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι πρώτες να παρουσιάζουν καλύτερο συντελεστή ομοιομορφίας **C.F.E.** και να έχουν μεγαλύτερη περιοχή ομαλής απορρόφησης της ενέργειας με τις δεύτερες όμως, να

παρουσιάζουν μεγαλύτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας κρούσης, κυρίως λόγω αυτής της αρχικής μεγάλης αύξησης του φορτίου.

Συμφωνώντας με την θεωρία και τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί και οι τέσσερις διατάξεις μετά την αρχική μετάβαση στην πλαστική περιοχή, ακολουθούν με μικρές διακυμάνσεις την μέση τιμή **P_{mean}** του φορτίου στην περιοχή όπου έχουμε από πριν ονομάσει πλατό (plateau) του διαγράμματος.

Οι μικρές κατακόρυφες πτώσεις που εμφανίζονται και σε αυτά, αλλά και σε επόμενα διαγράμματα είναι τα σημεία όπου η εφελκυστική τάση ξεπερνάει το όριο θραύσης του αλουμινίου.

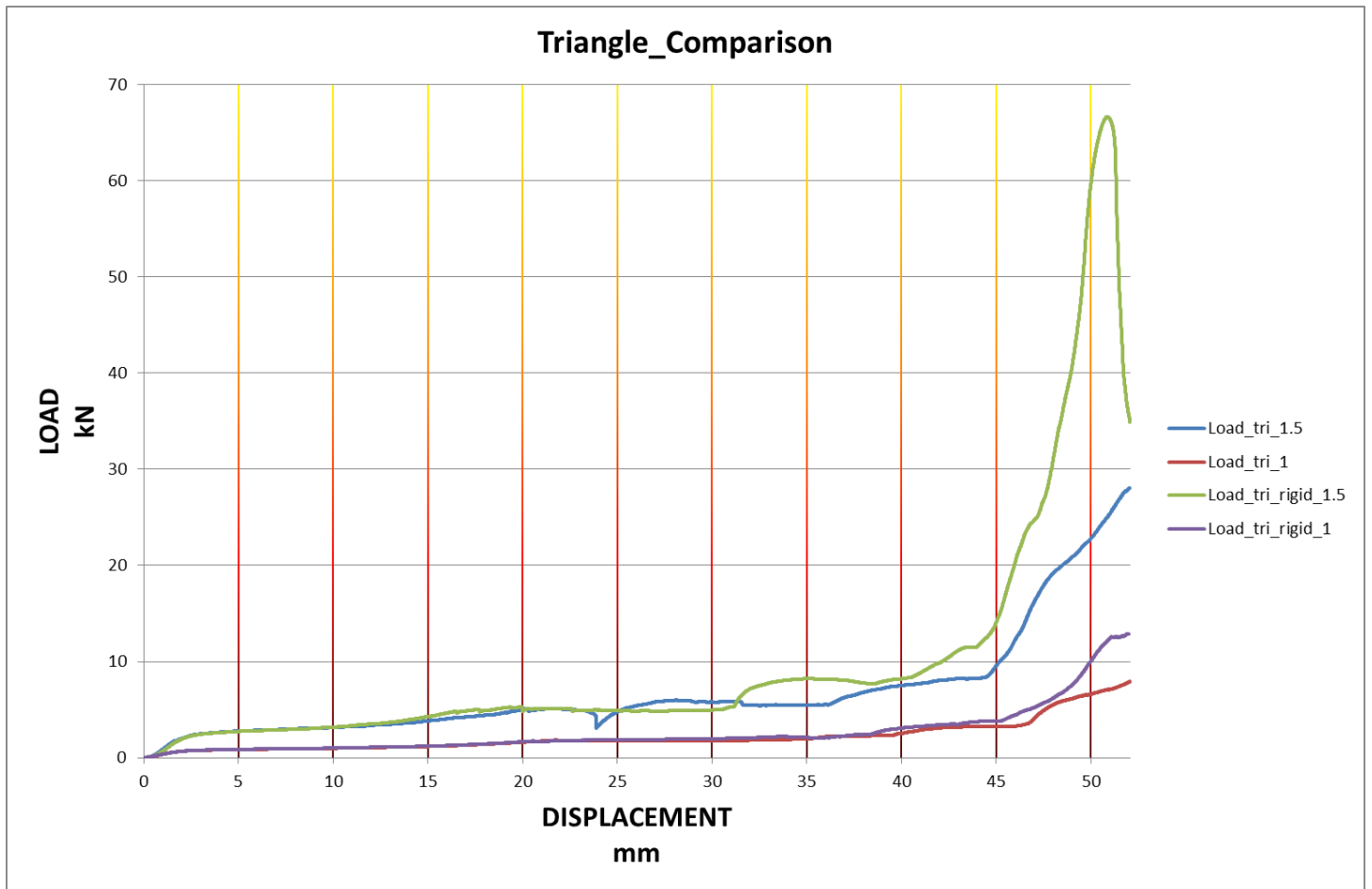
4.10.2 Τριγωνικές διατάξεις

Οι τριγωνικές διατάξεις επιλέχθηκαν να δοκιμαστούν για δύο βασικούς λόγους. Ο πρώτος ήταν η αύξηση της διαδρομής του εμβόλου, άρα αμέσως έχουμε μεγαλύτερη διαδρομή για προστασία της κατασκευής. Ο δεύτερος λόγος ήταν ότι με αυτόν τον τρόπο δεν έχουμε πλευρικούς περιορισμούς, οι οποίοι δεν είναι πάντα δυνατόν να εφαρμοστούν στο σχεδιασμό μίας κατασκευής.

Αντίθετα με τις ορθογωνικές διατάξεις και οι τέσσερις τριγωνικές που δοκιμάστηκαν πειραματικά, παρουσίασαν την ίδια ακριβώς μορφή καμπύλης. Εκκινούσαν ομαλά και φτάνοντας την μέση τιμή **P_{mean}** του φορτίου παρέμεναν πολύ κοντά σε αυτή με μια απότομη αύξηση της κοντά στην περιοχή των 45mm διαδρομής του εμβόλου καταλήγοντας στην τελική και μέγιστη τιμή κάθε πειράματος. Μοναδική εξαίρεση η πειραματική διάταξη με πάχος δοκιμίου 1,5mm παρουσία παρεμβλημάτων, η οποία όμως οφείλεται σε θραύση του υλικού ενός εκ των δοκιμίων.

Η τελική αυτή απότομη αύξηση του φορτίου είναι και ο κύριος λόγος που οι τριγωνικές πειραματικές διατάξεις παρουσίασαν τους μικρότερους συντελεστές ομοιομορφίας από όλα τα πειράματα.

Παρατηρήσαμε λοιπόν ότι η αύξηση της διαδρομής του εμβόλου από τα 30mm στα 52mm δεν είχε αποτέλεσμα όσον αφορά την αύξηση απορρόφησης ενέργειας.



Συγκεντρωτικό Διάγραμμα των τριγωνικών διατάξεων

4.10.3 Συγκεντρωτικά διαγράμματα και πίνακες - επιλογή συνέχισης πειραμάτων

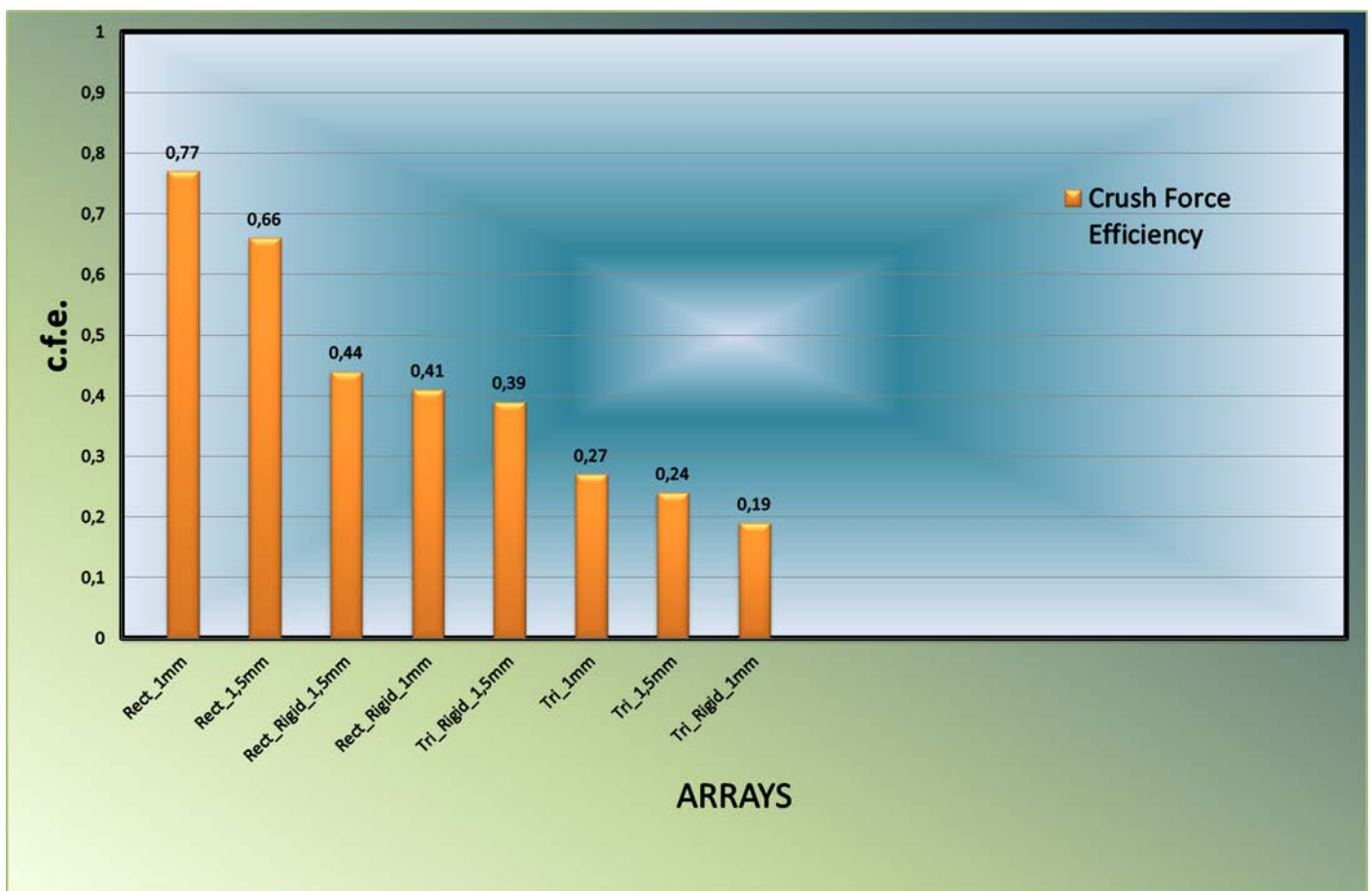
Αναλύοντας τα υπολογιστικά δεδομένα όλων των παραπάνω πειραμάτων, αποφασίστηκε να εγκαταλειφθεί η πειραματική συνέχιση με τριγωνικές διατάξεις. Αυτό έγινε κυρίως επειδή ο συντελεστής **C.F.E.** (*Crush Force Efficiency*) βρέθηκε πολύ μικρότερος (**C.F.E.tri** << **C.F.E. rect**) σε όλες τις συνδυαστικές διατάξεις. Ακόμα παρατηρήθηκε ότι το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη των τριγωνικών διατάξεων, δηλαδή η ενέργεια απορρόφησης **E_{abs}**, ήταν σημαντικά μικρότερο από αυτό των ορθογωνικών τουλάχιστον στα

μήματα των διαγραμμάτων που μας ενδιαφέρουν και όχι στο τέλος αυτών όπου και τα τριγωνικά διαγράμματα παρουσίαζαν αύξηση.

ARRAY	DISPLACEMENT(mm)	Pmean(kN)	Pmax(kN)	Crush Force Efficiency	Eabsorption(Joule)
Rect_1mm	30	5,88	7,55	0,77	176,4
Rect_Rigid_1mm	30	8,35	20,24	0,41	250,5
Rect_1,5mm	30	16,28	24,45	0,66	488,4
Rect_Rigid_1,5mm	30	25,08	56,62	0,44	752,4
Tri_1mm	52	2,15	7,93	0,27	111,8
Tri_Rigid_1mm	52	2,54	12,88	0,19	132,1
Tri_1,5mm	52	6,76	28,08	0,24	351,52
Tri_Rigid_1,5mm	52	26	66,65	0,39	1352

Πίνακας Συγκεντρωτικών Δεδομένων των αρχικών πειραματικών διατάξεων

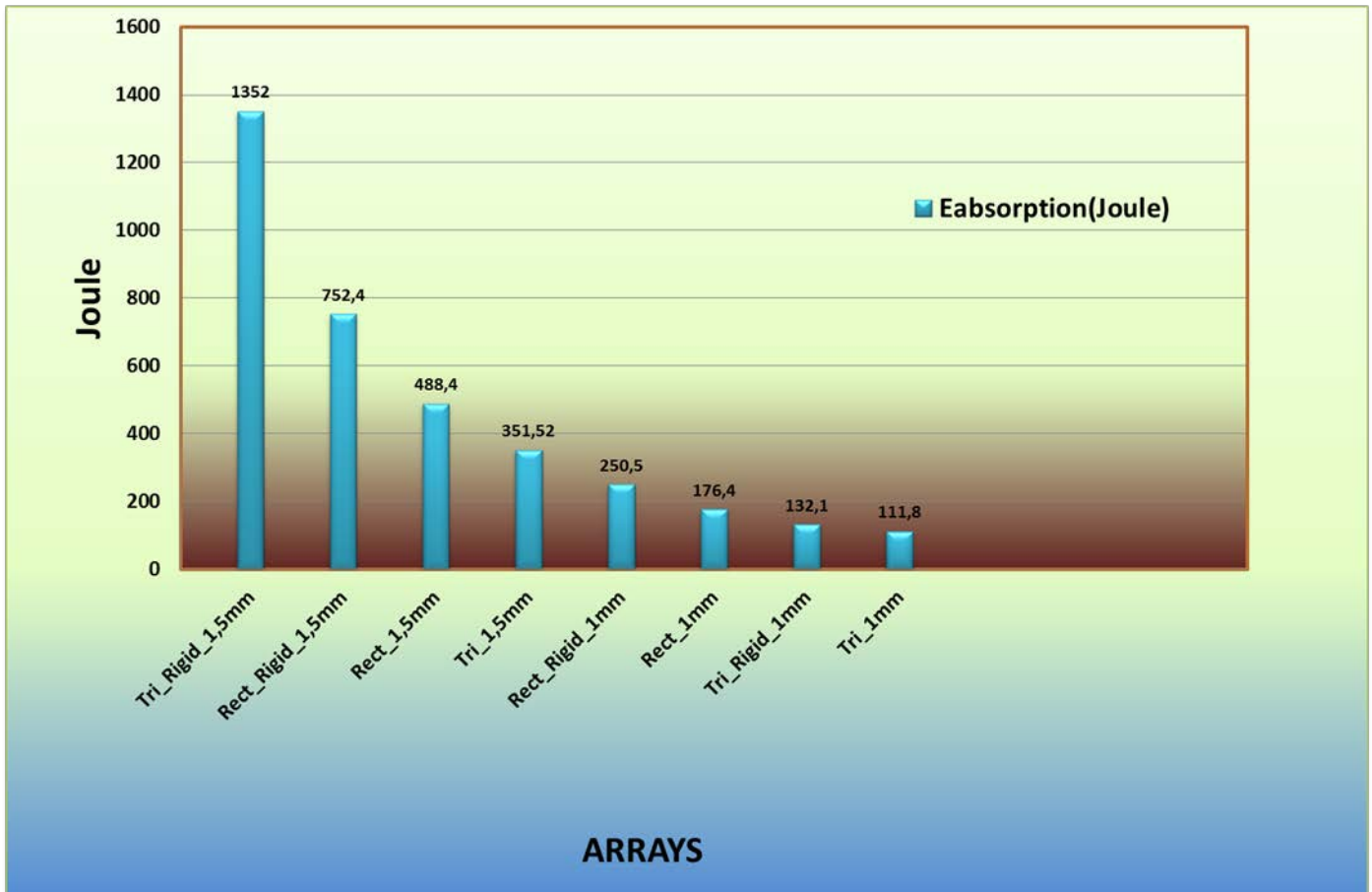
Μπορούμε να καταλάβουμε καλύτερα τα παραπάνω σχόλια με την χρήση των αντίστοιχων γραφημάτων, όπως αυτά παρατίθενται παρακάτω.



Γράφημα Συντελεστών Ομοιομορφίας Φορτίου Διατάξεων

Στο παραπάνω γράφημα φαίνεται ότι οι ορθογωνικές διατάξεις, παρουσιάζουν όλες καλύτερο Συντελεστή Ομοιομορφίας Φορτίου **-C.F.E.-** από τις αντίστοιχες τριγωνικές. Ενώ στο

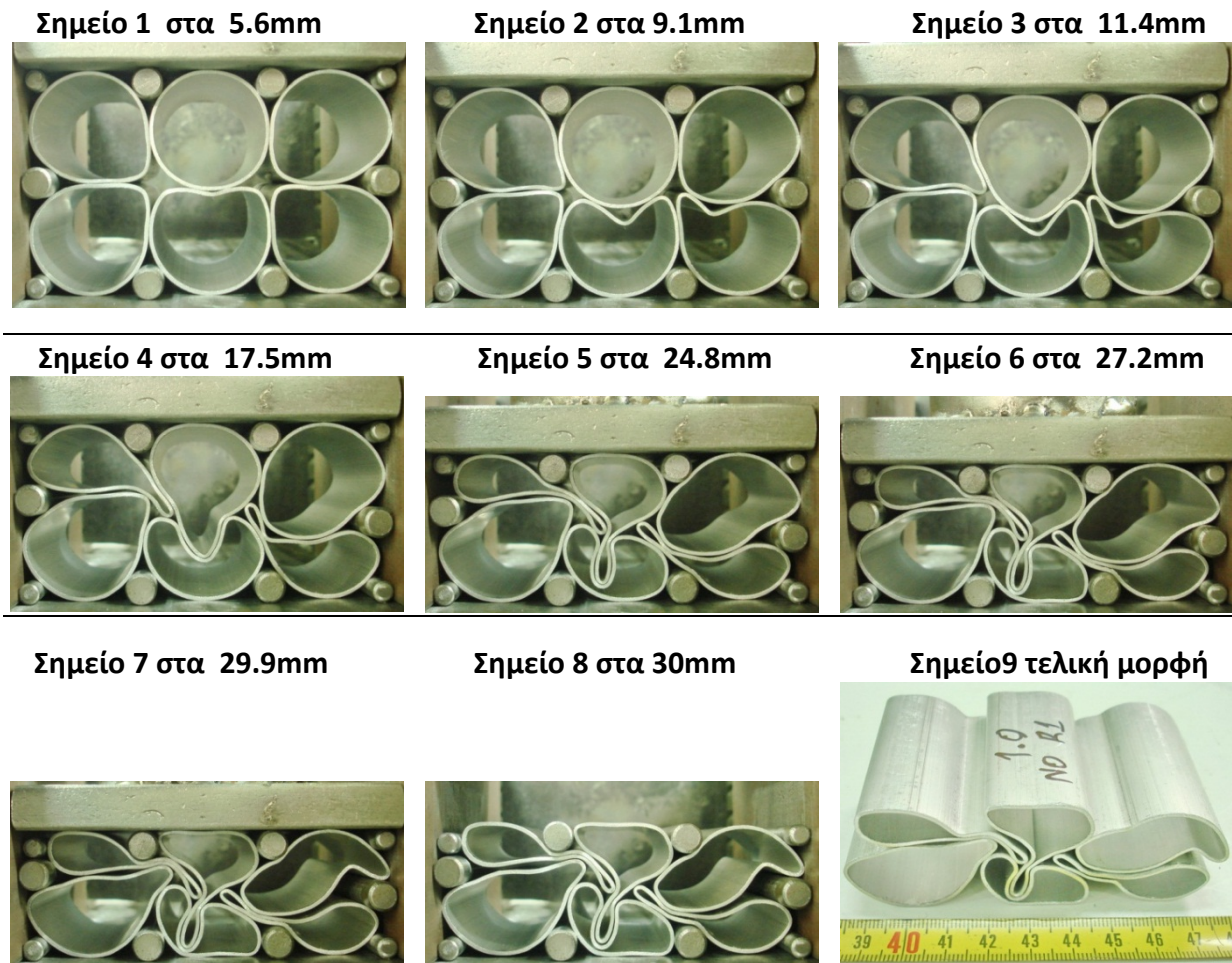
γράφημα όπου οι διατάξεις κατατάσσονται σύμφωνα με την Απορρόφηση Ενέργειας, δεν ισχύει το ίδιο. Αυτό θα μπορούσε να μας οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα, αλλά με την βοήθεια των αντίστοιχων διαγραμμάτων κάθε πειράματος, παρατηρούμε ότι αυτό συμβαίνει λόγω της τελικής απότομης αύξησης του φορτίου πολύ κοντά στο τέλος της διαδρομής του εμβόλου.



Διάγραμμα Απορρόφησης Ενέργειας Διατάξεων

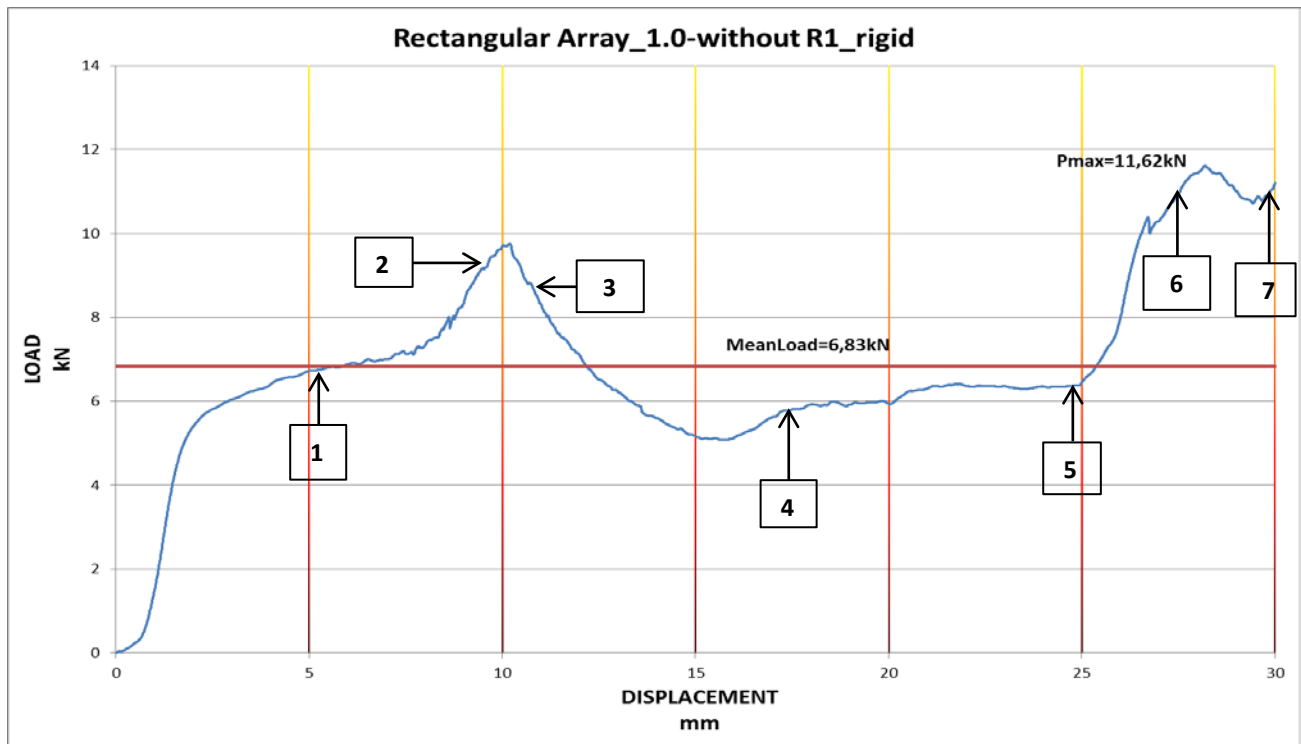
Αποφασίστηκε να συνεχιστούν τα πειράματα μόνο με ορθογωνικής διατομής διατάξεις, με την διαφορά, της χρήσης μικτού πάχους δοκιμίων και την παρουσία ή μη κάποιων από τα απαραμόρφωτα παρεμβλήματα. Αυτά τα πειράματα παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια.

4.11 Ορθογωνική Διάταξη πάχους δοκιμίου 1.0mm απουσία κεντρικών άκαμπτων παρεμβλημάτων



ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	
Διαδρομή Εμβόλου:	S=30mm
Μέσο Φορτίο:	P _{mean} =6,83kN
Μέγιστο Φορτίο:	P _{max} =11,62kN
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου:	c _{fe} =0,59
Ενέργεια απορρόφησης:	E _{abs} =204,9Joule

Διαγραμματική Απεικόνιση του πειράματος



Σχόλια επί του πειράματος :

Παρατηρούμε ότι με τη απουσία των κεντρικών απαραμόρφωτων παρεμβλημάτων η καμπύλη του φορτίου δεν δημιουργεί την αρχική μεγάλη αύξηση, καθώς τα δοκίμια βρίσκουν περισσότερους χώρους να εισχωρήσουν και μικρότερη αντίσταση. Έτσι η καμπύλη συγκλίνει ταχύτερα κοντά στην περιοχή του μέσου φορτίου.

Και σε αυτό το πείραμα βλέπουμε την δημιουργία των πλαστικών αρθρώσεων. Στις φωτογραφίες 3, 4 & 5 φαίνεται ότι το υλικό από τα δοκίμια που παραμορφώνονται κατευθύνονται προς το κέντρο της διάταξης. Όταν η μεγάλη καμπυλότητα που έχει δημιουργηθεί στο κεντρικό κάτω δοκίμιο ακουμπήσει στο κάτω μέρος της διάταξης, έχουμε την τελική αύξηση της δύναμης και άρα και της ενέργειας απορρόφησης.

4.12 Ορθογωνική Διάταξη πάχους δοκιμίου 1.5mm απουσία κεντρικών άκαμπτων παρεμβλημάτων

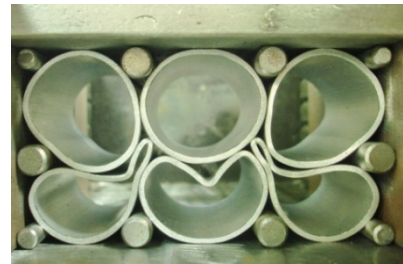
Σημείο 1 στα 5.2mm



Σημείο 2 στα 10.4mm



Σημείο 3 στα 13.0mm



Σημείο 4 στα 15.9mm



Σημείο 5 στα 20.1mm



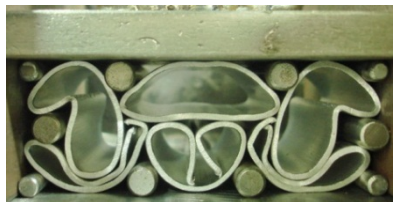
Σημείο 6 στα 22.7mm



Σημείο 7 στα 25.6mm



Σημείο 8 στα 28.2mm



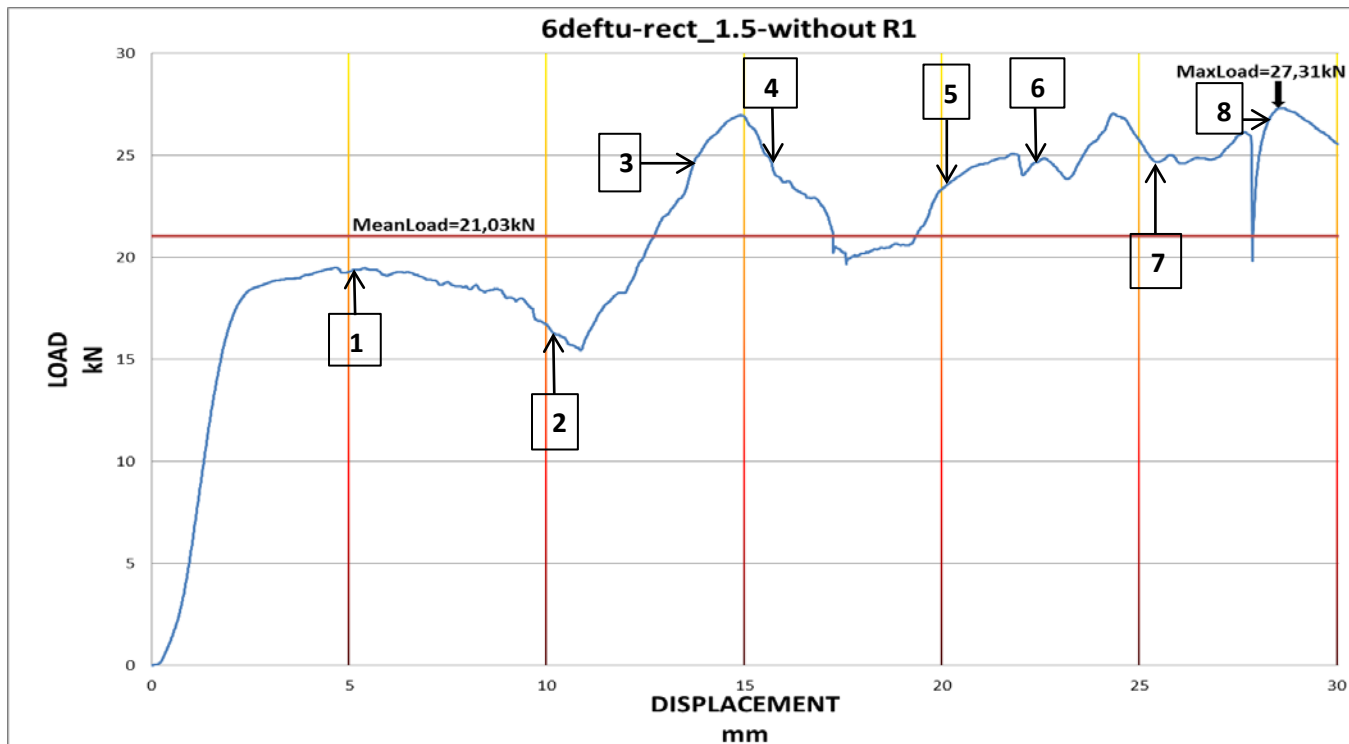
Σημείο 9 στα 30.0mm



ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Διαδρομή Εμβόλου:	S=30mm
Μέσο Φορτίο:	P _{mean} =21,03kN
Μέγιστο Φορτίο:	P _{max} =27,31kN
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου:	c.f.e.=0,77
Ενέργεια απορρόφησης:	E _{abs} =630,9Joule

Διαγραμματική Απεικόνιση του πειράματος



Σχόλια επί του πειράματος :

Η μη χρήση των κεντρικών απαραμόρφωτων παρεμβλημάτων και η αύξηση του πάχους των δοκιμών από 1,0mm σε 1,5mm οδηγεί σε μεγαλύτερο αρχικό φορτίο πλαστικής παραμόρφωσης και σε σταθεροποίηση του γύρω από το μέσο φορτίο.

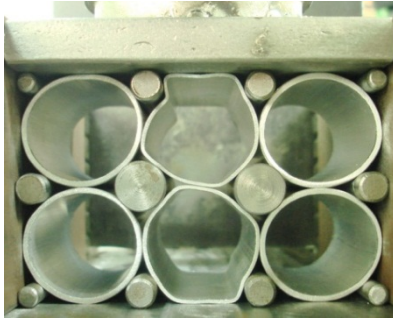
Στις φωτογραφίες 1, 2,3 & 4 φαίνεται η ομοιομορφία με την οποία συμπιέζεται η διάταξη. Η μεγάλη καμπυλότητα που δημιουργείται στο κεντρικό κάτω δοκίμιο, καταλήγει τελικά σε θραύση του ακριβώς στην πλαστική άρθρωση κοντά στα 17mm μετατόπιση εμβόλου.

Ταυτόχρονα βλέπουμε την σταδιακή κατάρρευση του υλικού στα εκατέρωθεν του δοκίμια (απεικονίσεις 5 & 6), ενώ η ταυτόχρονη αποκοπή υλικού στα επάνω πλαϊνά δοκίμια που μπορεί να παρατηρηθεί στην φωτογραφία 8, είναι ο λόγος της μεγάλης κατακόρυφης πτώσης της καμπύλης στα 28mm μετατόπισης.

Το αυξημένο πάχος των δοκιμών δεν επιτρέπει στα παρεμβλήματα να μετακινηθούν εκτός των αρχικών τους θέσεων και έτσι το τελικό προφίλ είναι πολύ συμμετρικό

4.13 Ορθογωνική Διάταξη Πάχους 1.5mm/1mm/1.5mm επάνω και κάτω παρουσία άκαμπτων παρεμβλημάτων

Σημείο 1 στα 4.0mm



Σημείο 2 στα 11.4mm



Σημείο 3 στα 18.3mm



Σημείο 4 στα 19.8mm



Σημείο 5 στα 22.3mm



Σημείο 6 στα 26.2mm



Σημείο 7 στα 28.4mm



Σημείο 8 στα 29.9mm



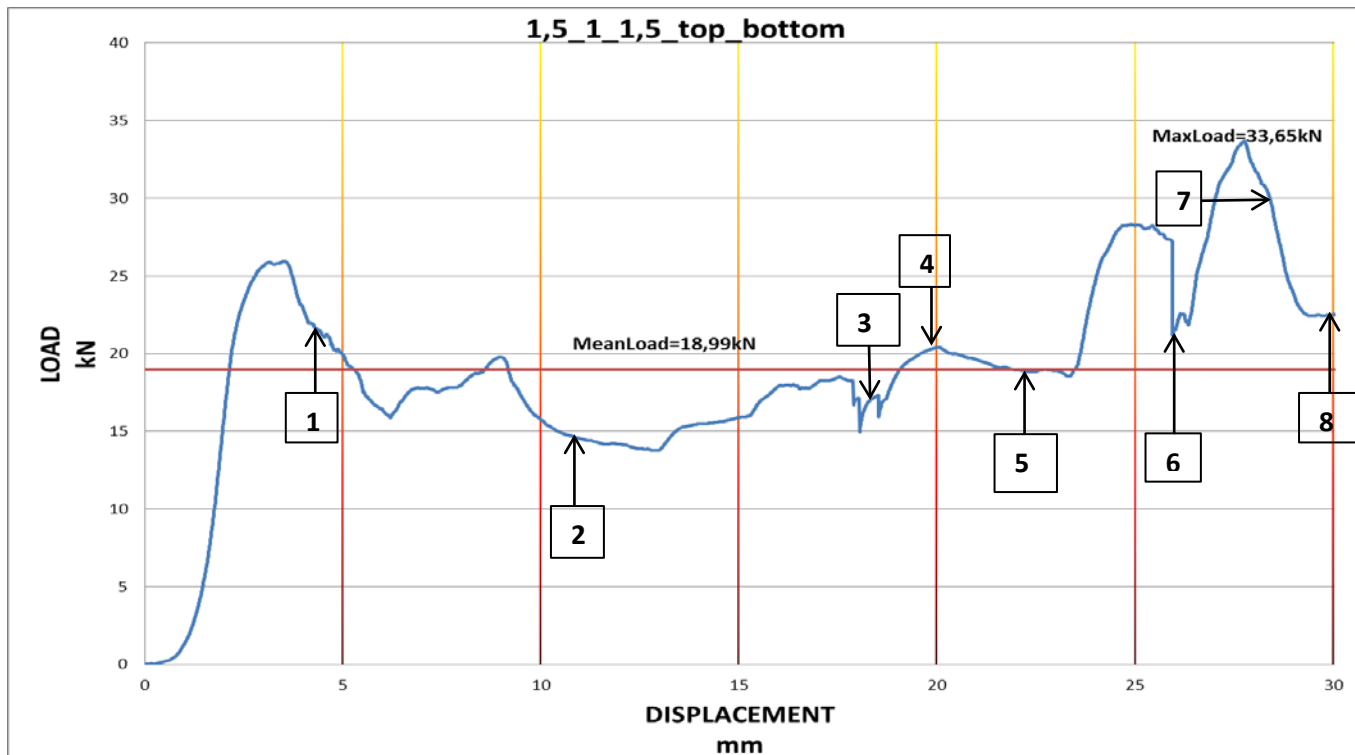
Σημείο 9 στα 30.0mm



ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Διαδρομή Εμβόλου:	S=30mm
Μέσο Φορτίο:	P _{mean} =18,99kN
Μέγιστο Φορτίο:	P _{max} =33,65kN
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου:	c.f.e.=0,54
Ενέργεια απορρόφησης:	E _{abs} =569,7Joule

Διαγραμματική Απεικόνιση του πειράματος



Σχόλια επί του πειράματος :

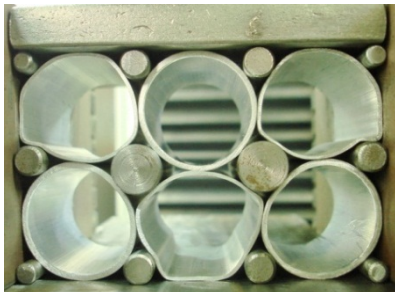
Στα 4.0mm μετατόπισης εμβόλου και στην αντίστοιχη φωτογραφία, παρατηρείται η αρχική πρώτη μεγάλη αύξηση φορτίου, ταυτόχρονα με την δημιουργία των πλαστικών αρθρώσεων. Τα δοκίμια με πάχος 1,0mm φαίνεται να καταπονούνται πολύ περισσότερο. Από εκεί και μέχρι τα 17,0mm η καμπύλη ακολουθεί με μικρές διακυμάνσεις την μέση τιμή του φορτίου.

Μετά και όπως βλέπουμε στο σημείο τρία φαίνεται η θραύση του πάνω δεξιά δοκιμίου, που έχει δημιουργήσει μεγάλη καμπυλότητα και απεικονίζεται από τις μικρές κατακόρυφες πτώσεις στο διάγραμμα. Καλύτερα φαίνεται αυτό στο σημείο 4. Στη συνέχεια και στο σημείο 6 έχουμε την δεύτερη μεγάλη διάτμηση δοκιμίου, κάτω δεξιά.

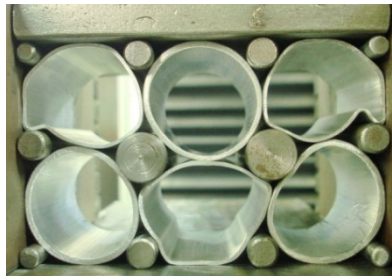
Τέλος, η με μεγάλη κλίση αλλά όχι κατακόρυφη πτώση της καμπύλης οφείλεται στην μερική θραύση του επάνω αριστερά δοκιμίου.

4.14 Ορθογωνική Διάταξη Πάχους 1.0/1.5/1.0(mm)επάνω & 1.5/1.0/1.5(mm)κάτω παρουσία άκαμπτων παρεμβλημάτων

Σημείο 1 στα 4.2mm



Σημείο 2 στα 5.6mm



Σημείο 3 στα 10.1mm



Σημείο 4 στα 12.6mm



Σημείο 5 στα 20.3mm



Σημείο 6 στα 23.0mm



Σημείο 7 στα 27.3mm



Σημείο 8 στα 29.9mm



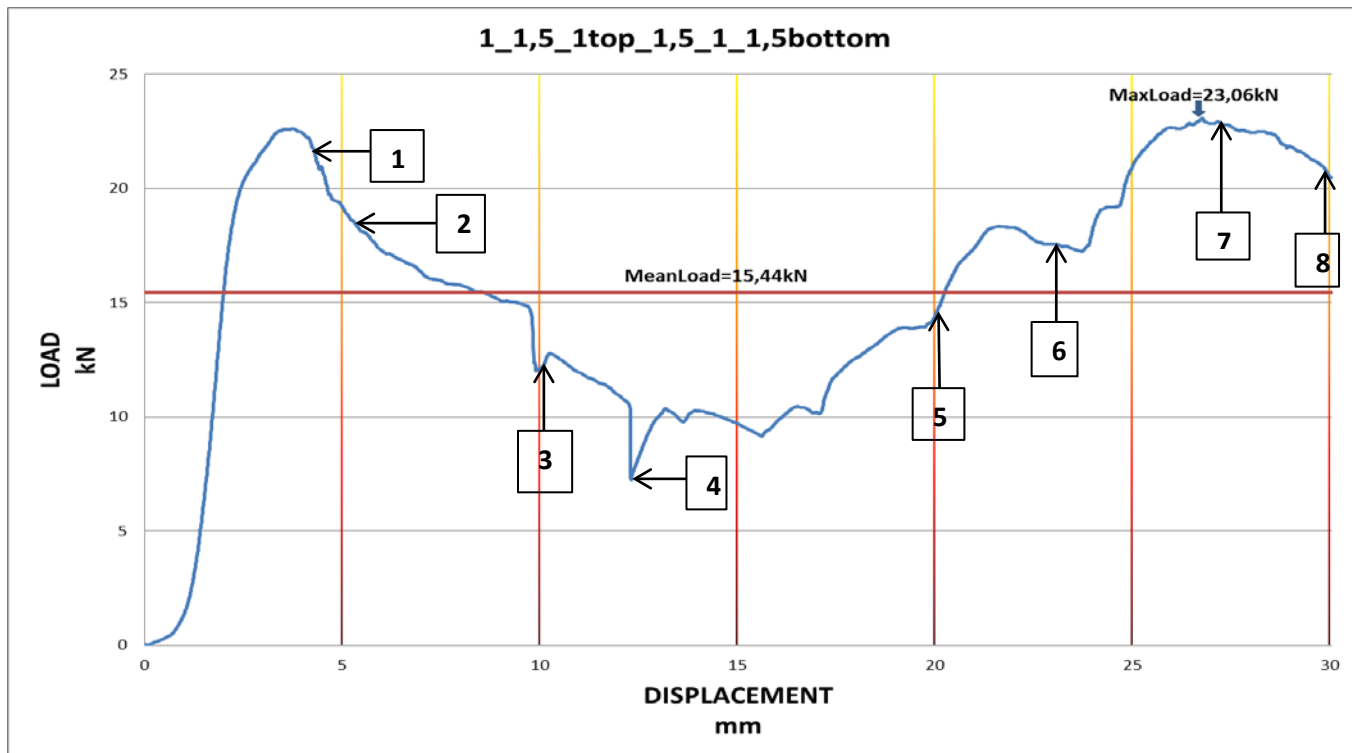
Σημείο 9 στα 30.0mm



ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Διαδρομή Εμβόλου:	S=30mm
Μέσο Φορτίο:	P _{mean} =15,44kN
Μέγιστο Φορτίο:	P _{max} =23,06
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου:	c.f.e.=0,67
Ενέργεια απορρόφησης:	E _{abs} =463,2Joule

Διαγραμματική Απεικόνιση του πειράματος



Σχόλια επί του πειράματος :

Στο σημείο 1 βλέπουμε ομαλή υποχώρηση του υλικού και την δημιουργία των πλαστικών αρθρώσεων. Τα δοκίμια με πάχος 1.0mm καταπονούνται και παραμορφώνονται περισσότερο.

Στο σημείο 3 βλέπουμε μία πρώτη απότομη πτώση της καμπύλης λόγω της μεγάλης καμπυλότητας που έχει δημιουργηθεί στο πάνω δεξιά δοκίμιο. Το ίδιο συμβαίνει και στο σημείο 4 για το επάνω αριστερά. Δεν υπάρχει όμως θραύση εξαιτίας της μικρής εφελκυστικής τάσης των λεπτότερων δοκιμίων.

Τα δοκίμια βρίσκονται σε συνεχώς αυξανόμενη επαφή και γι' αυτό παρατηρείται η αύξηση του φορτίου ταυτόχρονα με την δημιουργία και μεγαλύτερων καμπυλών στις ήδη υπάρχουσες αρθρώσεις. Η επαφή των εσωτερικών επιφανειών ιδίων δοκιμίων οδηγεί σε περαιτέρω αύξηση του φορτίου έως το μέγιστο στο σημείο 7.

Η τελική πτώση οφείλεται στην δημιουργία αποκοπής στο μεσαίο επάνω δοκίμιο πάχους 1,5mm που ξεπερνάει το όριο θραύσης του.

4.15 Ορθογωνική Διάταξη Πάχους 1.0/1.5/1.0(mm)επάνω & 1.0/1.5/1.0 (mm)κάτω παρουσία άκαμπτων παρεμβλημάτων

Σημείο 1 στα 4.3mm



Σημείο 2 στα 8.6mm



Σημείο 3 στα 12.1mm



Σημείο 4 στα 19.7mm



Σημείο 5 στα 22.5mm



Σημείο 6 στα 26.1mm



Σημείο 7 στα 28.2mm



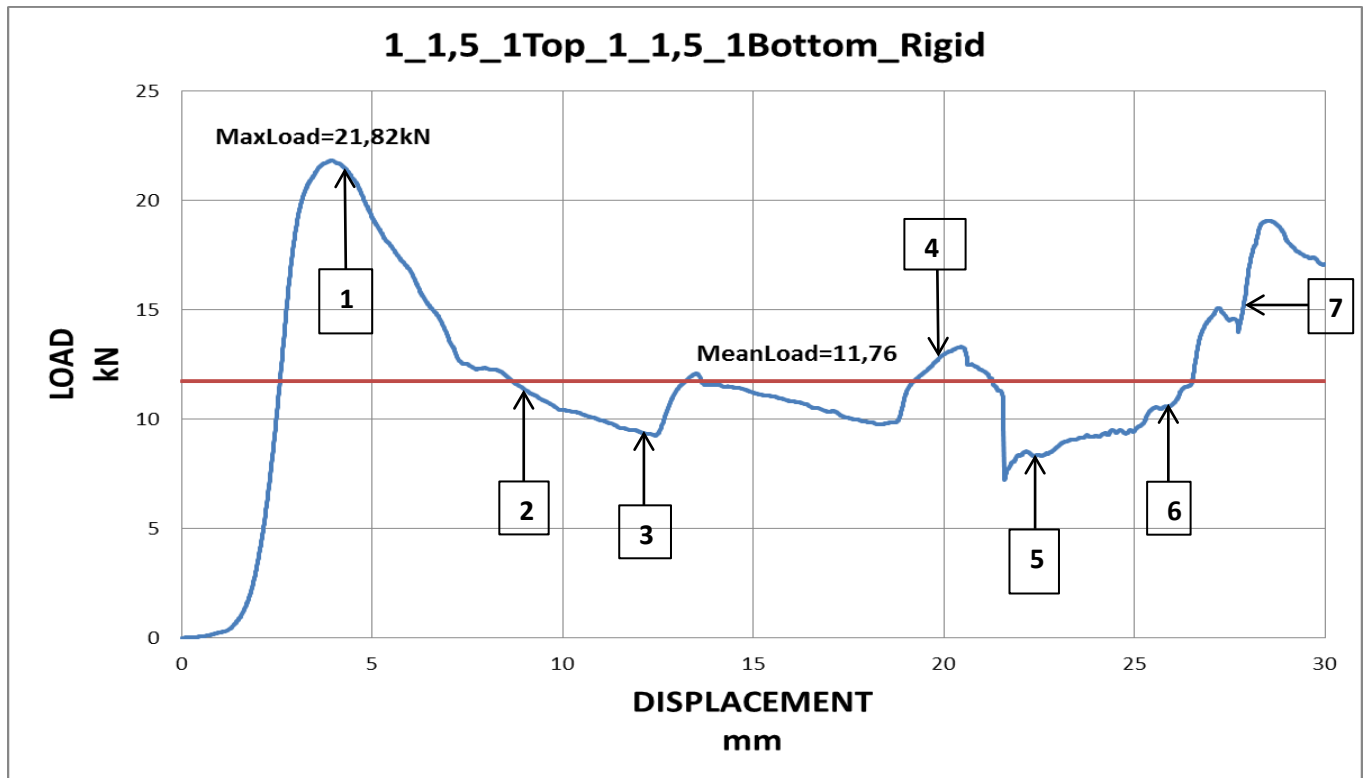
Σημείο 8 στα 30.0mm



ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Διαδρομή Εμβόλου:	S=30mm
Μέσο Φορτίο:	P _{mean} =11,76kN
Μέγιστο Φορτίο:	P _{max} =21,82kN
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου:	c.f.e.=0,54
Ενέργεια απορρόφησης:	E _{abs} =352,8Joule

Διαγραμματική Απεικόνιση του πειράματος



Σχόλια επί του πειράματος :

Στο σημείο 1, φαίνεται ότι τα δοκίμια του 1,0mm είναι αυτά που ξεκινούν να δημιουργούν πλαστικές αρθρώσεις και είναι αυτή η συγχρονισμένη παραμόρφωση τους, που δημιουργεί την απότομη αύξηση του φορτίου.

Στα σημεία 2, 3 & 4 παρατηρούμε την εισχώρηση υλικού από τα πιο λεπτότοιχα δοκίμια ανάμεσα στα κενά που δημιουργούν οι μετακλήσεις των παρεμβλημάτων. Μετά τα 21mm μετατόπισης εμβόλου, έχουμε την κατακόρυφη πτώση της καμπύλης που οφείλεται στην διαμήκης θραύση του επάνω κεντρικού δοκιμίου.

Τέλος, με την μείωση του όγκου όπου μπορούν τα δοκίμια να μετατοπιστούν, έχουμε την τελευταία αύξηση του φορτίου. Τελικά το προφίλ της διάταξης δεν είναι πολύ συμμετρικό ενώ η παρουσία των κεντρικών παρεμβλημάτων δημιουργεί την αρχική απότομη αύξηση του φορτίου η οποία επιθυμητό θα ήταν να είναι πιο ομαλή.

4.16 Ορθογωνική Διάταξη Πάχους 1.0mm επάνω & 1.5mm κάτω παρουσία άκαμπτων παρεμβλημάτων

Σημείο 1 στα 2.9mm



Σημείο 2 στα 8.9mm



Σημείο 3 στα 11.9mm



Σημείο 4 στα 16.6mm



Σημείο 5 στα 19.5mm



Σημείο 6 στα 24.7mm



Σημείο 7 στα 28.6mm



Σημείο 8 στα 29.9mm



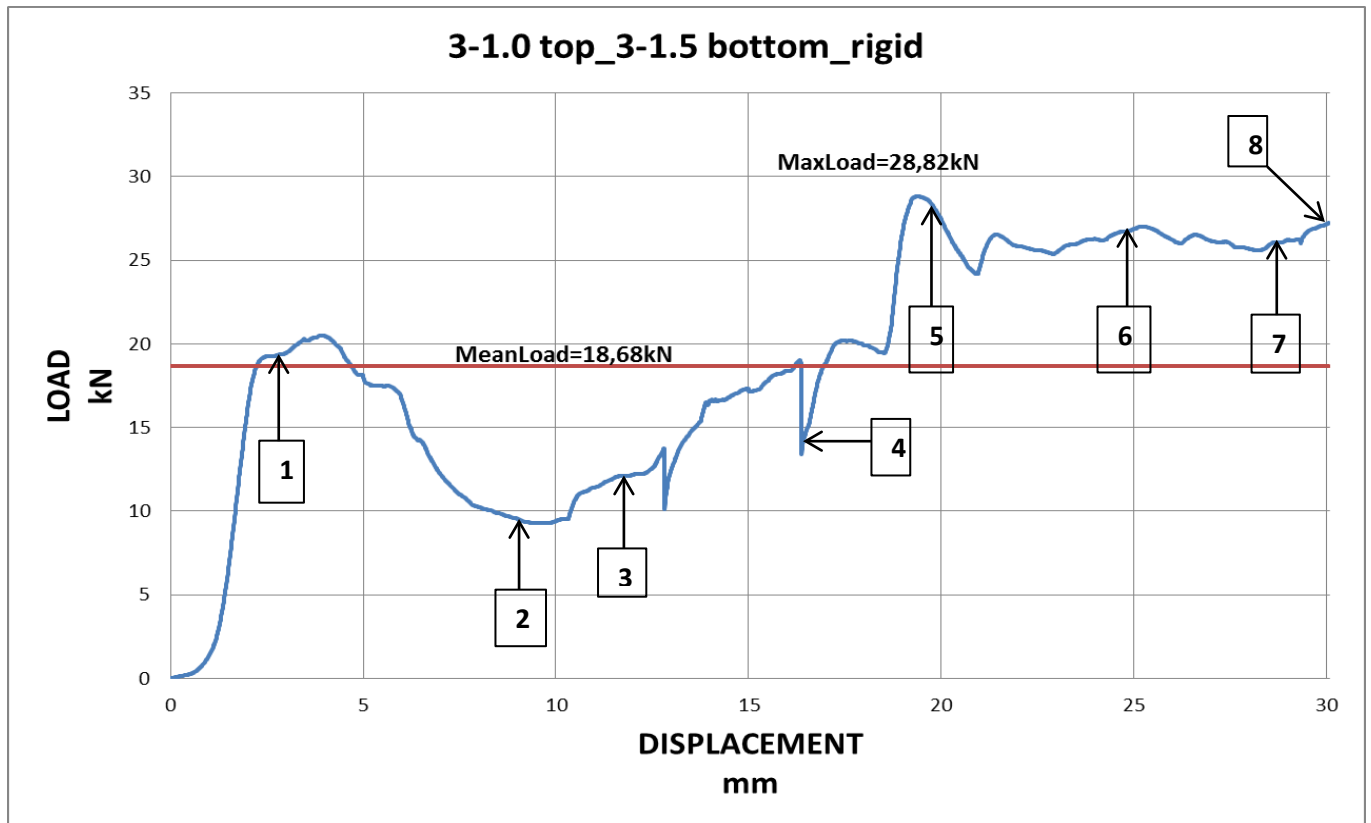
Σημείο 9 στα 30.0mm



ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Διαδρομή Εμβόλου:	S=30mm
Μέσο Φορτίο:	P _{mean} =18,68kN
Μέγιστο Φορτίο:	P _{max} =28,82kN
Δείκτης Ομοιομορφίας Φορτίου:	c.f.e.=0,65
Ενέργεια απορρόφησης:	E _{abs} =560,4Joule

Διαγραμματική Απεικόνιση του πειράματος



Σχόλια επί του πειράματος :

Η βασική παρατήρηση που μπορεί να γίνει στο συγκεκριμένο πείραμα, είναι η ομοιομορφία με την οποία τα δοκίμια παραμορφώνονται.

Η παρουσία των δοκίμων του 1,0mm στην επάνω σειρά κρατάει την δεύτερη πρακτικά απαραμόρφωτη μέχρι περίπου τα 16mm μετατόπισης.

Στα σημεία 2 & 3 βλέπουμε πόσο μεγάλη καμπυλότητα έχουν αποκτήσει τα πάνω δοκίμια χωρίς να έχουν υποστεί θραύση.

Η κατακόρυφη πτώση που φαίνεται λίγο μετά τα 12,5mm και λίγο μετά τα 16mm οφείλεται στην εισχώρηση παρεμβλημάτων στα δοκίμια και την οριακή μη θραύση τους.

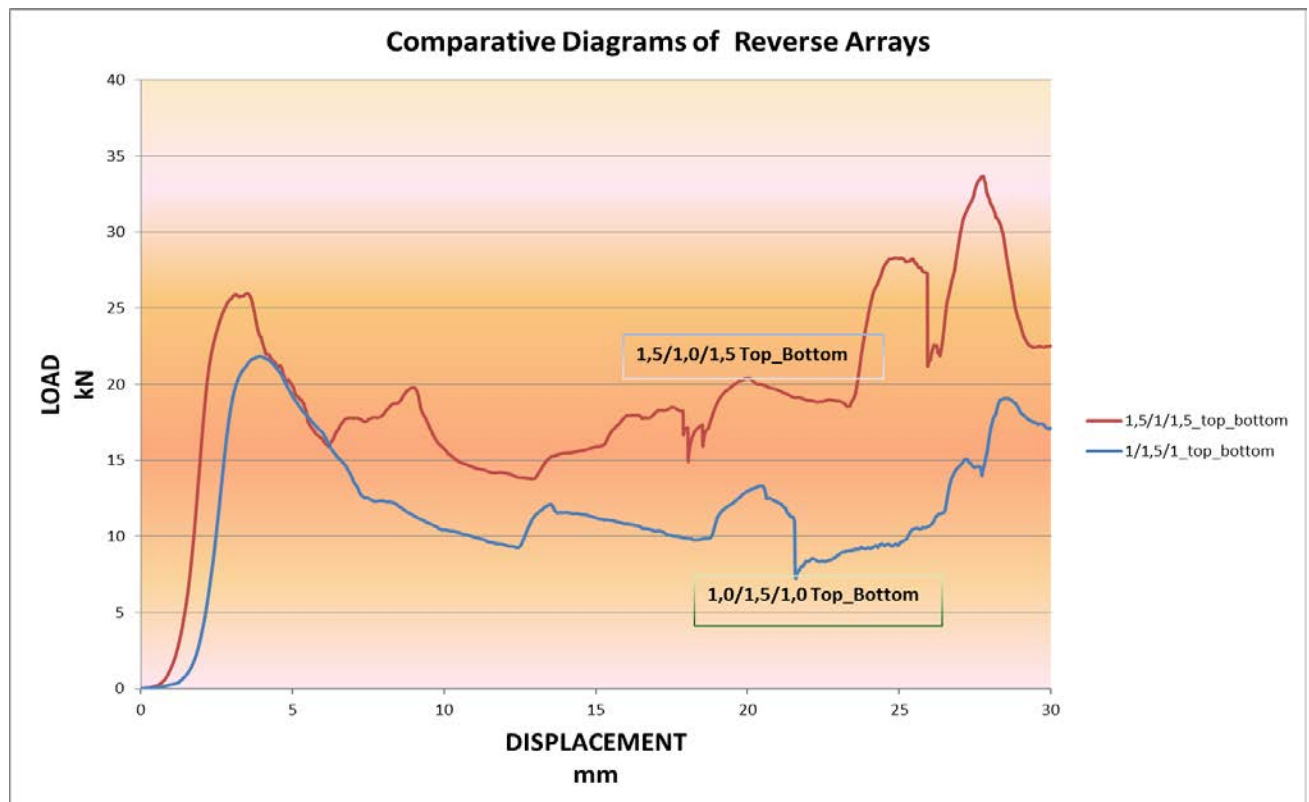
Στα σημεία 5, 6, 7 & 8 παρατηρούμε την σταθερή μείωση του όγκου της διάταξης και την σταθερή τιμή που κρατάει το φορτίο κρούσης.

4.17 Παρατηρήσεις και συγκριτικά αποτελέσματα επί των πειραματικών διατάξεων με μικτά προφίλ

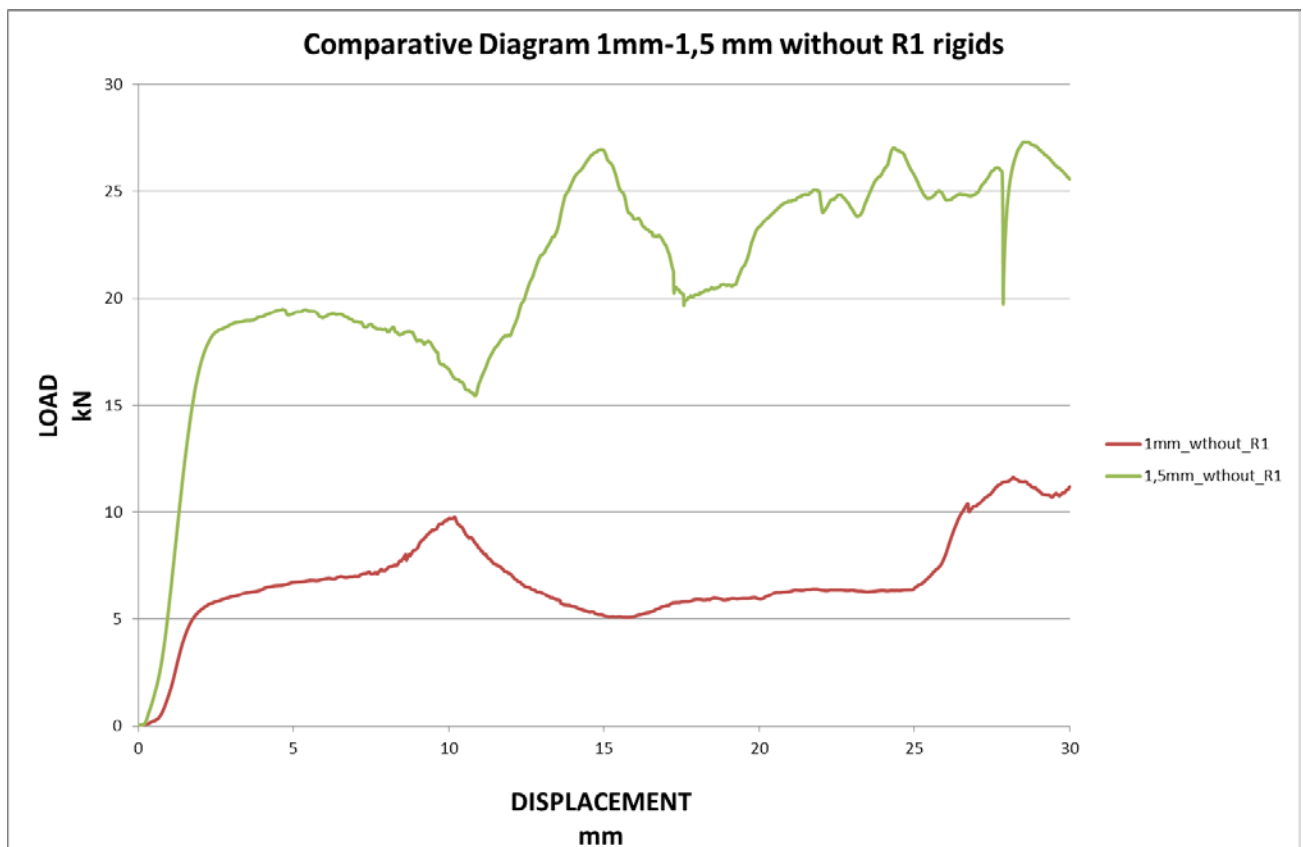
Σύμφωνα με τα πειράματα μικτών διατάξεων που πραγματοποιήθηκαν, μπορούμε να κάνουμε κάποιες σημαντικές παρατηρήσεις.

Όλα τα πειράματα στα οποία χρησιμοποιήθηκε το σύνολο των απαραμόρφωτων παρεμβλημάτων, παρουσίασαν παρόμοιες μορφές καμπυλών ασχέτως των τιμών που έπαιρναν. Συγκεκριμένα, μέχρι τα πρώτα 4mm μετατόπισης του εμβόλου της πειραματικής διάταξης παρουσιαζόταν ένα αρχικό μέγιστο και στη συνέχεια, η τιμή του φορτίου έπεφτε και παρουσίαζε τιμές γύρω από την μέση τιμή φορτίου κάθε προφίλ.

Παραδειγματικά παρουσιάζεται το παρακάτω διάγραμμα που εμφανίζει συγκριτικά τις διατάξεις αντίστροφα τοποθετημένων δοκιμίων κάθε φορά.

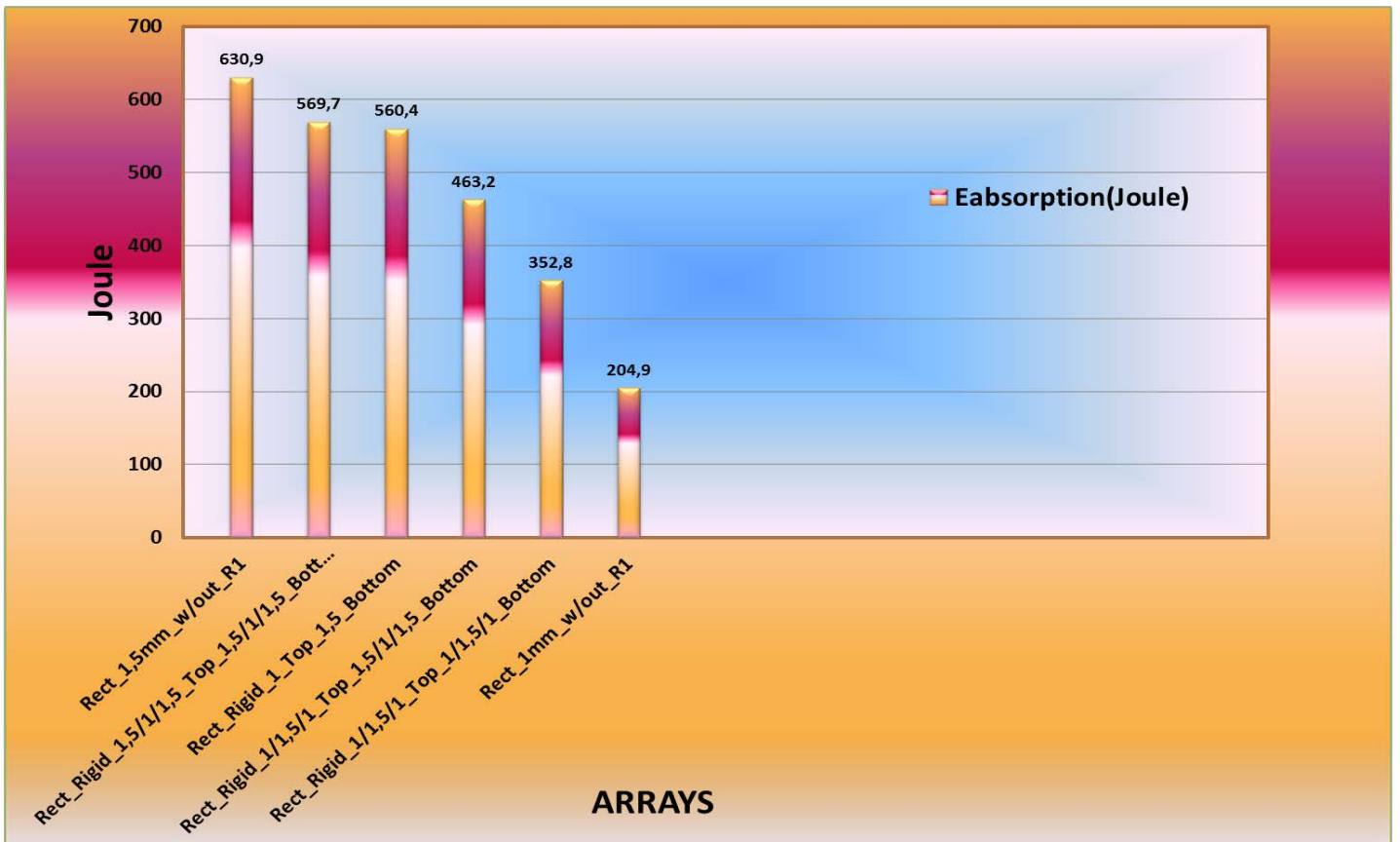
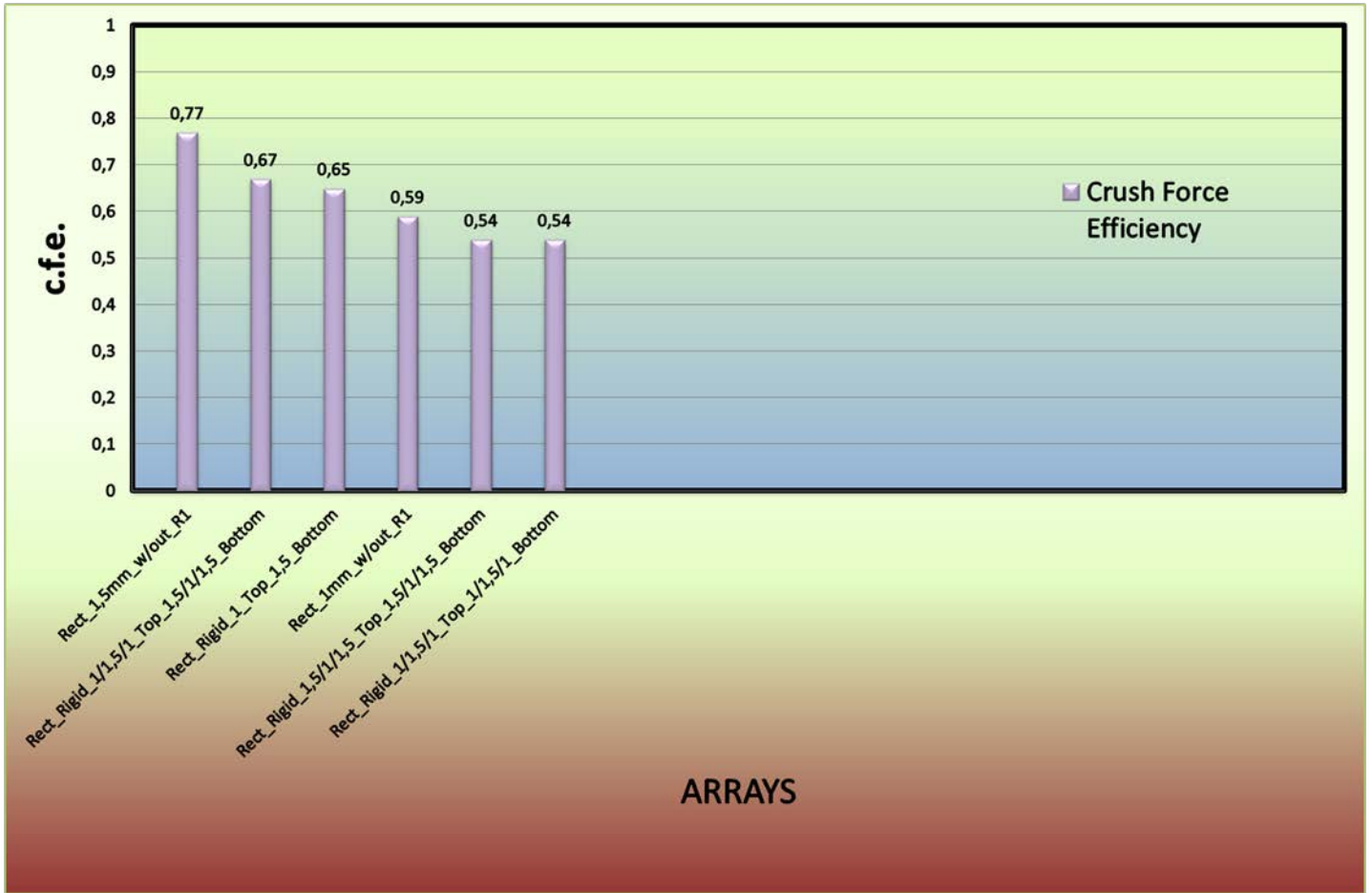


Διαφορά παρουσιάστηκε στις δύο διατάξεις στις οποίες δεν τοποθετήθηκαν τα δύο κεντρικά παρεμβλήματα. Χωρίς να υπολείπονται στην αρχική αύξηση της τιμής, η μετέπειτα πτώση τους προς την περιοχή του plateau και την μέση τιμή, γίνεται πολύ πιο ομαλά καταφέροντας έτσι να διατηρήσουν υψηλό Δείκτη Ομοιομορφίας Φορτίου (**C.F.E.**), αλλά και στην περίπτωση των δοκιμών με πάχος 1,5mm, καταφέρνουν να έχουν την υψηλότερη από αυτές τις διατάξεις Ενέργεια Απορρόφησης ($E_{absorption}$). Τα χαρακτηριστικά αυτά παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Συγκριτικό Διάγραμμα Διατάξεων χωρίς κεντρικά παρεμβλήματα

Και συνοπτικά τα έξι αυτά πειράματα, ταξινομημένα όπως και στην περίπτωση των προηγούμενων οκτώ, παρουσιάζονται με φθίνουσα σειρά για τον Συντελεστή Ομοιομορφίας Φορτίου και για την Ενέργεια Απορρόφησης στα αντίστοιχα διαγράμματα.

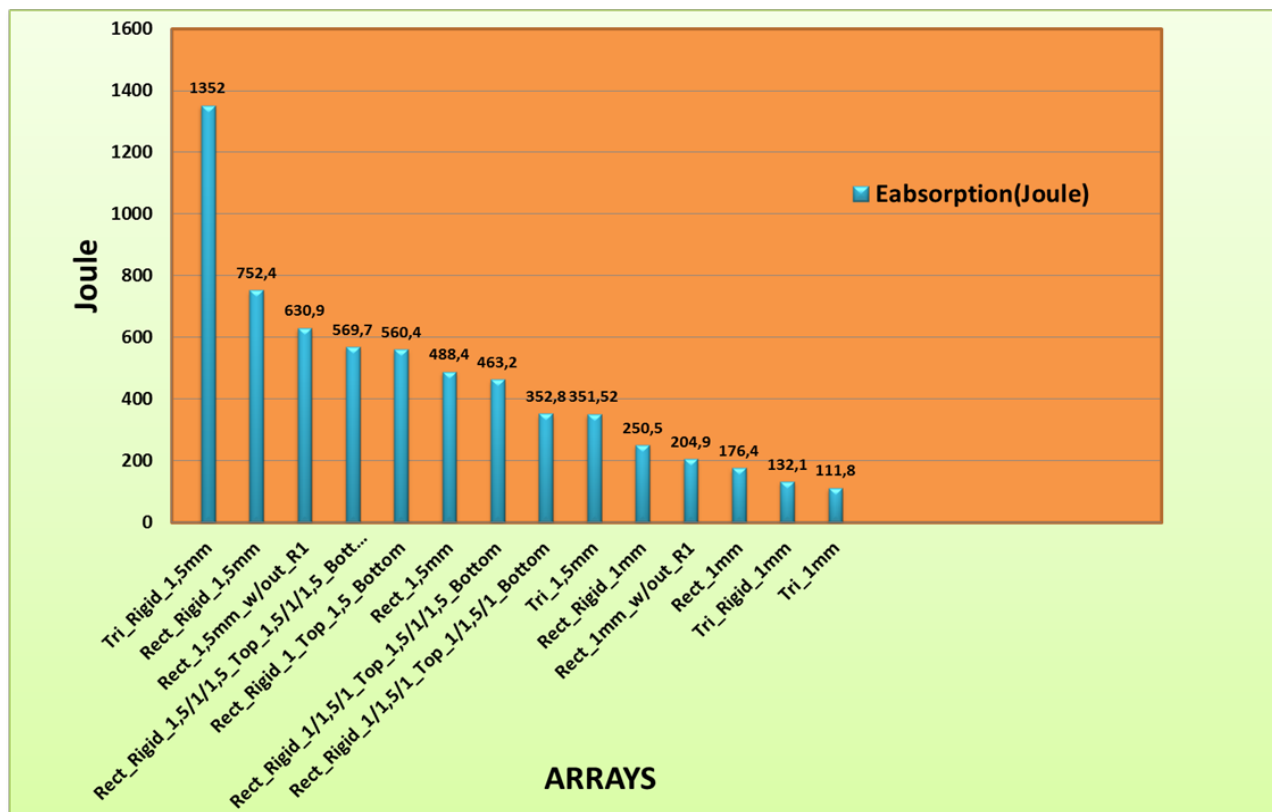


4.18 Συμπεράσματα, Συγκεντρωτικοί Πίνακες και Προτάσεις

Από την διεξαγωγή των πειραμάτων προέκυψε μια σειρά παρατηρήσεων οι οποίες θα πρέπει να συζητηθούν περαιτέρω και μέσω περισσότερων διατάξεων να εξαχθούν ασφαλέστερα συμπεράσματα από όσα τα περιορισμένα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας μας επέτρεψαν.

Χρησιμότητα ή μη, των απαραμόρφωτων παρεμβλημάτων:

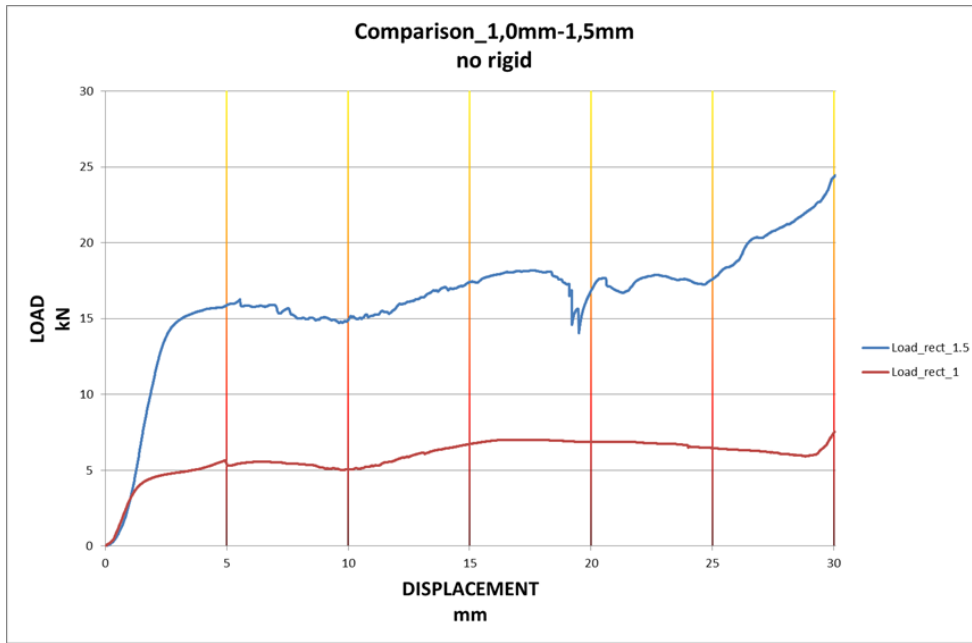
Τα απαραμόρφωτα παρεμβλήματα παρουσίασαν την ιδιότητα να αυξάνουν, σε όλες τις περιπτώσεις, την Ενέργεια Απορρόφησης της διάταξης στην οποία είχαν τοποθετηθεί, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες διατάξεις χωρίς παρεμβλήματα. Ακόμα και στην περίπτωση όπου τα κεντρικά παρεμβλήματα δεν τοποθετήθηκαν, η απορρόφηση ενέργειας παρέμεινε υψηλή.



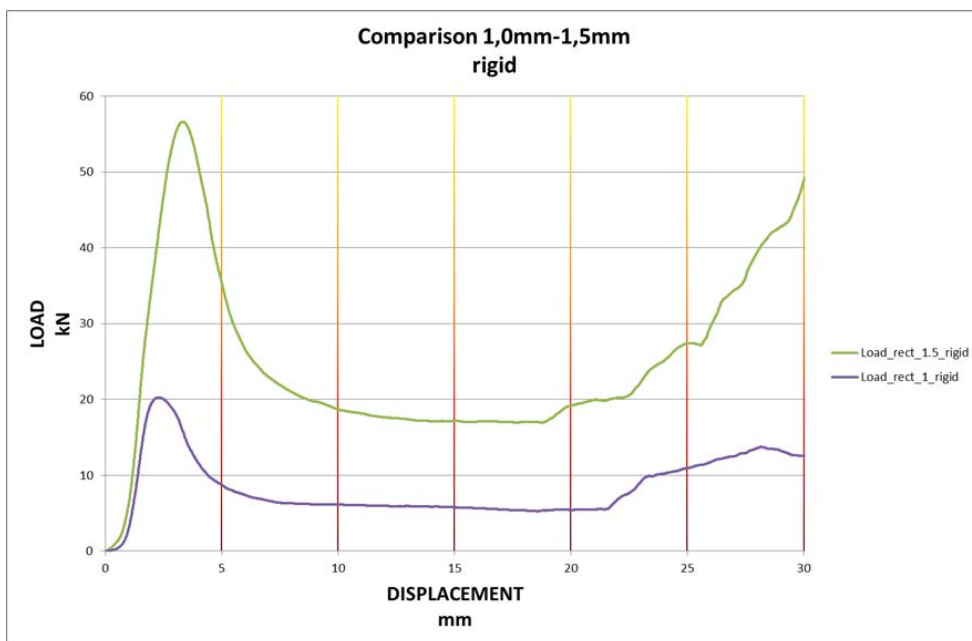
Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Απορρόφησης Ενέργειας όλων των Πειραματικών Διατάξεων

Χρησιμότητα ή μη της επιλογής αύξησης του πάχους –t- των δοκιμών:

Όπως και με τα απαραμόρφωτα παρεμβλήματα, έτσι και η αύξηση του πάχους των δοκιμών από 1,0mm σε 1,5mm δημιούργησε σημαντική αύξηση της απορροφούμενης ενέργειας σε κάθε συγκρίσιμη στο πάχος διάταξη. Ενδεικτικά παραθέτονται τα παρακάτω διαγράμματα



Σύγκριση Ορθογωνικής Διάταξης με παρεμβλήματα 1,0mm & 1,5mm



Σύγκριση Ορθογωνικής Διάταξης χωρίς παρεμβλήματα 1,0mm & 1,5mm

Μπορούμε λοιπόν να συμπεράνουμε, ότι η αύξηση του πάχους των δοκιμίων είναι μία καλή πρακτική προκειμένου να αυξηθεί η ενέργεια απορρόφησης μίας διάταξης.

Χρησιμότητα ή μη της επιλογής μικτού πάχους δοκιμίων:

Οι μικτού πάχους $-t-$ διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα, παρουσίασαν μία μεσαία προς υψηλή απόδοση όσον αφορά την Ενέργεια Απορρόφησης και λόγω της ομοιομορφίας αυτών των διατάξεων πετυχαίνουν και υψηλούς Συντελεστές Ομοιομορφίας.

Οπότε κρίνεται σκόπιμο η διερεύνηση κατάλληλης τοποθέτησης παρεμβλημάτων παράλληλα με την χρήση και διαφορετικών εκτός του 1,0mm και 1,5mm πάχους δοκιμίων, έτσι ώστε να βρεθεί η διάταξη εκείνη που θα συνδυάζει και τα δύο βασικότερα χαρακτηριστικά.

Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση:

Η βασικότερη πρόταση που θα μπορούσε να γίνει για την περαιτέρω διερεύνηση των παρόντων πειραμάτων, είναι η δυνατότητα που μας δίνει η σημερινή υπολογιστική ισχύς των πεπερασμένων στοιχείων (**F.E.M.**) έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα θεωρητικά της προσομοίωσης σε ένα τέτοιο υπολογιστικό πακέτο.

Δευτερευόντως, η πραγματοποίηση περαιτέρω πειραματικής διερεύνησης με την χρήση μικτής γεωμετρίας και πάχους δοκιμίων, για παραδειγμα κυκλικών και τετραγωνικών δοκιμίων σε συνδυασμο ή και ακόμα με διαφορετικά πάχη των εξωτερικών σωληνώσεων.

Έχοντας δει πόσο σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η παρουσία των παρεμβλημάτων ανάμεσα στα υπό πλευρική συμπίεση δοκίμια, θα μπορούσαμε να σκεφτούμε την χρήση παρεμβλημάτων από κάποιο αφρώδες υλικό. Ιδανικά και ακολουθώντας τις σύγχρονες τάσεις των απορροφητών ενέργειας, αυτοί θα μπορούσαν να είναι από κάποιον αφρό μετάλλου, όπως αφρός αλουμινίου που έχει πολύ καλές ιδιότητες απορρόφησης ενέργειας, με εφαρμογή τους είτε εξωτερικά, είτε εσωτερικά των δοκιμίων.

Τέλος, οι τριγωνικές διατάξεις, παρότι αρχικά φαίνονται να μην είναι αποδοτικές θα μπορούσαν να παρουσιάσουν πολύ καλύτερα αποτελέσματα εάν

χρησιμοποιηθούν μικτού πάχους δοκίμια, έτσι ώστε να αυξηθεί η πολύ χαμηλή Ενέργεια Απορρόφησης και οι επίσης χαμηλοί Συντελεστές Ομοιομορφίας που παρουσίασαν. Εάν στους τριγωνικούς απορροφητές μπορούσαμε να προσαρμόσουμε κάποια διάταξη εξωτερικής περιοριστικής γεωμετρίας, το ποσό της Ενέργειας Απορρόφησης θα αυξανόταν σημαντικά και σε συνδυασμό με την σταθερότητα που παρουσίασαν τα διαγράμματα τους στο μεγαλύτερο μήκος της βράχυνσης των διατάξεων, μπορούμε να προσδοκούμε σε πολύ καλύτερα αποτελέσματα.

**Συγκεντρωτικός Πίνακας των δεδομένων όλων των Πειραματικών Διατάξεων,
ταξινομημένος σύμφωνα με τον C.F.E. (Crush Factor Efficiency)**

ARRAY	DISPLACEMENT(mm)	Pmean(kN)	Pmax(kN)	Crush Force Efficiency	Eabsorption(Joule)
Rect_1,5mm_w/out_R1	30	21,03	27,31	0,77	630,9
Rect_1mm	30	5,88	7,55	0,77	176,4
Rect_Rigid_1/1,5/1_Top_1,5/1/1,5_Bottom	30	15,44	23,06	0,67	463,2
Rect_1,5mm	30	16,28	24,45	0,66	488,4
Rect_Rigid_1_Top_1,5_Bottom	30	18,68	28,82	0,65	560,4
Rect_1mm_w/out_R1	30	6,83	11,62	0,59	204,9
Rect_Rigid_1,5/1/1,5_Top_1,5/1/1,5_Bottom	30	18,99	33,65	0,54	569,7
Rect_Rigid_1/1,5/1_Top_1/1,5/1_Bottom	30	11,76	21,82	0,54	352,8
Rect_Rigid_1,5mm	30	25,08	56,62	0,44	752,4
Rect_Rigid_1mm	30	8,35	20,24	0,41	250,5
Tri_Rigid_1,5mm	52	26	66,65	0,39	1352
Tri_1mm	52	2,15	7,93	0,27	111,8
Tri_1,5mm	52	6,76	28,08	0,24	351,52
Tri_Rigid_1mm	52	2,54	12,88	0,19	132,1

Βιβλιογραφία

1. Ayad Arab Ghaidan, ***Specific Energy Absorbed Study Of Aluminum (2024-351T) Tubes Alloy Under Lateral Crush***, Tikrit Journal of Eng. Sciences/Vol.18/No.3/September 2011
2. A.G. Olabi_, Edmund Morris, M.S.J. Hashmi, ***Metallic tube type energy absorbers: A synopsis***, Thin-Walled Structures 45 (2007) 706–726
3. A.A.A. Alghamdi, ***Collapsible impact energy absorbers: An Overview***, Thin-Walled Structures 39 (2001) 189–213
4. Sebastian Lipa, Maria Koteřko, ***Lateral Impact of Tubular Structure – Theoretical and Experimental Analysis. Part 1 – Investigation of Single Tube***, Journal of theoretical And applied mechanics
5. Sebastian Lipa, Maria Koteřko, ***Numerical and experimental collapse analysis of tubular multi-member energy absorbers under lateral compression***, Journal of theoretical and applied mechanics
6. A.G. Olabi_, E. Morris, M.S.J. Hashmi, M.D. Gilchrist, ***Optimised design of nested oblong tube energy absorbers under lateral impact loading***, International Journal of Impact Engineering 35 (2008) 10–26
7. Takashi YOKOYAMA, Akira SOEDA, ***Impact lateral compression of thin-walled circular Aluminum tubes***, Aluminum Alloys, Vol. 3 2035
8. T. YELLA REDDY, S. R. REID, ***Lateral Compression of Tubes and Tube-Systems with Side Constraints***, Int. Journal of Mech. Sci., Vol. 21, PP. 187-199
9. Elfetori F. Abdewi, Shamsuddeen Sulaiman, A.M.S. Hamoud, E. Mahdi, ***Quasi-static axial and lateral crushing of radial corrugated composite tubes***, Thin-Walled Structures 46 (2008) 320–332
10. Qi Chang, Yang Shu, Dong Fangliang, ***Crushing analysis and multiobjective crashworthiness optimization of tapered square tubes under oblique impact loading***, Thin-Walled Structures 2012;59:103–19
11. Reyes A., Langseth M., Hopperstad OS, ***Crashworthiness of aluminum subjected to oblique loading: experiments and numerical analyses***, International Journal of Mechanical Sciences 2002;44:1965–84.

12. S.R. Reid, T.Y. Reddy, ***Effect of strain hardening on the lateral compression of tubes between rigid plates***, Int. J. Solids Struct. 14 (3) (1978) 213–225.
13. E. Morris, A. Olabi, S. Hashmi, ***Experimental and numerical analysis of the static lateral compression of tube type energy absorbers with different indenters***, Eng. J. 59 (8) (2005) 505
14. L.Wu, J.F. Carney III, ***Initial collapse of braced elliptical tubes under lateral compression***, Int. J. Mech. Sci. 39 (9) (1997) 1023–1036
15. T.Y. Reddy, S.R. Reid, ***Phenomena associated with the crushing of metal tubes between rigid plates***, Int. J. Solids Struct. 16 (6) (1980) 545–562
16. Gupta NK, Khullar A., ***Collapse load analysis of square and rectangular tubes subjected to transverse in plane loading***, Thin Walled Struct. 1995;21:345–58
17. F.Tarlochan , F.Samer, A.M.S.Hamouda, S.Ramesh, Karam Khalid, ***Design of thin wall structures for energy absorption applications: Enhancement of crashworthiness due to axial and oblique impact forces***, Thin-WalledStructures71(2013)7–17
18. Witteman WJ., ***Improved vehicle crash worthiness design by control of the energy absorption for different collisions situation***. Netherlands:Eindhoven University of Technology, 1999 PhD thesis
19. Johnson W, Mamalis AG., ***Crashworthiness of Vehicles***, London: Mechanical Engineering Publications Limited; 1978
20. Singh H., ***Fundamentals of hydroforming. Introduction to hydroforming.***, Chap.4. p.1 Soc. Manuf. Eng. 2003
21. Johnson W, Walton A., ***An experimental investigation of the energy dissipation of a number of car bumpers under quasi-static lateral loads.***, Int. Journal Impact Eng. 1983;1(3):301–8
22. Webb D, Webster J, Kormi K., ***Finite element simulation of energy absorption devices under axial static compressive and impact loading***. Intern J Crashworthiness 2001.