

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

**“ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΚΕΛΥΦΩΝ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ”**

“LATERAL COLLAPSE OF SHELLS UNDER VARIOUS
LOADING CONDITIONS”

ΣΔΟΓΚΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2015

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	6
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	7
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
1.1: Νέες ανάγκες στην αυτοκινητοβιομηχανία - Crashworthiness	9
1.2: Μηχανισμός πλευρικής κατάρρευσης κελυφών	12
1.3: Ανάλυση της πειραματικής διαδικασίας	16
1.4: LS-DYNA	19
1.4.1: Γενικά στοιχεία και σύντομη ιστορική αναδρομή	19
1.4.2: Περιγραφή της διαδικασίας σχεδιασμού των μοντέλων που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΚΕΛΥΦΩΝ ΜΕ ΤΟ ΔΙΕΙΣΔΥΤΗ	
ΚΑΘΕΤΟ Η ΠΑΡΑΛΛΗΛΟ ΩΣ ΠΡΟΣ ΑΥΤΑ	29
2.1: Κάθετη διεύθυνση	30
2.1.1: Ορθογωνικό κέλυφος διαστάσεων 50x30x2 κατά μήκος της μεγάλης πλευράς	30
2.1.2: Ορθογωνικό κέλυφος διαστάσεων 50x30x2 κατά μήκος της μικρής πλευράς	34
2.1.3: Τετραγωνικό κέλυφος διαστάσεων 50x50x2	37
2.1.4: Τετραγωνικό κέλυφος διαστάσεων 40x40x2	40
2.1.5: Τετραγωνικό κέλυφος διαστάσεων 30x30x2	43
2.1.6: Κυλινδρικό κέλυφος διαστάσεων $\Phi 50 \times 2$	45
2.2: Παράλληλη διεύθυνση	49

2.2.1: Ορθογωνικό κέλυφος διαστάσεων 50x30x2 κατά μήκος της μεγάλης πλευράς.....	49
2.2.2: Ορθογωνικό κέλυφος διαστάσεων 50x30x2 κατά μήκος της μικρής πλευράς.....	53
2.2.3: Τετραγωνικό κέλυφος διαστάσεων 50x50x2.....	55
2.2.4: Τετραγωνικό κέλυφος διαστάσεων 40x40x2.....	62
2.2.5: Τετραγωνικό κέλυφος διαστάσεων 30x30x2.....	65
2.2.6: Κυλινδρικό κέλυφος διαστάσεων Φ50x2.....	69
2.3: Συγκέντρωση αποτελεσμάτων και σχολιασμός.....	72
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΔΙΕΙΣΔΥΤΗ ΚΕΛΥΦΟΥΣ	
ΣΤΟΝ ΤΡΟΠΟ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ.....	85
3.1: Μοντελοποίηση με τη διαμόρφωση fully-integrated solid element formulation.....	87
3.1.1: Ορθογωνικό κέλυφος διαστάσεων 50x30x2 κατά μήκος της μεγάλης πλευράς.....	87
3.1.2: Ορθογωνικό κέλυφος διαστάσεων 30x50x2 κατά μήκος της μικρής πλευράς.....	89
3.1.3: Τετραγωνικό κέλυφος διαστάσεων 50x50x2.....	91
3.1.4: Τετραγωνικό κέλυφος διαστάσεων 40x40x2.....	92
3.1.5: Τετραγωνικό κέλυφος διαστάσεων 30x30x2.....	94
3.1.6: Κυλινδρικό κέλυφος διαστάσεων Φ50x2.....	95
3.2: Μοντελοποίηση με τη διαμόρφωση constant stress solid element formulation.....	96
3.2.1: Ορθογωνικό κέλυφος διαστάσεων 50x30 κατά μήκος της μεγάλης πλευράς.....	97
3.2.2: Ορθογωνικό κέλυφος διαστάσεων 50x30 κατά μήκος της μικρής πλευράς.....	98
3.2.3: Τετραγωνικό κέλυφος διαστάσεων 50x50.....	99
3.2.4: Τετραγωνικό κέλυφος διαστάσεων 40x40.....	99
3.2.5: Τετραγωνικό κέλυφος διαστάσεων 30x30.....	100
3.2.6: Κυλινδρικό κέλυφος διαστάσεων Φ50.....	101

3.3: Ενδεικτικά πειράματα κατάρρευσης για διείδυση με ενδιάμεσες γωνίες και σύγκριση με τις αντίστοιχες προσομοιώσεις που αναπτύχθηκαν _____	101
3.3.1: Τετραγωνικό κέλυφος διαστάσεων 40x40x2 με γωνία διείδυσης 45°.....	101
3.3.2: Τετραγωνικό κέλυφος διαστάσεων 40x40x2 με γωνία διείδυσης 60°.....	105
3.3.3: Κυλινδρικό κέλυφος διαστάσεων Φ50x2 με γωνία διείδυσης 45°.....	109
3.3.4: Κυλινδρικό κέλυφος διαστάσεων Φ50x2 με γωνία διείδυσης 60°.....	111
3.4: Συγκέντρωση αποτελεσμάτων και σχολιασμός _____	114
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ	
ΣΤΟΝ ΤΡΟΠΟ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ _____	121
4.1: Παρουσίαση αποτελεσμάτων _____	123
4.1.1: Ορθογωνικό κέλυφος διαστάσεων 50x30 κατά μήκος της μεγάλης πλευράς.....	123
4.1.2: Ορθογωνικό κέλυφος διαστάσεων 50x30 κατά μήκος της μικρής πλευράς.....	125
4.1.3: Τετραγωνικό κέλυφος διαστάσεων 50x50.....	126
4.1.4: Τετραγωνικό κέλυφος διαστάσεων 40x40.....	127
4.1.5: Τετραγωνικό κέλυφος διαστάσεων 30x30.....	129
4.1.6: Κυλινδρικό κέλυφος διαστάσεων Φ50.....	131
4.2: Σχολιασμός _____	132
ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ _____	134
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ _____	143

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διπλωματική εργασία εκπονήθηκε με στόχο να αναλυθεί και να μελετηθεί η στατική συμπεριφορά των απορροφητών ενέργειας οι οποίοι αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι του πλαισίου σε κατασκευές διαφόρων ειδών (κυρίως μηχανοκίνητων οχημάτων), με σκοπό την αύξηση της παθητικής ασφάλειας της κατασκευής. Για το λόγο αυτό έγινε μία πλήρης πειραματική και θεωρητική μελέτη της πλευρικής κατάρρευσης ορισμένων κελυφών διαφορετικής γεωμετρίας (ορθογωνικής, τετραγωνικής και κυλινδρικής) σε διάφορες συνθήκες γραμμικής φόρτισης. Όλα τα πειράματα έγιναν στην μηχανική πρέσα του εργαστηρίου του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και κατά τη διάρκειά τους λάβαμε για κάθε δοκίμιο την αντίστοιχη καμπύλη αναπτυσσόμενου φορτίου-βράχυνσης καθώς και φωτογραφίες σχετικά με τον τρόπο κατάρρευσής του. Έπειτα όλα τα πειράματα κατάρρευσης προσομοιώθηκαν στο κατάλληλα εξειδικευμένο λογισμικό LS-DYNA της Livermore Software Technology Corporation (LSTC) με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίθηκαν με τα προαναφερθέντα πειραματικά. Τέλος αφού αποδείξαμε με την προηγούμενη σύγκριση την αξιοπιστία της προσομοίωσης, χρησιμοποιήσαμε το λογισμικό αυτό για περαιτέρω μελέτη της επίδρασης της γεωμετρίας των κελυφών και του τρόπου φόρτισής τους, στην κατάρρευσή τους και κατ' επέκταση στην απορροφητική τους ικανότητα.

ABSTRACT

The thesis was aimed to analyze and study the static behavior of the energy absorbers which form an integral part of the framework of the construction of different types (especially motor vehicles) in order to increase the passive safety of the construction. For this reason, it was made a complete experimental and theoretical study on the lateral collapse of certain shells which have different geometry (rectangular, square and cylindrical) in various linear charge conditions. All the experiments were performed by the mechanical press at the Laboratory of Manufacturing Technology of the National and Technical University of Athens and during them we received for each specimen the corresponding developing load-shortening curve and also photos of the way it collapses. Afterwards, all the collapse experiments were simulated with the appropriate specialized software LS-DYNA of Livermore Software Technology Corporation (LSTC) by the finite element method and the simulation results were compared to the previous experimental. Finally, after we proved by the previous comparison the validation of the simulation, we used this software for a further study on the effect of the shells geometry and of the way they charge on their collapse and their absorptive capacity, by extension.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνίου.

Σκοπός της είναι η ανάλυση της στατικής συμπεριφοράς των ενεργειακών απορροφητών οι οποίοι στις μέρες μας βρίσκουν ολοένα και μεγαλύτερη εφαρμογή σε κατασκευές διαφόρων ειδών, με τη πιο συνηθισμένη κατηγορία εφαρμογών τέτοιων απορροφητών ενέργειας να είναι στο πλαίσιο (chassis) κάθε είδους οχήματος. Κατά την σύγκρουση ενός οχήματος ο τρόπος κατάρρευσής τους και η ικανότητά τους να απορροφούν κινητική ενέργεια, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο για την ασφάλεια των επιβατών καθώς καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τις τελικές δυνάμεις που θα φτάσουν στην καμπίνα του οχήματος. Η ικανότητα αυτή μιας κατασκευής να καταρρέει προοδευτικά και ελεγχόμενα προστατεύοντας παράλληλα κάποια τμήματά της είναι ευρέως γνωστή ως crashworthiness.

Η εργασία αυτή ασχολείται με τη μελέτη της πλευρικής κατάρρευσης κελυφών στα οποία ασκείται γραμμική φόρτιση μέσω ενός κυλινδρικού διεισδυτή. Τα κελύφη που χρησιμοποιήθηκαν είναι ορθογωνικά, τετραγωνικά, κυλινδρικά και όλα μεταλλικά και για την ακρίβεια κατασκευασμένα από αλουμίνιο (Al).

Αρχικά έγιναν δώδεκα δοκιμές κατάρρευσης στην πρέσσα του εργαστηρίου στα έξι διαφορετικά κελύφη που είχαμε στη διάθεσή μας. Για κάθε κέλυφος έγινε μία δοκιμή με το διεισδυτή κάθετο προς αυτό και μία ακόμα με το διεισδυτή παράλληλο προς αυτό. Για κάθε περίπτωση λάβαμε από το λογισμικό της πρέσσας την αντίστοιχη καμπύλη φορτίου-μετατόπισης ενώ φωτογράφισαμε το μοντέλο σε πολλές ενδιάμεσες φάσεις της διαδικασίας προκειμένου να έχουμε μία πλήρη εικόνα για τον τρόπο κατάρρευσής του. Στη συνέχεια οι παραπάνω δοκιμές μοντελοποιήθηκαν με κώδικα πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis) στο λογισμικό LS-DYNA της εταιρίας Livermore Software Technology Corporation (LSTC). Σκοπός μας ήταν αφ' ενός να μελετηθεί η συμπεριφορά των μεταλλικών κελυφών σε πλευρική γραμμική φόρτιση και αφ' ετέρου να ερευνήσουμε την αξιοπιστία της προσομοίωσης του παραπάνω λογισμικού.

Στη συνέχεια αφού παρατηρήσαμε τις διαφορές ανάμεσα σε παράλληλη και κάθετη διείσδυση, γίνεται και στα έξι δοκίμια που μελετήσαμε ήδη διερεύνηση της επίδρασης της γωνίας μεταξύ διεισδυτή και κελύφους στον τρόπο κατάρρευσής τους. Για το λόγο αυτό, στα ήδη υπάρχοντα, προστέθηκαν επιπλέον μοντέλα προσομοίωσης με ενδιάμεσες γωνίες

διείσδυσης και βήμα 15° , δηλαδή με γωνίες 15° , 30° , 45° , 60° και 75° με σκοπό να οδηγηθούμε σε μια βέλτιστη λύση τόσο ως προς τη στιβαρότητα των κελυφών όσο και ως προς την ομοιομορφία του φορτίου που παραλαμβάνουν. Επίσης πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο τέσσερα επιπλέον πειράματα με τυχαίους συνδιασμούς γωνίας διείσδυσης και είδους κελύφους με σκοπό να αξιολογήσουμε την αξιοπιστία της μοντελοποίησης και στην περίπτωση αυτή.

Σε όλα τα πειράματα και τις προσομοιώσεις που περιγράψαμε μέχρι στιγμής το πάχος των τοιχωμάτων των κελυφών ήταν σε κάθε περίπτωση 2mm. Για το λόγο αυτό, στο τέλος της εργασίας αναλύθηκε ο τρόπος επίδρασης του πάχους των κελυφών στον τρόπο κατάρρευσής τους. Για την διερεύνηση αυτή στα έξι δοκίμια της δοκιμής και για κάθετη τοποθέτησή τους ως προς το διεισδυτή (στη συνέχεια εξηγείται ο λόγος που επιλέχθηκε αυτή η γωνία διείσδυσης), σχεδιάστηκαν και επιλύθηκαν επιπλέον μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων που αντιστοιχούν σε διαφορετικό πάχος τοιχωμάτων.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών κύριο Δημήτριο Μανωλάκο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα το μέλος ΕΔΙΠ Δρ. Μηχ. Πρωτεσίλαο Κωστάζο για την βοήθειά του κατά την πειραματική διαδικασία, την εκμάθηση του κώδικα καθώς και σε ότι άλλο χρειάστηκε κατά τη διάρκεια ενασχόλησής μου με την εργασία αυτή. Τέλος θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον τεχνίτη του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών κύριο Νικόλαο Μελισσά καθώς και τον Κωνσταντίνο Κερασιώτη για την πολύτιμη βοήθειά τους κατά την προετοιμασία και κατά την εκτέλεση των πειραμάτων αντίστοιχα.

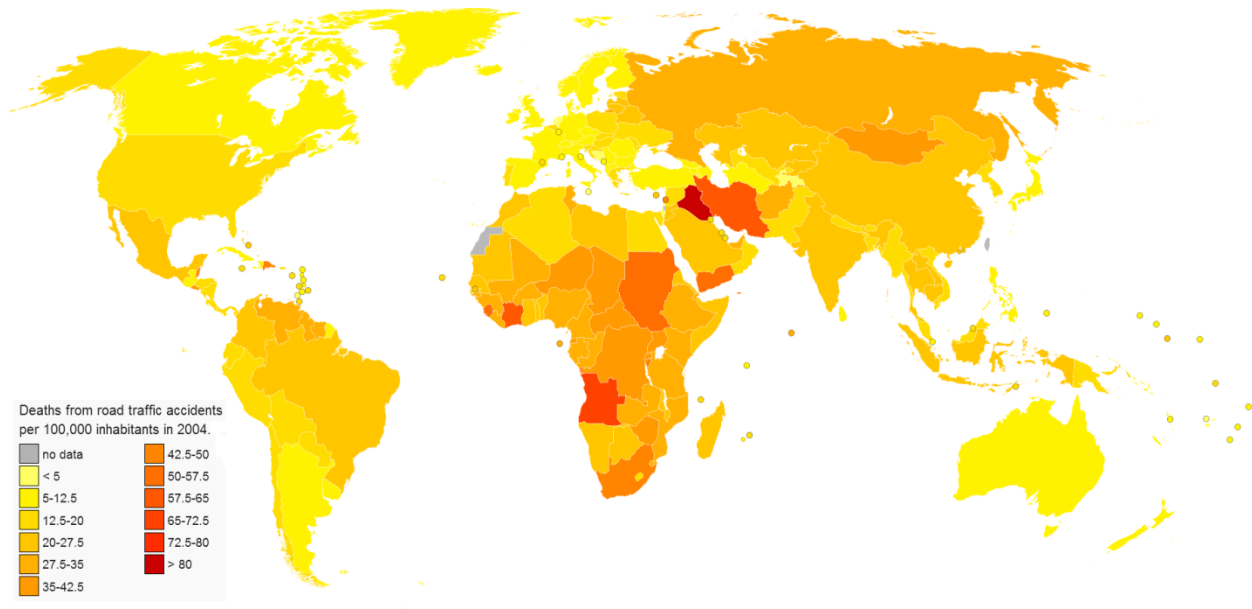
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.

1.1: Νέες ανάγκες στην αυτοκινητοβιομηχανία - Crashworthiness

Τα τελευταία χρόνια τα τροχαία ατυχήματα αποτελούν μία από τις πιο συνηθισμένες αιτίες θανάτου παγκοσμίως. Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας, επηρέασε σημαντικά και τον κλάδο της αυτοκίνησης καθώς παράγονται ολοένα και γρηγορότερα αυτοκίνητα τα οποία ταυτόχρονα διατίθενται και σε αρκετά προσιτές τιμές. Οι στατιστικές που αφορούν τροχαία ατυχήματα είναι σοκαριστικές, καθώς:

- Περίπου 1.300.000 άνθρωποι παγκοσμίως χάνουν τη ζωή τους σε τροχαία ατυχήματα νούμερο που μεταφράζεται σε κατά μέσο όρο 3564 θανάτους σε καθημερινή βάση.
- Παράλληλα πάνω από 2.000.000 άνθρωποι κάθε χρόνο τραυματίζονται σοβαρά ή αποκτούν κάποια μόνιμη αναπηρία.
- Σήμερα τα τροχαία δυστυχήματα αποτελούν παγκοσμίως την ένατη αιτία θανάτου αντιπροσωπεύοντας το 2,2% των συνολικών θανάτων.
- Επιπρόσθετα είναι η πρώτη αιτία θανάτου για την ηλικιακή ομάδα 15-29 ετών και η δεύτερη για την ηλικιακή ομάδα 5-14 ετών. [1], [2]

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται γραφικά, με βάση χρωματική κλίμακα που αναλύεται στο υπόμνημα, η συχνότητα θανάτων που ευθύνονται σε τροχαία ατυχήματα σε όλο το εύρος του πλανήτη. Η έρευνα έγινε από τον αρμόδιο οργανισμό World Health Organization (WHO) και αφορά στο έτος 2004. [12]



Εικόνα 1.1: Γραφική απεικόνιση του αριθμού των θανάτων που οφείλονται σε τροχαία ατυχήματα παγκοσμίως

Τα παραπάνω μοιραία οδήγησαν τις αυτοκινητοβιομηχανίες σε ριζικές αλλαγές του τρόπου σχεδιασμού και κατασκευής των οχημάτων με βασικό γνώμονα την εξασφάλιση της μέγιστης δυνατής ασφάλειας των επιβατών σε περίπτωση σύγκρουσης. Ενώ παλαιότερα κατά το σχεδιασμό του πλαισίου ενός οχήματος κυρίαρχο θέμα μελέτης ήταν η γεωμετρία, η εργονομία και οι μηχανικές ιδιότητές του (ακαμψία, ικανότητα απορρόφησης κραδασμών, κτλ), πλέον όλος ο σχεδιασμός του πλαισίου αλλά και του οχήματος γενικότερα έχει αποκτήσει έναν πιο ανθρωποκεντρικό χαρακτήρα. Η παλαιότερη ευρεία χρήση του χάλυβα ως υλικού κατασκευής του πλαισίου έχει μειωθεί, με τη θέση του να παίρνουν διαφορετικής φιλοσοφίας υλικά όπως το αλουμίνιο, το κέβλαρ, οι ίνες άνθρακα, κτλ, ενώ και το ίδιο το πλαίσιο ενισχύεται τοπικά σε σημεία που αναμένεται να υπάρξει υψηλή συγκέντρωση τάσεων κατά τη διάρκεια μιας σύγκρουσης. Ζητούμενο πλέον είναι κατά τη σύγκρουση όλα τα μέρη του οχήματος· το πλαίσιο, το υποπλαίσιο (αν υπάρχει), το εξωτερικό αμάξωμα ακόμα και ο κινητήρας και τα υπόλοιπα περιφερειακά του μέρη να παραμορφωθούν ελεγχόμενα και προοδευτικά απορροφώντας ένα μεγάλο μέρος απ' την κινητική ενέργεια της σύγκρουσης και χωρίς να μεταφέρουν μεγάλες δυνάμεις στην καμπίνα. Με άλλα λόγια είναι επιδιωκόμενο αυτό που στη διεθνή ορολογία είναι γνωστό σαν *crashworthiness*, όρος με τον οποίο, όπως τονίσαμε και στον πρόλογο, αναφερόμαστε στην ικανότητα μιας δομής να παραμορφώνεται ελεγχόμενα προστατεύοντας έτσι τους επιβάτες της σε περίπτωση σύγκρουσης. Απ' την άλλη μεριά ένα όχημα παλαιάς τεχνολογίας κατά τη σύγκρουση παραμορφώνεται ελάχιστα στα σημεία που θα έπρεπε (σε φορείς ικανούς να απορροφήσουν κινητική ενέργεια) μεταφέροντας την παραμόρφωση

καθώς και έντονα φορτία μέχρι την καμπίνα αυξάνοντας έτσι τον κίνδυνο σωματικής βλάβης για τους επιβάτες. Ένα πολύ χαρακτηριστικό παράδειγμα σχετικά με όσα προαναφέρθηκαν είναι το crash test που έγινε το 2009 απ' τον αρμόδιο οργανισμό ασφάλειας αυτοκινήτων IIHS (Insurance Institute for Highway Safety). Στο crash test συμμετείχαν δύο αυτοκίνητα της Chevrolet, ένα Chevrolet Bel Air του 1959 και ένα Chevrolet Malibu του 2009, τα οποία συγκρούστηκαν μετωπικά έχοντας ίσου μέτρου και αντίθετης φοράς ταχύτητες. Τα δύο αυτοκίνητα τα χωρίζουν 50 χρόνια τεχνολογικής εξέλιξης, ενώ πρέπει να αναφέρουμε επίσης ότι το μεν Malibu είναι ένα προσιτό μικρομεσαίο αυτοκίνητο, ενώ το δε Bel Air ήταν ένα πολυτελές αυτοκίνητο-βιτρίνα της κατασκευάστριας εταιρίας. Τα αποτελέσματα του test φαίνονται στις δύο εικόνες που ακολουθούν: [3], [4], [10], [27]



Εικόνα 1.2: Τα δύο αυτοκίνητα της Chevrolet (Bel Air και Malibu) κατά τη διάρκεια της μετωπικής σύγκρουσής τους



Εικόνα 1.3: Τα δύο αυτοκίνητα της Chevrolet (Bel Air και Malibu) έπειτα από τη μετωπική σύγκρουσή τους

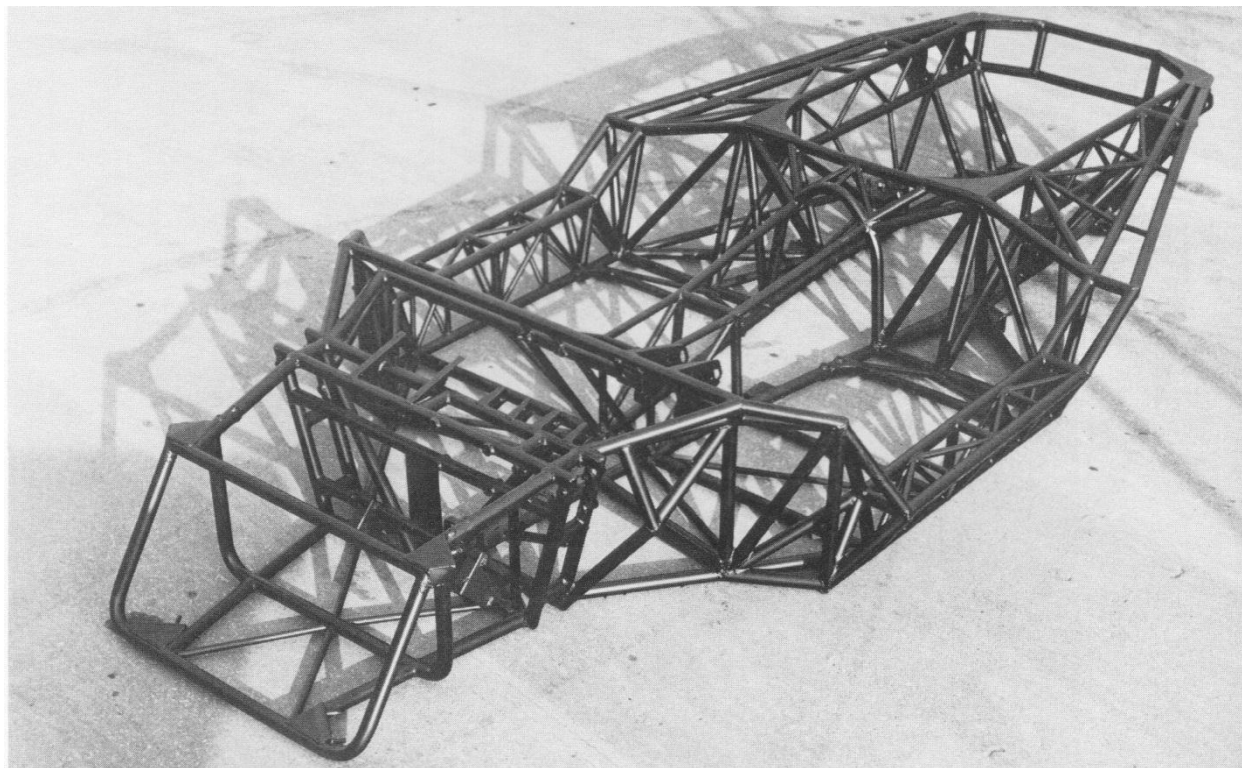
Αμέσως παρατηρούμε ότι οι διαφορές στον τρόπο παραμόρφωσης των δύο οχημάτων είναι χαοτικές. Στο Bel Air του 1959 η παραμόρφωση δεν έγινε προοδευτικά καθώς όλα τα μηχανικά μέρη οδηγήθηκαν στην καμπίνα περιορίζοντας το χώρο του οδηγού, ο οποίος προφανώς και σε ένα αντίστοιχο πραγματικό συμβάν θα είχε χάσει τη ζωή του (ή στην καλύτερη περίπτωση θα είχε τραυματιστεί εξαιρετικά σοβαρά). Απ' την άλλη μεριά στο Malibu του 2009 όλα τα μηχανικά μέρη και το αμάξωμά του παραμορφώθηκαν έντονα απορροφώντας μεγάλο μέρος της κινητικής ενέργειας της σύγκρουσης, με αποτέλεσμα όπως βλέπουμε η καμπίνα του οχήματος να έχει παραμείνει αναλλοίωτη, ενώ σε συνδιασμό με την ύπαρξη αερόσακων είναι σχεδόν βέβαιο ότι ο οδηγός κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης δεν υπέστη κάποια σοβαρή σωματική βλάβη.

1.2: Μηχανισμός πλευρικής κατάρρευσης κελυφών

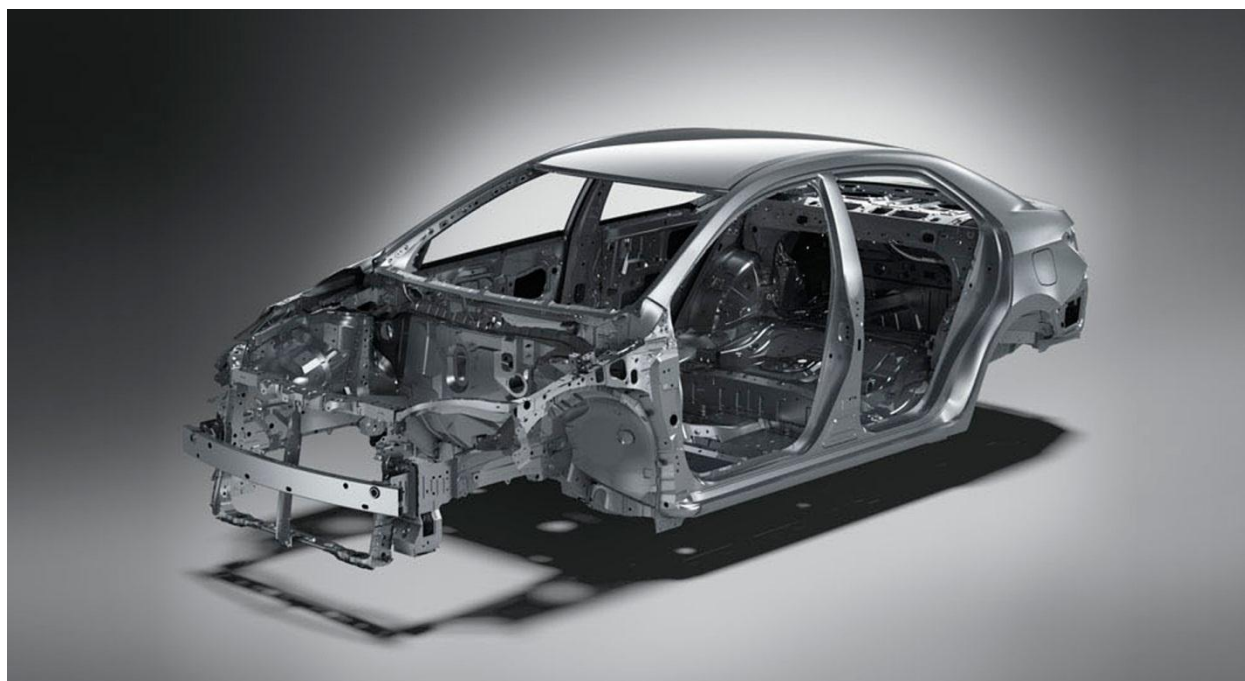
Όπως αναφέραμε και πιο πάνω οι μηχανισμοί απορρόφησης ενέργειας σταματούν ελεγχόμενα μια κινούμενη μάζα, μετατρέποντας την κινητική της ενέργεια σε πλαστική ενέργεια παραμόρφωσης. Η χρήση κελυφών (σωλήνων) σε μηχανισμούς απορρόφησης ενέργειας αποτελεί ένα βασικό αντικείμενο μελέτης και μία σημαντική κατασκευαστική τάση τα τελευταία χρόνια. Η μελέτη του τρόπου κατάρρευσης των κελυφών μας οδηγεί στην κατανόηση του τρόπου που αυτά απορροφούν κινητική ενέργεια. Οι βασικότερες μέθοδοι φόρτισης είναι η αξονική, η πλευρική φόρτιση και ο λυγισμός, με την κάθε μια να παρουσιάζει τις δικές της ιδιαιτερότητες και να διέπεται από ξεχωριστούς νόμους, με την πλευρική κατάρρευση κελυφών να είναι αυτή που μελετάται στην παρούσα εργασία. Στην περίπτωση αυτή διακρίνουμε τρεις κατηγορίες φόρτισης· την επίπεδη που γίνεται από μια επίπεδη κινούμενη πλάκα, την γραμμική που πραγματοποιείται συνηθέστερα από ένα κύλινδρο μικρής διαμέτρου και την σημειακή που προκαλείται συνήθως από μια μικρής διαμέτρου σφαίρα, με την διπλωματική εργασία αυτή να ασχολείται με την πλευρική

γραμμική φόρτιση. Οι βασικοί λόγοι που μας οδήγησαν σε αυτή την επιλογή φόρτισης είναι αρκετοί:

Αρχικά είναι γεωμετρικά πιο συμπαγής απ’ τις άλλες περιπτώσεις φόρτισης, γεγονός που την καθιστά πολύ συχνά συναντώμενη σε κατασκευές που φτιάχνονται με την τάση “downsizing” όπως τα περισσότερα οχήματα (και συνεπώς και τα πλαίσιά τους) και επομένως πιο προσιτή στην κατασκευή της διατηρώντας μάλιστα παρόμοια ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Παράλληλα ακόμα και σήμερα που η τεχνολογία των κατεργασιών έχει εξελιχθεί σημαντικά και παράγονται όλο και πιο φθηνά monocoque πλαίσια (που αποτελούν το 99% της συνολικής παραγωγής πλαισίων), ένα μεγάλο μέρος των πλαισίων (αλλά και των υποπλαισίων εφόσον υπάρχουν) σε κάθε είδους όχημα, και συνηθέστερα σε οχήματα επιδόσεων ή οχήματα ειδικής χρήσης μικρής συνήθως παραγωγής, αποτελούν τα σωληνωτά πλαίσια τα οποία έχουν μεγάλο βαθμό ομοιότητας με τον κυλινδρικό διεισδυτή που χρησιμοποιούμε στην περίπτωση της γραμμικής πλευρικής φόρτισης. Αλλά ακόμα και στις περιπτώσεις πιο συμβατικών monocoque πλαισίων ένα μεγάλο μέρος τους αποτελείται από νεύρα διαφόρων διατομών (κυλινδρικών, τριγωνικών, ορθογωνικών, πρισματικών, σύνθετων, κτλ) που κατά τη διάρκεια μιας σύγκρουσης έρχονται σε επαφή μεταξύ τους και η μελέτη κατάρρευσης των οποίων οδηγεί στην ανάλυση που ακολουθεί στην παρούσα εργασία. Οι βασικότερες μορφές διατομών των σωλήνων που συναντάμε σε τέτοιες κατασκευές αναφέρθηκαν προηγουμένως, ενώ στη συνέχεια ερευνάται διεξοδικά η κατάρρευση κυλινδρικών, ορθογωνικών και τετραγωνικών σωλήνων. Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται δύο τύποι πλαισίων, ένα σωληνωτό με σωλήνες τεσσάρων διαφορετικών διαμέτρων που ανήκει σε μια Lamborghini Countach και ένα πιο κοινό monocoque πλαίσιο που ανήκει στο εξαιρετικά δημοφιλές Toyota Corolla του 2013. [5], [7], [11]



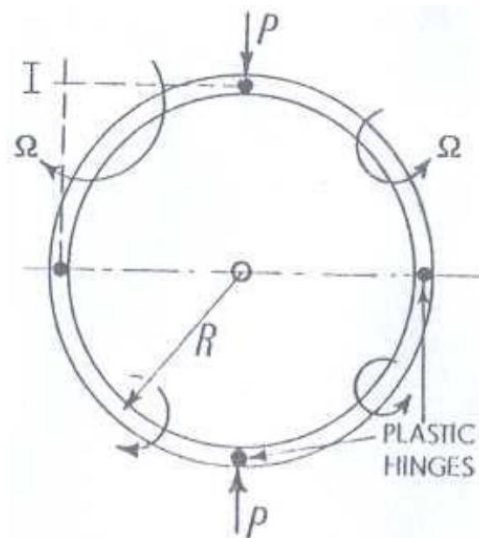
Εικόνα 1.4: Σωληνωτό πλαίσιο υψηλού κόστους και ποιότητας μιας Lamborghini Countach



Εικόνα 1.5: Συνθησιμένο τύπου monocoque πλαίσιο που ανήκει σε ένα Toyota Corolla του 2013

Η πλευρική κατάρρευση κελυφών υπό την επίδραση γραμμικής φόρτισης λόγω της πολυπλοκότητάς της και της ευρύτητας των πιθανών συνδιασμών συνθηκών φόρτισης (γωνία διεισδυτή ως προς το κέλυφος, γεωμετρία κελύφους, γεωμετρία διεισδυτή, κτλ) δεν μπορεί να μελετηθεί εύκολα από θεωρητική σκοπιά. Το γεγονός αυτό αποτελεί και βασικό λόγο που επιλέξαμε να ασχοληθούμε με ένα τέτοιου είδους θέμα προκειμένου να αποκομίσουμε χρήσιμα συμπεράσματα πάνω σε ένα αντικείμενο που είναι δύσκολο έως αδύνατο να μελετηθεί με διαφορετικό τρόπο.

Εντελώς αυθαίρετα θα μπορούσαμε να κάνουμε μία κατηγοριοποίηση του τρόπου κατάρρευσης μεταλλικών κελυφών με βάση τη γεωμετρία του κελύφους και ειδικότερα με βάση την ύπαρξη ή όχι γωνιών σ' αυτό που οδηγούν στο σχηματισμό σημείων με υψηλή συγκέντρωση τάσεων. Η πρώτη λοιπόν απ' τις δύο κατηγορίες είναι αυτή των κυλινδρικών κελυφών που μετά την άσκηση της πλευρικής φόρτισης οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις και ροπές σ' αυτό φαίνονται στην εικόνα που ακολουθεί:



Εικόνα 1.6: Κατανομή δυνάμεων και ροπών σε κυλινδρικό κέλυφος

Στη συνέχεια της διαδικασίας η κατάρρευση εξαπλώνεται σταδιακά απ' τη διατομή της αρχικής φόρτισης σε όλο το μήκος του κελύφους με τρόπο που εξαρτάται απ' τη γεωμετρία και το υλικό του. Μέχρι στιγμής θεωρήσαμε ότι η γραμμική πλευρική φόρτιση γίνεται σε κάθετη ως προς το σωλήνα διεύθυνση. Σε περίπτωση που η γωνία είναι διαφορετική από 90° ισχύουν όσα αναφέραμε παραπάνω με τη διατομή να έχει σε αυτή την περίπτωση ελλειπτικό και όχι κυκλικό σχήμα και συνεπώς να υπάρχουν και ορισμένες διαφορές στον τρόπο σχηματισμού πλαστικών αρμών που στην περίπτωση αυτή είναι πιο έντονος στις δύο πλευρές του κελύφους απ' ότι στις κορυφές του. Η περίπτωση παράλληλης

τοποθέτησης κελύφους και διεισδυτή παρουσιάζει έντονη ιδιαιτερότητα και είναι εξαιρετικά σπάνια σε πρακτικές εφαρμογές συστημάτων απορρόφησης ενέργειας.

Η δεύτερη κατηγορία είναι αυτή των κελυφών με γωνίες, ο τρόπος κατάρρευσης των οποίων υπό την επίδραση πλευρικής γραμμικής φόρτισης είναι εξαιρετικά δύσκολο αλλά και άσκοπο να μελετηθεί σε θεωρητική βάση (κυρίως λόγω των πολλών διαφορετικών περιπτώσεων γεωμετρίας κελύφους και διεύθυνσης φόρτισης).

Σε κάθε περίπτωση στη συνέχεια της εργασίας παρουσιάζεται ο τρόπος κατάρρευσης κελυφών και ανάπτυξης τάσεων σ' αυτά πειραματικά αλλά και θεωρητικά με βάση το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε (LS-DYNA) με τη βοήθεια κατάλληλων προοδευτικών εικόνων κατάρρευσης που απεικονίζουν την διαμόρφωση της συνολικής τάσης και της πλαστικής παραμόρφωσης πάνω στο κέλυφος. [18-26], [28-30]

1.3: Ανάλυση της πειραματικής διαδικασίας

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται 16 πειράματα πλευρικής κατάρρευσης σε διάφορες συνθήκες. Τα 12 πειράματα που παρουσιάζονται στο δεύτερο κεφάλαιο έγιναν στα πλαίσια της εκπόνησης δύο διαφορετικών διπλωματικών εργασιών και έχουν παρουσιαστεί και σε προηγούμενη αμιγώς πειραματική διπλωματική εργασία του Δημήτριου Ντάσιου με τίτλο “Πλευρική καταπόνηση μεταλλικών κελυφών με κυλινδρικό διεισδυτή” τον Νοέμβριο του 2014 [17]. Τα υπόλοιπα 4 που παρουσιάζονται στο τρίτο κεφάλαιο έγιναν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Όλα τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στη μηχανική πρέσα δοκιμών INSTRON 4482 ονομαστικού φορτίου 10 τόνων (100KN) του εργαστηρίου του τομέα τεχνολογίας των κατεργασιών υπό σταθερή ταχύτητα διείδυσης 10mm/min και τα αποτελέσματα λήφθηκαν από τον αντίστοιχο ηλεκτρονικό υπολογιστή με τον οποίο συνεργάζεται η πρέσα μέσω του αντίστοιχου λογισμικού τους. Παράλληλα σε όλη τη διαδικασία της κατάρρευσης πάρθηκαν ορισμένες φωτογραφίες του κελύφους και καταγράφηκε το στάδιο της κατάρρευσής του (σε mm βράχυνσης του κελύφους) στο οποίο αντιστοιχεί η κάθε μια. Η πειραματική διάταξη που περιγράψαμε φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία:



Εικόνα 1.7: Ο πειραματικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε. Η φωτογραφία πάρθηκε στο ισόγειο του Τομέα των Κατεργασιών. Στην περίπτωσή μας η άνω πλάκα είχε αντικατασταθεί από το σύστημα εμβόλου πρέσας- βάσης στήριξης διεισδυτή – κυλινδρικού διεισδυτή που παρουσιάζεται στη συνέχεια στην εικόνα 1.8.

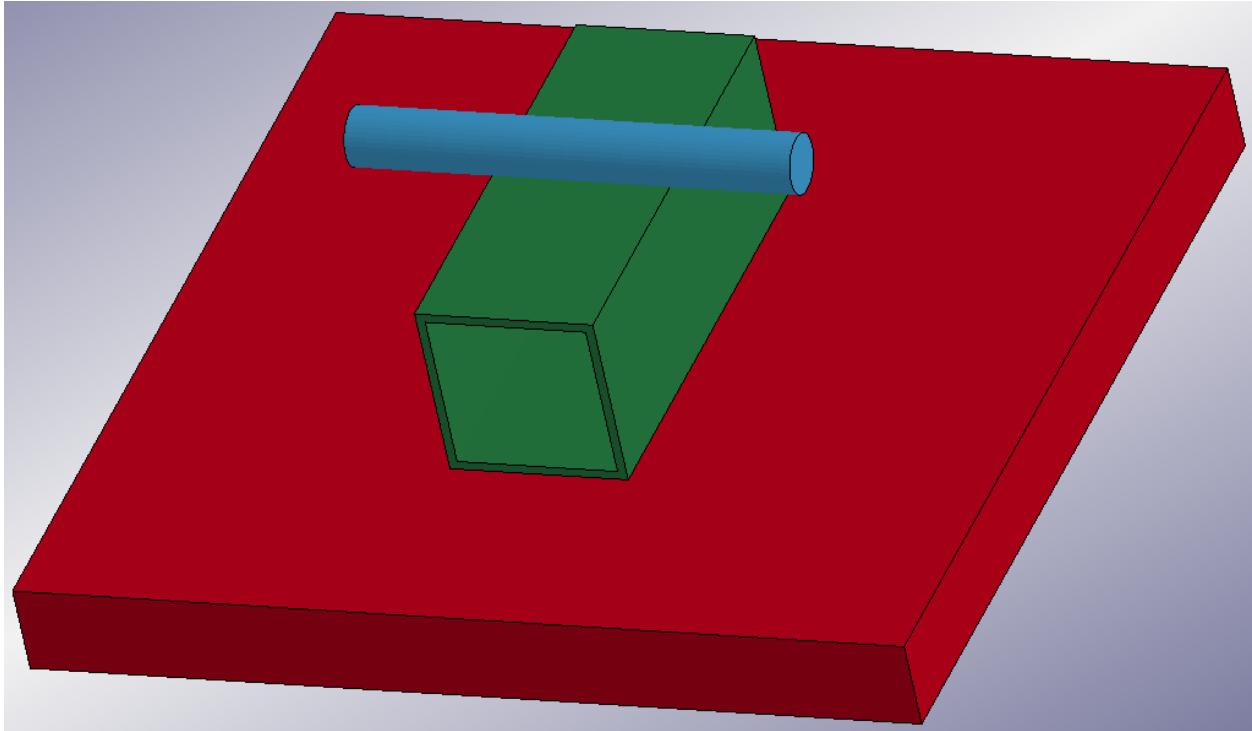
Τα προς κατάρρευση δοκίμια τοποθετήθηκαν στην κάτω επίπεδη πλάκα της πρέσας, ενώ ο κυλινδρικός διεισδυτής μήκους 100mm και διαμέτρου 13mm που χρησιμοποιήθηκε, στηρίχθηκε πάνω στην ειδική βάση του που προσαρμόστηκε πάνω στο έμβολο της πρέσας. Η βάση στήριξης που είχαμε στη διάθεσή μας ήταν σχεδιασμένη για διεισδυτή μικρότερου μήκους και διαμέτρου και για το λόγο αυτό ο διεισδυτής που χρησιμοποιήσαμε δεν ήταν δυνατό να στερεωθεί πάνω στη βάση, αλλά μόνο να καθοδηγείται από αυτή στηριζόμενος πάνω στο δοκίμιο. Ο διεισδυτής, η βάση του, το έμβολο της πρέσας αλλά και ο τρόπος συνεργασίας τους φαίνονται στη φωτογραφία που ακολουθεί (στην πρωτότυπη φωτογραφία τα αντικείμενα είναι γυρισμένα ανάποδα και στη συνέχεια η

φωτογραφία αναστράφηκε κατά 180° έτσι ώστε το σύστημα διεισδυτή-βάσης-εμβόλου να έχει μορφή αντίστοιχη με αυτή κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας).



Εικόνα 1.8: Η σφήνα στήριξης του κυλινδρικού διεισδυτή προσαρμοσμένη στο έμβολο της πρέσας

Ο τρόπος τοποθέτησης των τριών βασικών μερών (κάτω πλάκας, διεισδυτή και κελύφους) που συμμετέχουν στο πείραμα παρουσιάζεται γραφικά στην παρακάτω εικόνα (το παράδειγμα είναι τυχαίο καθώς στην πράξη η θέση του διεισδυτή και οι διαστάσεις των κελυφών που χρησιμοποιήθηκαν διαφέρει από περίπτωση σε περίπτωση):



Εικόνα 1.9: Γραφική απεικόνιση της τοποθέτησης της κάτω πλάκας του κελύφους και του διεισδυτή

Όλα τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν από το μέλος ΕΔΙΠ Δρ. Μηχανικό Πρωτεσίλαο Κωστάζο, ενώ η κοπή και η προετοιμασία των δοκιμίων έγινε είτε από τον ίδιο είτε από τον τεχνίτη του εργαστηρίου του Τομέα των Κατεργασιών Νικόλαο Μελισσά.

1.4: LS-DYNA

1.4.1: Γενικά στοιχεία και σύντομη ιστορική αναδρομή

Πρόκειται για ένα εξειδικευμένο πακέτο λογισμικού προσομοίωσης γενικής χρήσης, το οποίο αναπτύχθηκε από την εταιρεία Livermore Software Technology Corporation (LSTC). Ο κώδικας LS-DYNA έχει τις ρίζες του στο πρόγραμμα τρισδιάστατης ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων DYNA3D, το οποίο αναπτύχθηκε από τον Dr. John Hallquist στο Εθνικό Εργαστήριο Lawrence Livermore της California των ΗΠΑ. Το πρόγραμμα δημιουργήθηκε λόγω της ύπαρξης ανάγκης για την ανάπτυξη ενός 3D κώδικα επειδή η 2D ανάλυση κρίθηκε ανεπαρκής για ορισμένες προσομοιώσεις. Το πακέτο κυκλοφόρησε για πρώτη φορά το 1978 για χρήση στο ευρύ κοινό. Στην αρχική του μορφή ο κώδικας ήταν υπερβολικά ογκώδης λόγω της έλλειψης ισχυρών υπολογιστικών πόρων εκείνη την εποχή,

αλλά στη συνέχεια άρχισε να εξελίσσεται και να αποκτά ολοένα και ευρύτερη εφαρμογή. Για την ακρίβεια, το 1982 εισήχθησαν 9 πρόσθετα μοντέλα υλικών για χρήση, ενώ το 1986 εισήχθησαν οι δυνατότητες για μοντελοποίηση κελυφών (shells), στερεών σωμάτων (rigid bodies), επαφή απλής επιφάνειας (single surface contact), τριβή διεπιφάνειας (interface friction) και αναπτύχθηκε η συμβατότητα του κώδικα με τα γνωστά λειτουργικά συστήματα της εποχής (VAX/VMS, IBM, UNIX και COS). Το LS-DYNA έλαβε τη σημερινή του μορφή το 1988, όταν και η εταιρεία LSTC, για την οποία έγινε λόγος παραπάνω, ανέλαβε τη συνέχιση της εξέλιξης του DYNA3D με μεγαλύτερη λεπτομέρεια. Από τότε, η LSTC επέκτεινε σημαντικά τις δυνατότητες του κώδικα με σκοπό τη δημιουργία ενός πολυεργαλείου που να καλύπτει τις περισσότερες ανάγκες προσομοίωσης. Με το πέρασμα του καιρού, το πρόγραμμα άρχισε να περιλαμβάνει ολοένα και περισσότερες δυνατότητες για την επίλυση πολλών περίπλοκων καθημερινών προβλημάτων. Η βασικότερη δυνατότητα για την οποία ξεχωρίζει σχετίζεται με την ανάλυση μη-γραμμικών μεταβατικών δυναμικών τρισδιάστατων προβλημάτων (προβλήματα πλαστικής παραμόρφωσης). Το LS-DYNA χρησιμοποιείται ευρέως, μεταξύ άλλων, στις βιομηχανίες κατασκευών και κατεργασιών και φυσικά στη βιομηχανία αυτοκινήτων.

Το LS-DYNA 3D δέχεται σαν είσοδο εκτελέσιμα αρχεία που καθοδηγούνται εξ' ολοκλήρου από μία γραμμή εντολών (command line), και βρίσκονται σε απλή μορφή ASCII, συνεπώς μπορούν να δημιουργηθούν και φυσικά να διορθωθούν με τη χρήση οποιουδήποτε επεξεργαστή κειμένου (Microsoft Word, Notepad, κτλ) ή μέσω ενός κατάλληλου γραφικού προ-επεξεργαστή (pre-processor). Στην αγορά υπάρχουν πολλά εξωτερικά λογισμικά για την προ-επεξεργασία αρχείων εισόδου του LS-DYNA, με την εταιρεία LSTC να έχει αναπτύξει και το δικό της προ-επεξεργαστή (LS-PrePost), ο οποίος είναι ο προεπεξεργαστής που χρησιμοποιήθηκε για τον σχεδιασμό των μοντέλων της παρούσας εργασίας.

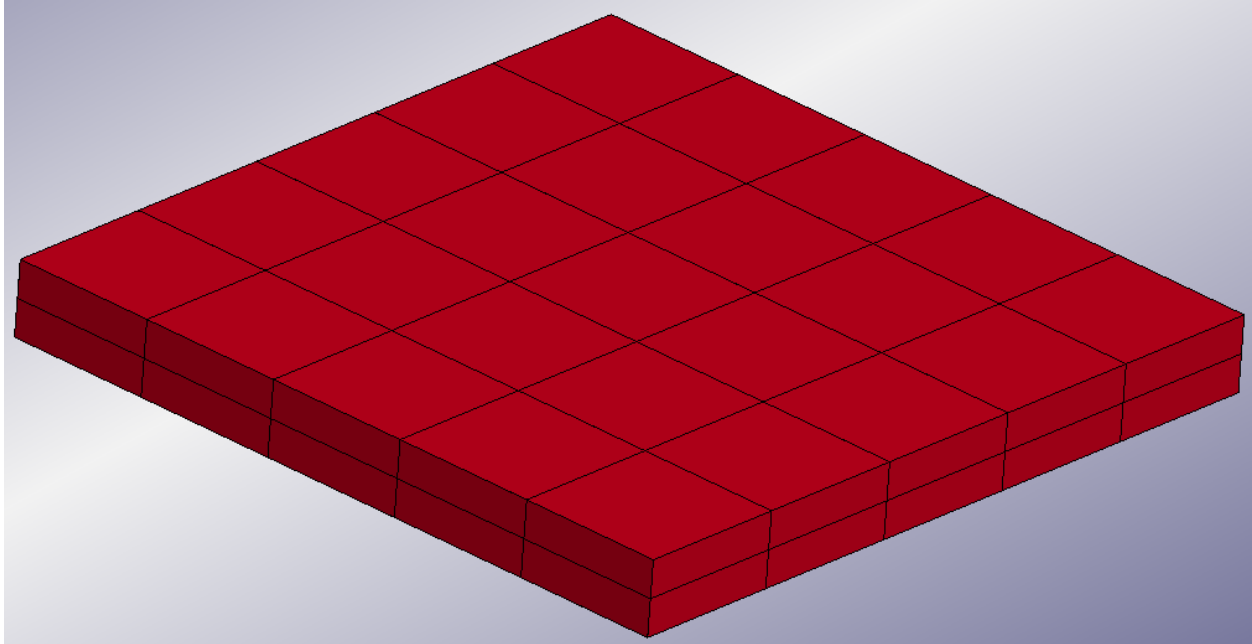
Το LS-DYNA διαθέτει πλήρεις δυνατότητες 2D και 3D προσομοίωσης, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές όπως μη-γραμμική δυναμική ανάλυση, ανάλυση στερεών σωμάτων, θερμική ανάλυση, ρευστομηχανική ανάλυση, δυναμική σύζευξη πολλών σωμάτων (με τη βοήθεια και των κωδίκων MADYMO και Cal3D), ακουστική πραγματικού χρόνου, προσαρμοστική αναδιατύπωση πλέγματος, μεταφορά ακτινοβολίας, ηλεκτρομαγνητισμό και ανάλυση κατάρρευσης, η οποία είναι και η εφαρμογή του που μας απασχολεί κατά βάση στην παρούσα εργασία. Οι τυπικές χρήσεις του κώδικα αφορούν γενικά τη μη-γραμμική ανάλυση και τη μεταβατική δυναμική ανάλυση. Ο κώδικας είναι σε θέση να αντιμετωπίσει ένα μεγάλο φάσμα προβλημάτων, από περιπτώσεις μεγάλων

στατικών παραμορφώσεων όπως η πλευρική κατάρρευση κελυφών που μελετάται σε αυτή την εργασία έως γεγονότα μεγάλης ταχύτητας και μικρής διάρκειας όπου βασικός παράγοντας είναι η επίδραση των αδρανειακών δυνάμεων, όπως περιπτώσεις πρόσκρουσης οχημάτων (παραμόρφωσης του πλαισίου τους), εκρήξεων, κτλ. [8], [13], [15]

1.4.2: Περιγραφή της διαδικασίας σχεδιασμού των μοντέλων που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία.

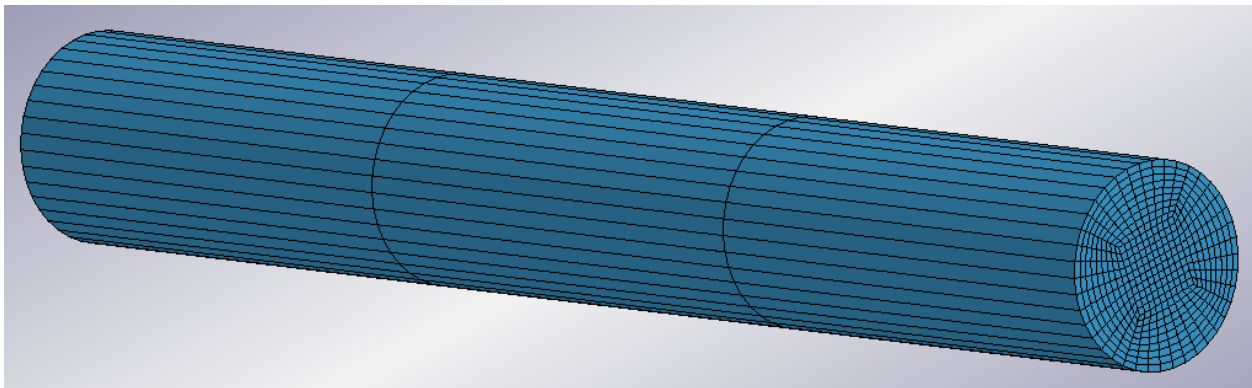
Ο σχεδιασμός όλων των υπολογιστικών μοντέλων που παρουσιάζονται στη συνέχεια έγινε με την βοήθεια του προεπεξεργαστή LS-PrePost της εταιρίας LSTC που είναι, όπως είπαμε προηγουμένως, αυτή που αναπτύσσει το λογισμικό LS-DYNA. Η έκδοση που χρησιμοποιήθηκε είναι η 4.2, ενώ ο εν' λόγω προ-επεξεργαστής διατίθεται δωρεάν από την LSTC στην επίσημη ιστοσελίδα της. Σε ορισμένες περιπτώσεις ελέγχου ή μικροδιορθώσεων στο αρχείο εισόδου χρησιμοποιήθηκε για μεγαλύτερη ευκολία κάποιος επεξεργαστής κειμένου (Microsoft Word, Notepad, κτλ) και όχι ο προ-επεξεργαστής LS-PrePost.

Το πρώτο στάδιο του σχεδιασμού περιλαμβάνει τον καθορισμό της γεωμετρίας των κομματιών που αποτελούν το μοντέλο. Αρχικά η κάτω πλάκα πάνω στην οποία τοποθετήθηκαν όλα τα δοκίμια σχεδιάστηκε σαν ένα συμπαγές ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο με διαστάσεις 200x200x20mm. Επειδή η πλάκα αυτή είναι απαραμόρφωτη και απλής γεωμετρίας χρησιμοποιήθηκε πολύ αραιή διακριτοποίηση (5 πεπερασμένα στοιχεία κατά μήκος των μεγάλων ακμών της και 2 κατά μήκος της μικρής), έτσι ώστε να μπορέσουμε να διατηρήσουμε τις υπολογιστικές απαιτήσεις για την επίλυση του μοντέλου όσο το δυνατό μικρότερες. Η μορφή και η διακριτοποίηση της πλάκας φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:



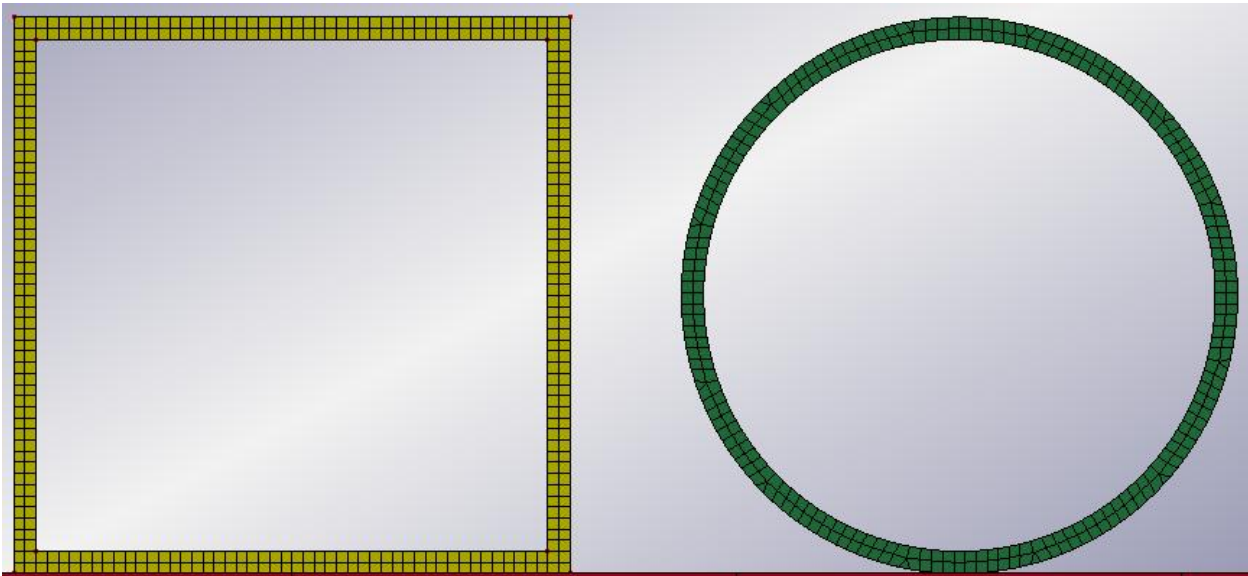
Εικόνα 1.10: Εικόνα της κοινής για όλα τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν κάτω πλάκας που πάρθηκε από το περιβάλλον του προ-επεξεργαστή LS-PrePost

Στη συνέχεια έγινε σχεδιασμός του διεισδυτή που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις. Ο διεισδυτής γεωμετρικά είναι όμοιος με τον πραγματικό, δηλαδή έχει μήκος 100mm και διάμετρο 13mm. Επειδή και ο διεισδυτής είναι απαραμόρφωτος δεν υπήρχε μεγάλη ανάγκη για πυκνή διακριτοποίηση κατά μήκος του, αλλά υπήρχε ανάγκη για πυκνή διακριτοποίηση στην περιφέρειά του ώστε η πολυγωνική επιφάνεια που σχηματίζεται να προσεγγίζει όσο το δυνατό καλύτερα την αντίστοιχη κυκλική. Πιο συγκεκριμένα κατά μήκος του χρησιμοποιήθηκαν 3 πεπερασμένα στοιχεία, ενώ κατά την περίμετρό του χρησιμοποιήθηκαν 40, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 1.11: Εικόνα του κοινού για όλα τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν κυλινδρικού διεισδυτή που πάρθηκε από το περιβάλλον του προ-επεξεργαστή LS-PrePost

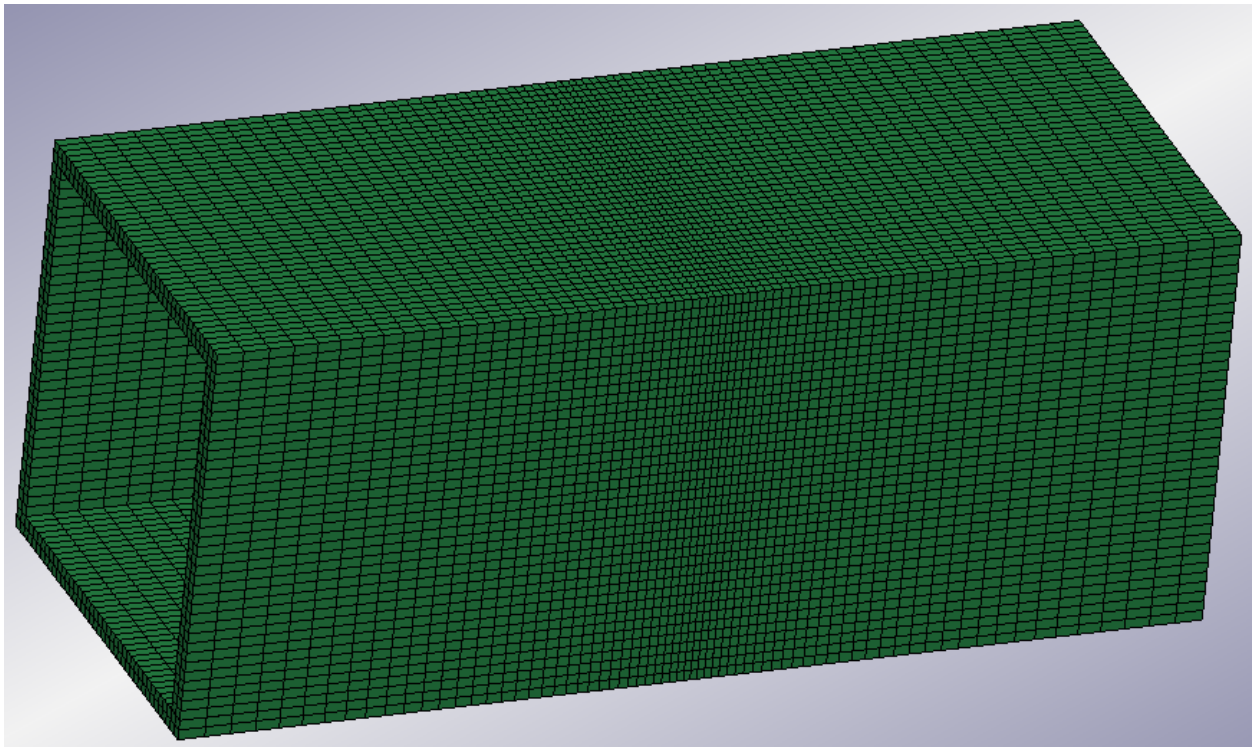
Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφέρουμε ότι για κάποιες περιπτώσεις στο τρίτο κεφάλαιο που χρειάστηκε, το μήκος του διεισδυτή αυξήθηκε στα 120mm χωρίς να αλλάξει κάτι στην διακριτοποίησή του. Το τελικό και σημαντικότερο στάδιο του σχεδιασμού περιλάμβανε τον σχηματισμό και την διακριτοποίηση του κελύφους. Σε όλα τα κελύφη που χρησιμοποιήσαμε κατά την πειραματική διαδικασία καθώς και στα αντίστοιχα μοντέλα που αναπτύχθηκαν το πάχος των τοιχωμάτων τους ήταν κοινό στα 2mm (εκτός των περιπτώσεων του τετάρτου κεφαλαίου. Λαμβάνοντας υπ' όψη τις υπόλοιπες διαστάσεις τους (μήκος κοινό για όλα 100mm και πλάτος, ύψος ή διάμετρο από 30mm έως 50mm) αποφασίσαμε ότι το πάχος των τοιχωμάτων δεν είναι αμελητέο ως προς αυτές. Επομένως για να επιτύχουμε την απαιτούμενη ακρίβεια στα αποτελέσματα επιλέξαμε να μη διακριτοποιήσουμε τα δοκίμια ως λεπτότοιχα κελύφη (shell elements) με δισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία, αλλά ως συμπαγή σώματα με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία (solid elements). Επιλέξαμε σε όλα σχεδόν τα δοκίμια να υπάρχουν κατά το πάχος τους δύο τουλάχιστο elements, επομένως οι διαστάσεις των πεπερασμένων στοιχείων που καθορίσαμε είναι 1x1mm στη διατομή του κάθε καλύφους όπως φαίνεται και στην εικόνα που ακολουθεί (σε όσες περιπτώσεις στη συνέχεια η διακριτοποίηση είναι διαφορετική, θα αναφέρεται και θα σχολιάζεται):



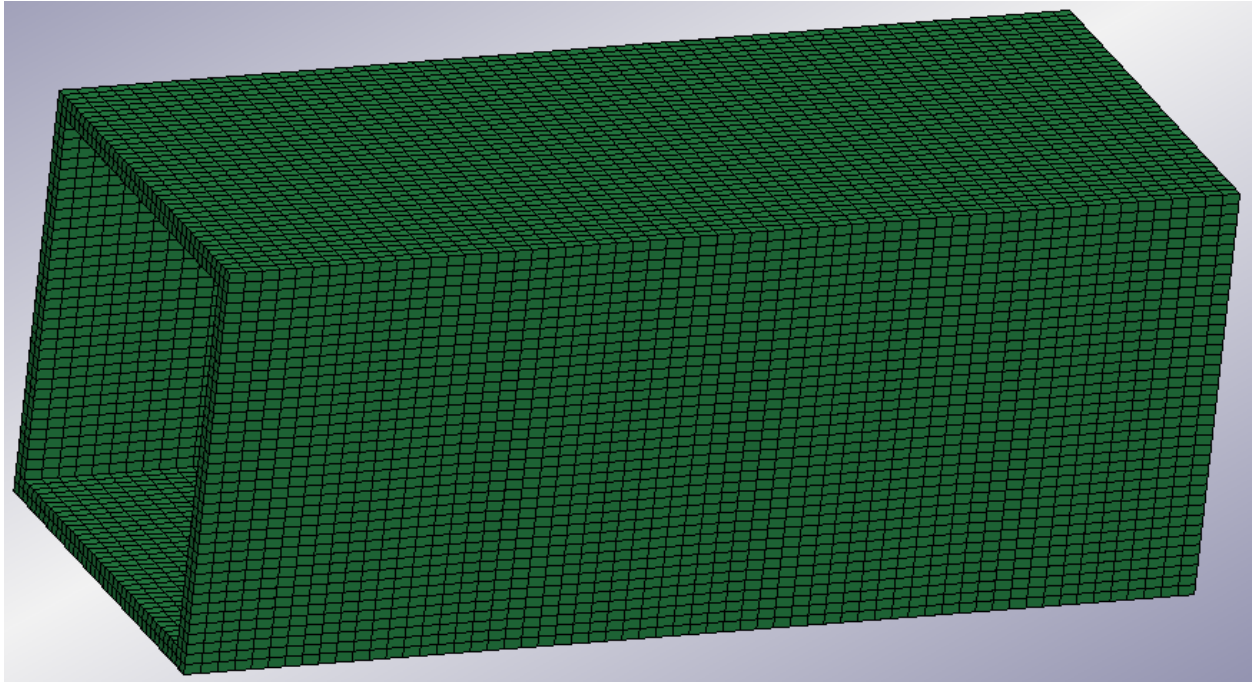
Εικόνα 1.12: Διακριτοποίηση της διατομής ενός κυλινδρικού $\Phi 50 \times 2$ και ενός τετραγωνικού $50 \times 50 \times 2$ κελύφους. Η εικόνα προέρχεται από το περιβάλλον του προ-επεξεργαστή LS-PrePost.

Απ' την άλλη μεριά, κατά μήκος του κελύφους το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων που επιλέχθηκε είναι διαφορετικό για κάθε περίπτωση. Πιο συγκεκριμένα στις περιπτώσεις που ο διεισδυτής είναι κάθετος με το κέλυφος η αντίστοιχη διακριτοποίηση είχε τη μορφή κανονικής κατανομής (Gaussian Bell Curve) και έκανε πιο πυκνό το πλέγμα στη γειτονιά της

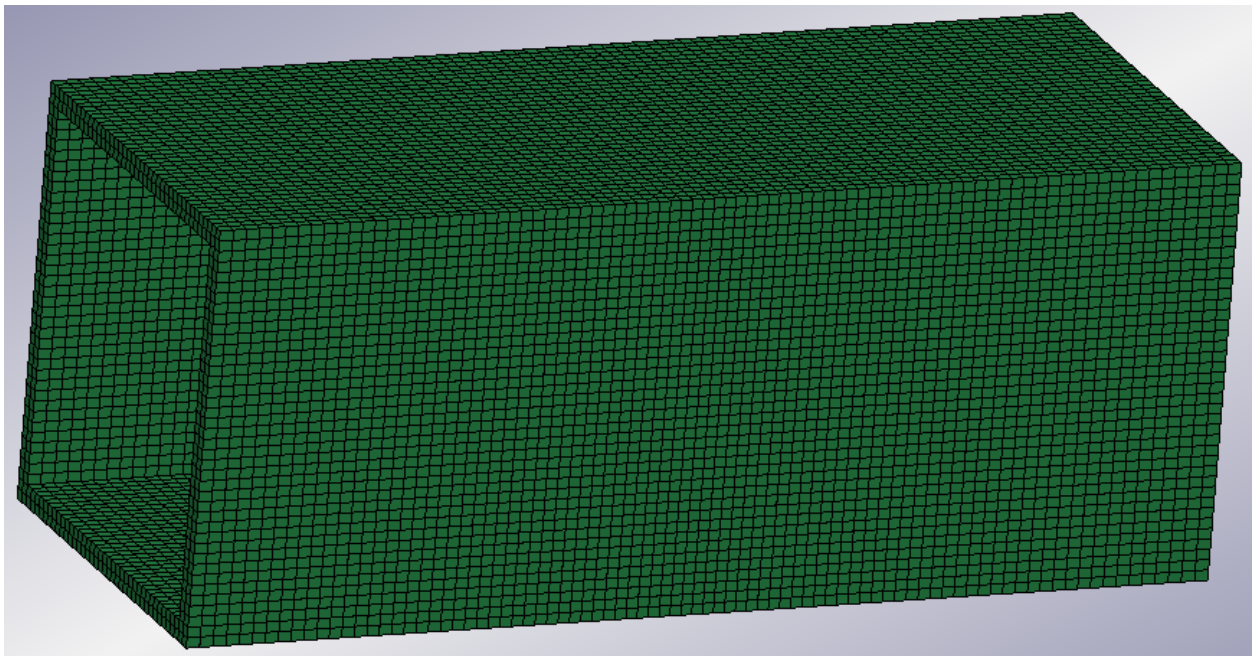
επαφής των παραπάνω, ενώ πιο αραιό στις άκρες του κελύφους οι οποίες δεν συμμετέχουν με την ίδια βαρύτητα στην διαμόρφωση του τελικού αποτελέσματος. Σκοπός της παραπάνω μεταβλητής διακριτοποίησης είναι να επιτύχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα χρησιμοποιώντας τους ελάχιστους δυνατούς υπολογιστικούς πόρους. Στις περιπτώσεις που το δοκίμιο και ο διεισδυτής έχουν τοποθετηθεί παράλληλα το πλέγμα είναι ομοιόμορφο και αραιό κατά μήκος του δοκιμίου διότι όλη η κατάρρευση είναι συμμετρική κατά μήκος του άξονα του κελύφους. Τέλος στις περιπτώσεις που χρησιμοποιήθηκαν ενδιάμεσες γωνίες διείσδυσης (τρίτο κεφάλαιο), το πλέγμα ήταν αναγκαστικά πυκνό σε όλο το μήκος του κελύφους. Όλες οι παραπάνω παρατηρήσεις απεικονίζονται στη συνέχεια: [8], [9]



Εικόνα 1.13: Διακριτοποίηση με μορφή κανονικής κατανομής (Gauss) ενός τυχαίου κελύφους που καταρρέει με το διεισδυτή κάθετο ως προς αυτό. Η εικόνα προέρχεται από το περιβάλλον του προ-επεξεργαστή LS-PrePost. Οι διαφορές που υπάρχουν στην πυκνότητα της διακριτοποίησης στις διάφορες περιοχές του κελύφους είναι εμφανείς.



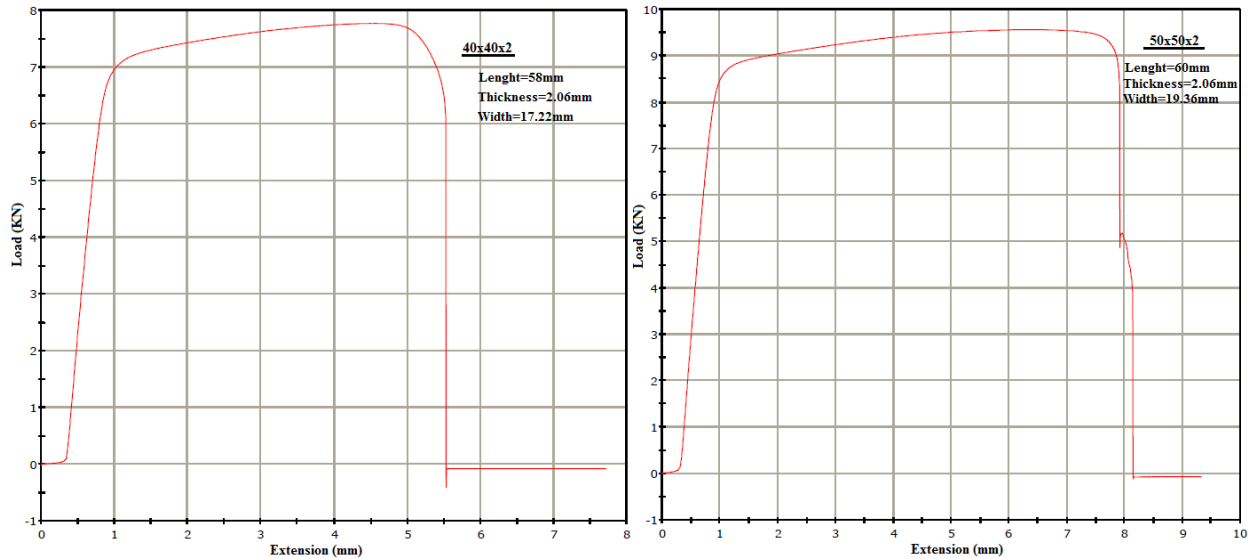
Εικόνα 1.14: Διακριτοποίηση ενός τυχαίου κελύφους που καταρρέει με το διεισδυτή παράλληλο ως προς αυτό. Η εικόνα προέρχεται από το περιβάλλον του προ-επεξεργαστή LS-PrePost. Η διακριτοποίηση είναι αραιή κατά μήκος του κελύφους καθώς λόγω της συμμετρίας που παρουσιάζει η κατάρρευσή του, δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ γειτονικών (κατά μήκος του κελύφους) πεπερασμένων στοιχείων, επομένως και ανάγκη για πυκνή διακριτοποίηση.



Εικόνα 1.15: Διακριτοποίηση ενός τυχαίου κελύφους που καταρρέει με το διεισδυτή να σχηματίζει γωνία 30° ως προς αυτό. Η εικόνα προέρχεται από το περιβάλλον του προ-επεξεργαστή LS-PrePost. Η πυκνή διακριτοποίηση προς όλες τις κατευθύνσεις είναι αναγκαία για την επίτευξη της επιθυμητής ποιότητας αποτελεσμάτων.

Ύστερα απ' τον καθορισμό της γεωμετρίας και την διακριτοποίηση των μερών που αποτελούν το μοντέλο, ο σχεδιασμός του συνεχίζεται εισάγωντας κάποιες συνοριακές συνθήκες (boundary conditions). Αναλυτικότερα απαγορεύουμε οποιαδήποτε κίνηση της κάτω πλάκας, ενώ επιτρέπουμε το διεισδυτή να κινείται μόνο κατά μήκος του άξονα της διεΐσδυσης. Επιπλέον στις προσομοιώσεις που παρουσιάζονται στο τρίτο κεφάλαιο, για να εμποδίσουμε την ανεπιθύμητη περιστροφή του κελύφους ως προς τον άξονα κίνησης του διεΐσδυτή, επιλέξαμε μερικά elements στο κέντρο περίπου των δύο κάτω ακμών του (τέτοια ώστε να μην επηρεάζουν την κατάρρευση) και εμποδίσουμε κάθε είδους κίνησή τους. Μ' αυτό τον τρόπο αποτρέψαμε την ανεπιθύμητη περιστροφή του κελύφους χωρίς να επηρεάσουμε τον τρόπο κατάρρευσης.

Στη συνέχεια καθορίσαμε τα υλικά που συμμετείχαν στην προσομοίωση και τις ιδιότητές τους. Για την κάτω πλάκα και τον διεΐσδυτή που είναι κομμάτια απαραμόρφωτα (rigid) επιλέξαμε την καρτέλα Rigid (No 20) του LS-PrePost και χωρίς να χρειάζεται ιδιαίτερη διερεύνηση (επειδή δεν υφίστανται καμία παραμόρφωση) τη συμπληρώσαμε βάζοντας τις ιδιότητες του ατσαλιού. Συγκεκριμένα πυκνότητα $\rho=7,83 \text{ g/cm}^3$, μέτρο ελαστικότητας $E=207 \text{ GPa}$ και λόγο Poisson $\nu=0,3$ [6]. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν όλα κατασκευασμένα από αλουμίνιο οπότε χρησιμοποιήσαμε την καρτέλα piecewise linear plasticity (No 24). Στα πλαίσια προηγούμενης παρεμφερούς διπλωματικής εργασίας [16], στην οποία χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια κελύφη με την παρούσα εργασία, προκειμένου να υπολογιστούν οι ιδιότητες του υλικού κατασκευής τους έγιναν δύο δοκιμές εφελκυσμού σε κελύφη διαφορετικών διαστάσεων (τετραγωνικά $40 \times 40 \times 2$ και $50 \times 50 \times 2$) που φαίνονται στο διάγραμμα που ακολουθεί:



Διάγραμμα 1.1: Καμπύλες τάσης-επιμήκυνσης που προέκυψαν από δοκιμή εφελκυσμού που έγινε σε δύο τετραγωνικά κελύφη 40x40x2 και 50x50x2

Από τις λωρίδες των δύο παραπάνω κελυφών που εφελκύστηκαν υπολογίστηκε η πυκνότητα του αλουμινίου $\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$ και το μέτρο ελαστικότητάς του $E = 69 \text{ GPa}$, ενώ από τις καμπύλες του διαγράμματος 1.1 υπολογίστηκε και όριο διαρροής του $\text{SIGY} = 220 \text{ MPa}$ και ότι η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων του στην πλαστική περιοχή της, περιγράφεται από τα παρακάτω σημεία (τα αποτελέσματα και από τις δύο καμπύλες ήταν ίδια όπως ήταν αναμενόμενο καθώς και τα δύο κελύφη ήταν κατασκευασμένα από το ίδιο υλικό:

(0 , 220MPa) (0.011 , 230MPa) (0.042 , 250MPa) (0.071 , 260MPa)

Ακολούθως επιλέγουμε το είδος της αρχιτεκτονικής των πεπερασμένων στοιχείων με βάση την οποία θα γίνει η επίλυση της προσομοίωσης. Όλα τα κομμάτια που αποτελούν το μοντέλο είναι στερεά σώματα (solid) ενώ χρησιμοποιήθηκαν δύο αρχιτεκτονικές διαμόρφωσης των πεπερασμένων στοιχείων (solid element formulation) με την επιλογή μας αυτή να χρησιμοποιήσουμε δύο διαφορετικά είδη διαμορφώσεων να εξηγηθεί αναλυτικά στη συνέχεια. Στη συνέχεια ο σχεδιασμός συνεχίζεται αντιστοιχώντας σε κάθε κομμάτι του μοντέλου το αντίστοιχο υλικό από το οποίο αποτελείται καθώς και την αντίστοιχη αρχιτεκτονική με βάση την οποία θα γίνει η επίλυσή του.

Μετά από αυτό γίνεται καθορισμός των επαφών που συμβαίνουν κατά την κατάρρευση. Όπως είναι φυσικό υπάρχει επαφή (surface to surface) μεταξύ διεισδυτή και κελύφους (ως master part επιλέγουμε το διεισδυτή και ως slave part το κέλυφος) και μεταξύ κελύφους

και κάτω πλάκας (ως master επιλέγουμε την κάτω πλάκα και ως slave το κέλυφος). Επίσης επειδή κατά τη διάρκεια της κατάρρευσης μπορεί κάποια μέρη του κελύφους να ρθουν σε επαφή ορίζουμε και μια ακόμα επαφή (single surface) με slave part το κέλυφος. Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις ορίσαμε τους ίδιους συντελεστές τριβής 0.2 και 0.15 για στατική τριβή και τριβή ολίσθησης αντίστοιχα.

Τέλος για την ολοκλήρωση του σχεδιασμού απαιτούνται κάποιες επιπρόσθετες ενέργειες όπως ο καθορισμός της ταχύτητας του διεισδυτή, του χρόνου ολοκλήρωσης της κατάρρευσης, της συχνότητας μέτρησης του αναπτυσσόμενου φορτίου που επηράζει την ποιότητα της αντίστοιχης καμπύλης και της συχνότητας καταγραφής της τρισδιάστατης απεικόνισης της κατάρρευσης. [8], [9], [14]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΚΕΛΥΦΩΝ ΜΕ ΤΟ ΔΙΕΙΣΔΥΤΗ ΚΑΘΕΤΟ Η ΠΑΡΑΛΛΗΛΟ ΩΣ ΠΡΟΣ ΑΥΤΑ.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται δώδεκα πειράματα κατάρρευσης κελυφών και συγκρίνονται με τα δύο θεωρητικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν για το καθένα με δύο διαφορετικές αρχιτεκτονικές/διαμορφώσεις των πεπερασμένων στοιχείων.

Η πρώτη απ' τις δύο είναι η διαμόρφωση Constant Stress ή Under-Integrated Constant Stress ή Element Formulation 1 έτσι όπως είναι αριθμημένη στις επιλογές του προεπεξεργαστή LS-PrePost. Η διαμόρφωση αυτή είναι ιδιαίτερα αποδοτική και ακριβής, ενώ παράλληλα δουλεύει και σε περιπτώσεις πολύ έντονων παραμορφώσεων. Βασικό της μειονέκτημα είναι ότι οδηγεί σε έντονο φαινόμενο hourglass (σχηματισμός κλεψύδρων), για την αποφυγή του οποίου χρειάζεται επιπλέον σταθεροποίηση της διαμόρφωσης (hourglass formulation).

Η δεύτερη αρχιτεκτονική είναι η Fully-Integrated Solid Element ή Selective Reduced Integrated Brick Element ή Element Formulation 2 που είναι και η διαμόρφωση όλων των μοντέλων που παρουσιάζονται στις εικόνες της παρούσας εργασίας (σε αντίθετη περίπτωση θα αναφέρεται). Στην περίπτωση αυτή δεν απαιτείται σταθεροποίηση του φαινομένου σχηματισμού κλεψύδρων, αλλά απ' την άλλη μεριά το θεωρητικό δοκίμιο υπολογίζεται πιο στιβαρό απ' ότι είναι στην πραγματικότητα, ο κώδικας απαιτεί σαφώς περισσότερους υπολογιστικούς πόρους για την επίλυσή του ενώ στις περιπτώσεις μεγάλων παραμορφώσεων ο κώδικας οδηγείται πολλές φορές σε υπολογισμό αρνητικών όγκων (negative volume). Παρ' όλα αυτά επειδή στην περίπτωση της πρώτης διαμόρφωσης με επιπλέον σταθεροποίηση του hourglass το μειονέκτημα αύξησης της στιβαρότητας είναι εντονότερο επιλέξαμε την Element Formulation 2 ως τη βασική διαμόρφωση των πεπερασμένων στοιχείων των μοντέλων της παρούσας εργασίας. Για λόγους πληρότητας αλλά κυρίως ακρίβειας των αποτελεσμάτων οι προσομοιώσεις που μελετήσαμε έγιναν και με τη διαμόρφωση Element Formulation 1 χωρίς πρόσθετη επέμβαση για την αποφυγή του φαινομένου σχηματισμού κλεψύδρων.

Σκοπός του κεφαλαίου είναι η μελέτη αφ' ενός του τρόπου κατάρρευσης κελυφών υπό την επίδραση πλευρικής φόρτισης και αφ' ετέρου της συμπεριφοράς του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA πάνω στο πρόβλημα αυτό της πλευρικής γραμμικής φόρτισης κελυφών. Χρησιμοποιήθηκαν έξι διαφορετικά δοκίμια στο καθένα από τα οποία

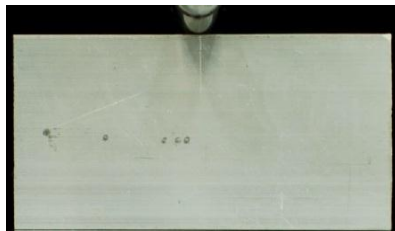
έγινε διείδυση με το διείδυτή να είναι και κάθεται και παράλληλος ως προς αυτό. Τα εν λόγω δοκίμια είναι τα ακόλουθα:

- Ορθογωνικό διαστάσεων 50x30 με τη διείδυση να γίνεται κατά μήκος της μεγάλης πλευράς του
- Ορθογωνικό διαστάσεων 50x30 με τη διείδυση να γίνεται κατά μήκος της μικρής πλευράς του
- Τετραγωνικά διαστάσεων 50x50 , 40x40 και 30x30
- Κυλινδρικό διαστάσεων Φ50

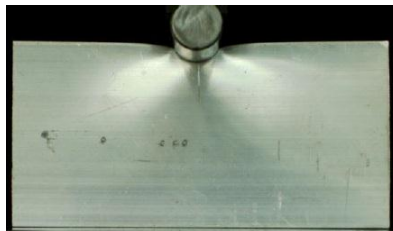
Όλα τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν έχουν κοινό πάχος 2mm και κοινό μήκος 100mm. Η διείδυση σε όλες τις περιπτώσεις έγινε μέχρι το τελικό ύψος του δοκιμίου να είναι 10mm. Ο λόγος που επιλέξαμε αυτό το σημείο ως τέλος είναι αφ' ενός για να υπάρχει μια ομοιομορφία σε όλα τα πειράματα, αλλά κυρίως γιατί αν συνεχίζαμε τη συμπίεση μετά από αυτό το σημείο συνήθως η διαδικασία ανάγεται σε απλή συμπίεση συμπαγούς υλικού, το αναπτυσσόμενο φορτίο μεγαλώνει απότομα και το κέλυφος χάνει την ικανότητά του να απορροφά ενέργεια χωρίς να μεταφέρει μεγάλες δυνάμεις. Ακόμα και σταματώντας στα 10mm σε αρκετές περιπτώσεις όπως θα δούμε έχουμε την εμφάνιση του φαινομένου αυτού στο τέλος της κατάρρευσης αρκετών κελυφών. Το μήκος και η διάμετρος του κυλινδρικού διείδυτή που χρησιμοποιήθηκε ήταν 100mm και 13mm αντίστοιχα, ενώ η ταχύτητά του ήταν σταθερή στα 10mm/min.

2.1: Κάθεται διείδυση:

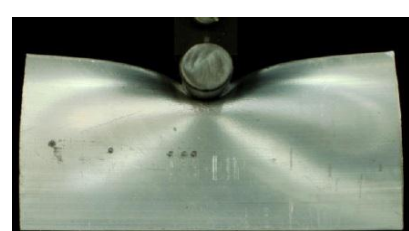
2.1.1: Ορθογωνικό κέλυφος διαστάσεων 50x30x2 κατά μήκος της μεγάλης πλευράς



1(0mm)



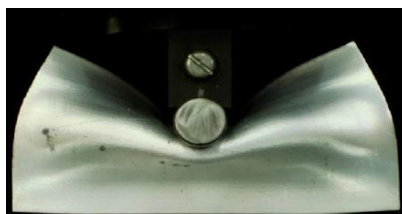
2(6mm)



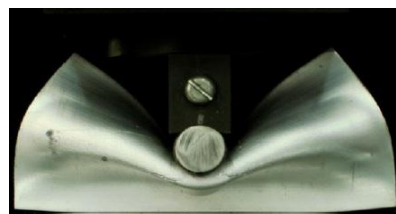
3(13.6mm)



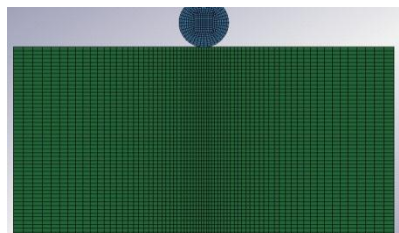
4(23.3mm)



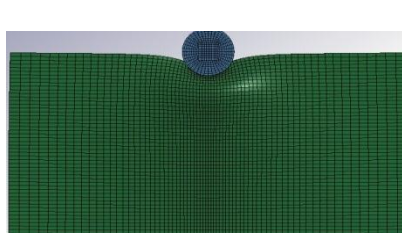
5(31.9mm)



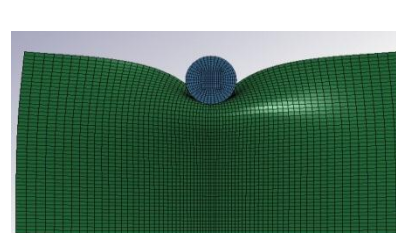
6(40mm)



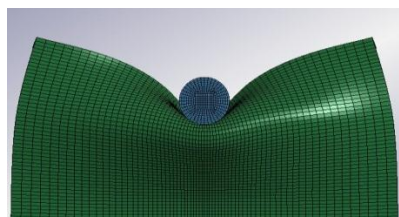
1(0mm)



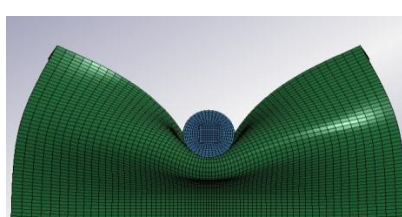
2(6mm)



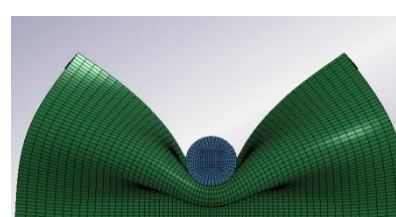
3(13.6mm)



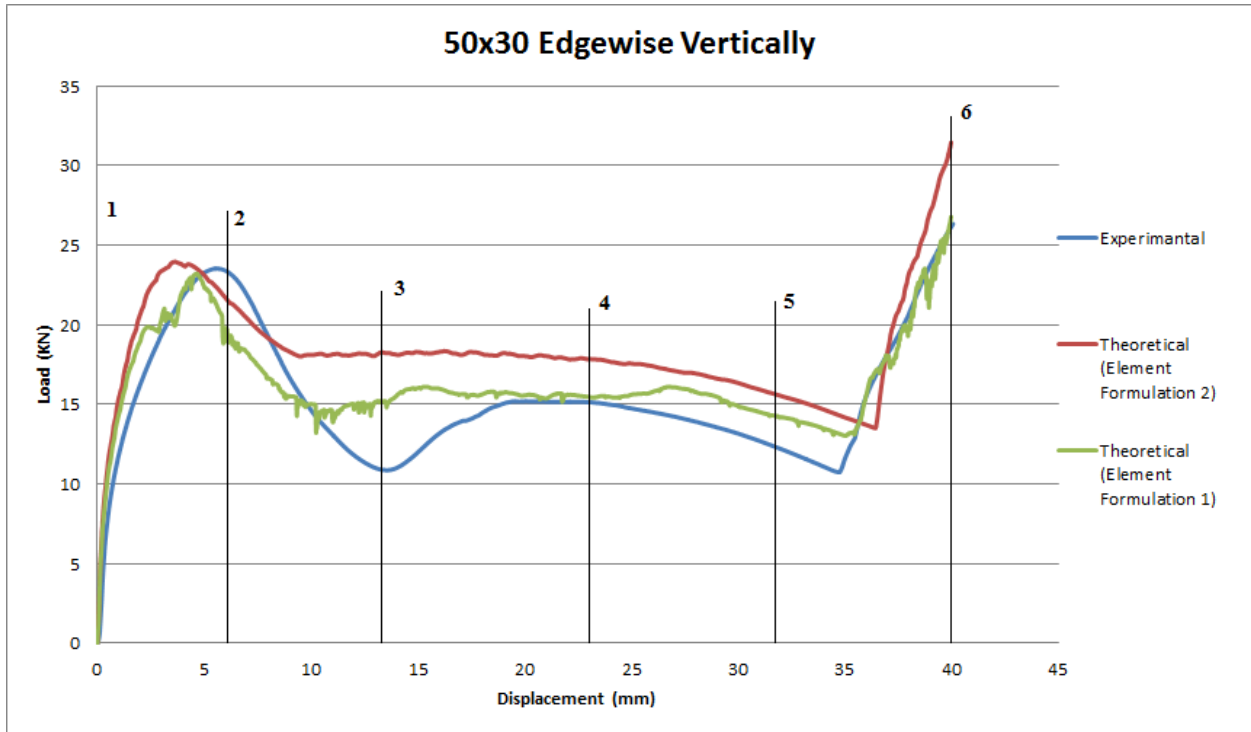
4(23.3mm)



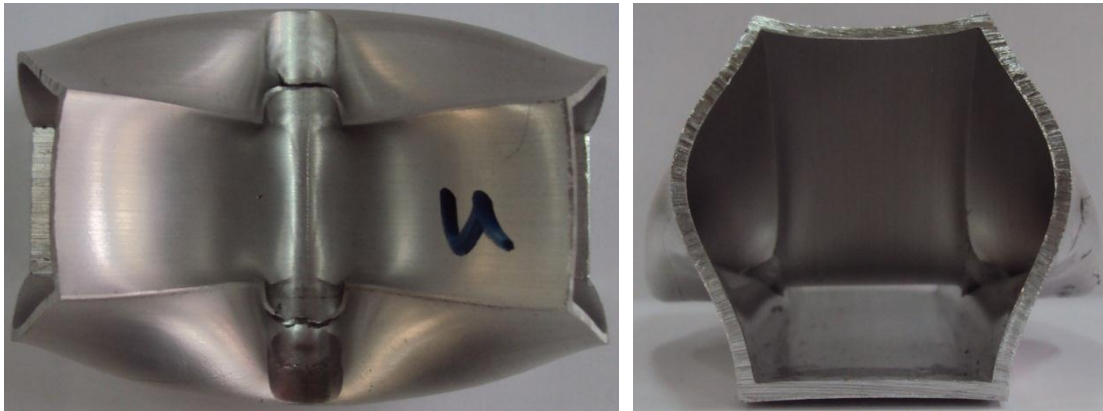
5(31.9mm)



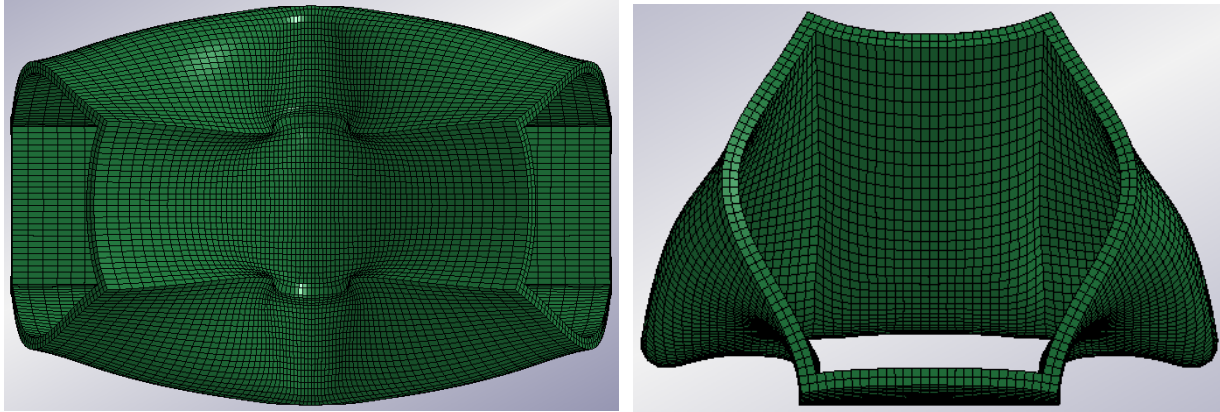
6(40mm)



Διάγραμμα 2.1: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για το ορθογωνικό δοκίμιο 50x30 mm

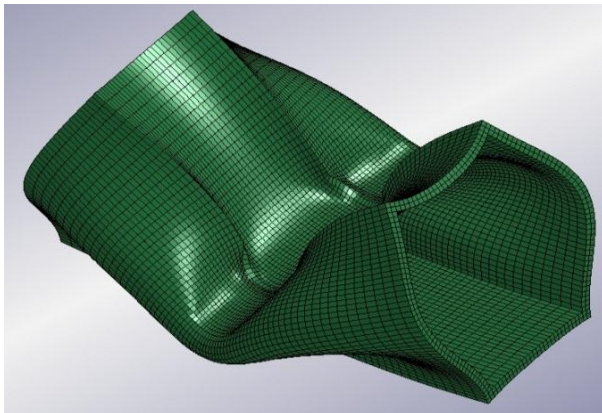


Πειραματικό δοκίμιο μετά το τέλος της κατάρρευσης

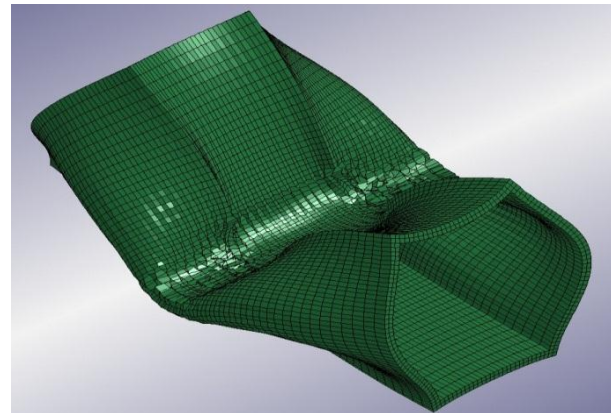


Θεωρητικό μοντέλο μετά την ολοκλήρωση της κατάρρευσης

Παρατηρείται έντονη ομοιότητα ανάμεσα στην πειραματική και στις θεωρητικές καμπύλες. Η πράσινη καμπύλη αντιστοιχεί σε μοντέλο που κατά τη διαδικασία της κατάρρευσής του παρατηρήθηκε έντονο το φαινόμενο του “hourglassing”, παρ’ όλα αυτά βρίσκεται πολύ κοντά στην πειραματική. Στο φαινόμενο αυτό οφείλεται κυρίως και ο σχετικά μεγάλος θόρυβος που παρατηρείται στο διάγραμμα. Στην περίπτωση της κόκκινης καμπύλης οι αλλαγές που έγιναν στον κώδικα προκειμένου να εξαλειφθεί έκαναν το δοκίμιο αρκετά πιο στιβαρό εμποδίζοντας το σχηματισμό εσωτερικών μηχανισμών σ’ αυτό. Όπως θα δούμε παρακάτω οι παραπάνω παρατηρήσεις γενικεύονται και αφορούν σχεδόν όλα τα υπό μελέτη τεμάχια. Ακολουθούν δύο ενδεικτικές εικόνες των δύο θεωρητικών μοντέλων μετά την ολοκλήρωση της κατάρρευσης που επιβεβαιώνουν τα παραπάνω:



Element Formulation 2

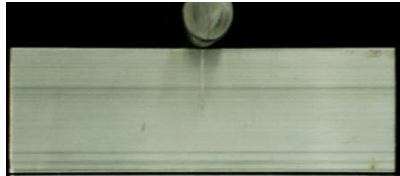


Element Formulation 1

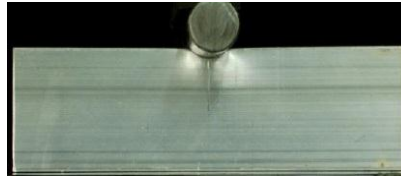
Γενικότερα και στις τρεις καμπύλες παρατηρούμε μια αρχική απότομη αύξηση του φορτίου με την παραμόρφωση να μένει στην περιοχή της επαφής. Στη συνέχεια το φορτίο μειώνεται και η κατάρρευση διαδίδεται σε όλη τη διατομή ενώ κατά τη διάρκεια της διάδοσης αυτής το φορτίο παραμένει σχεδόν σταθερό. Στα τελευταία 5 mm της διεύθυνσης

το φορτίο αυξάνεται απότομα καθώς δεν υπάρχει δυνατότητα δημιουργίας νέων πλαστικών αρμών και η διαδικασία πλέον ανάγεται σε απλή συμπίεση συμπαγούς υλικού.

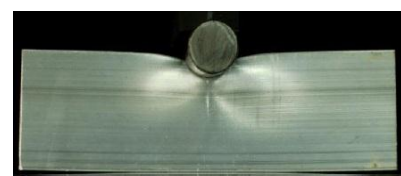
2.1.2: Ορθογωνικό κέλυφος διαστάσεων 50x30x2 κατά μήκος της μικρής πλευράς



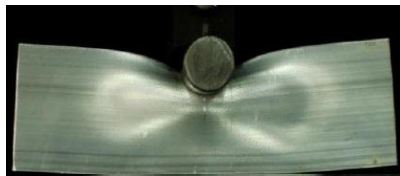
1(0mm)



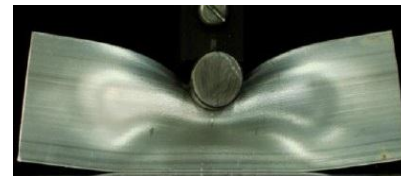
2(2.9mm)



3(7.0mm)



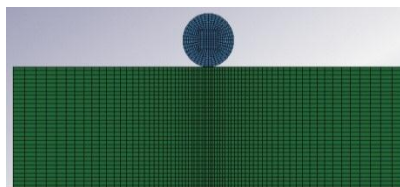
4(11.9mm)



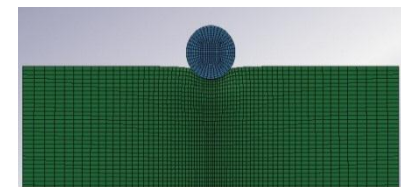
5(16.3mm)



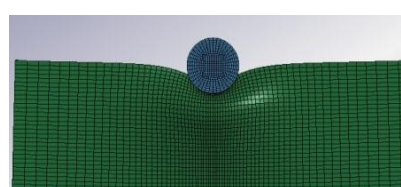
6(20mm)



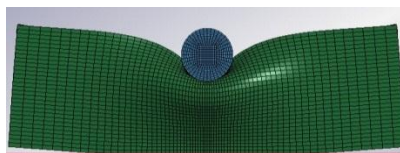
1(0mm)



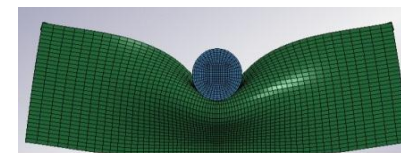
2(2.9mm)



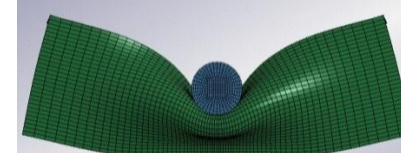
3(7.0mm)



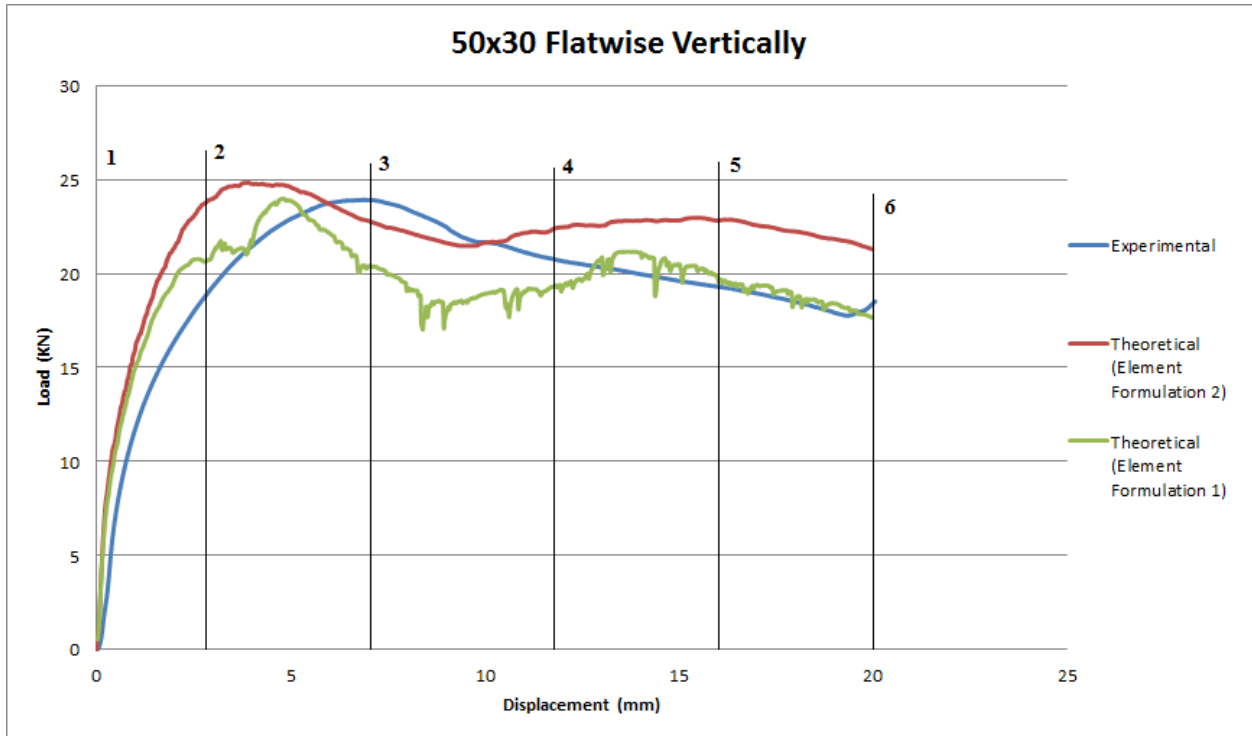
4(11.9mm)



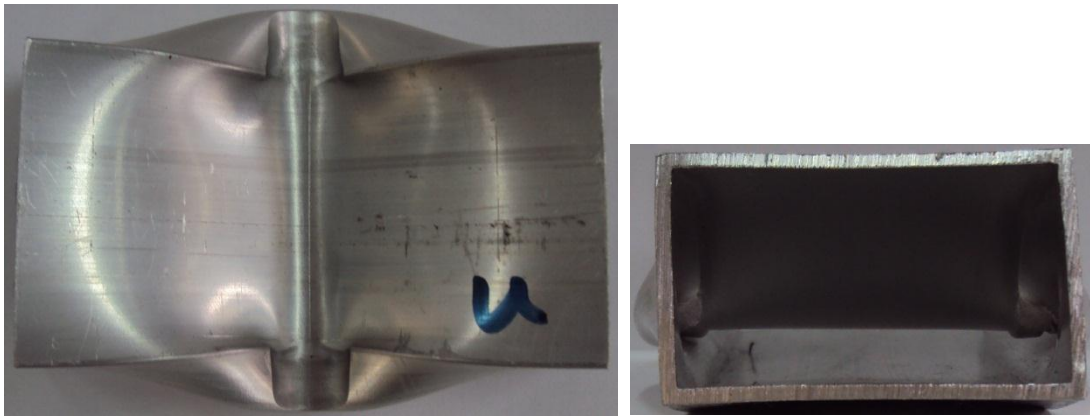
5(16.3mm)



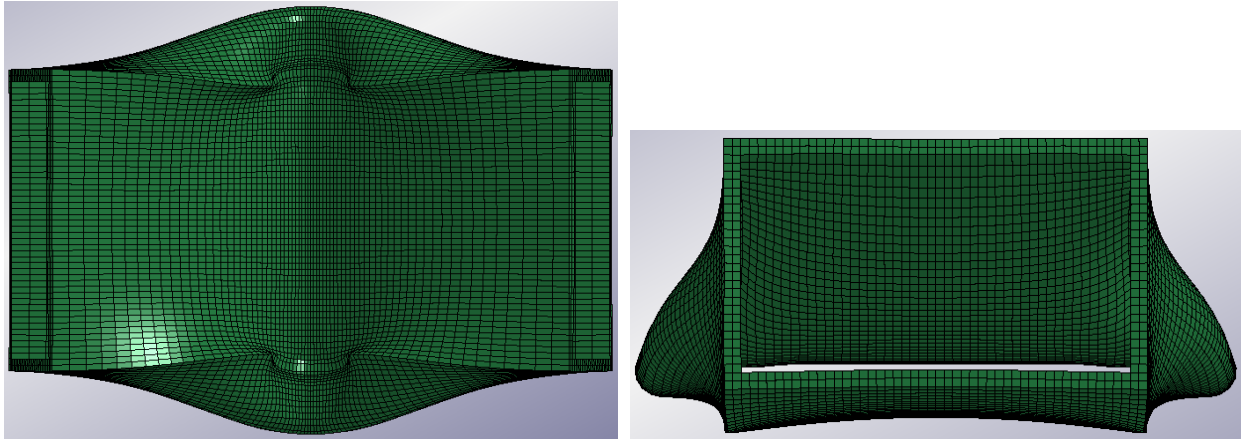
6(20mm)



Διάγραμμα 2.2: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για το ορθογωνικό δοκίμιο 50x30 mm

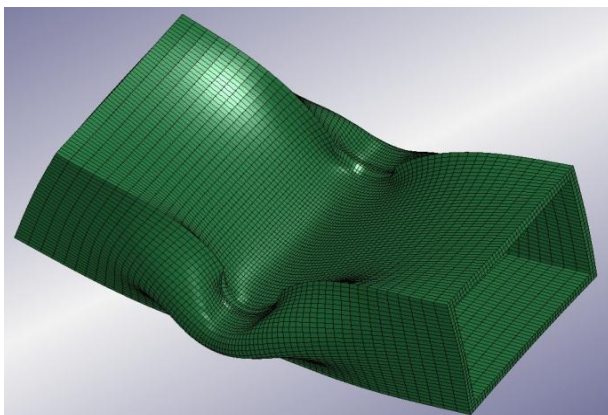


Πειραματικό δοκίμιο μετά την ολοκλήρωση της κατάρρευσης

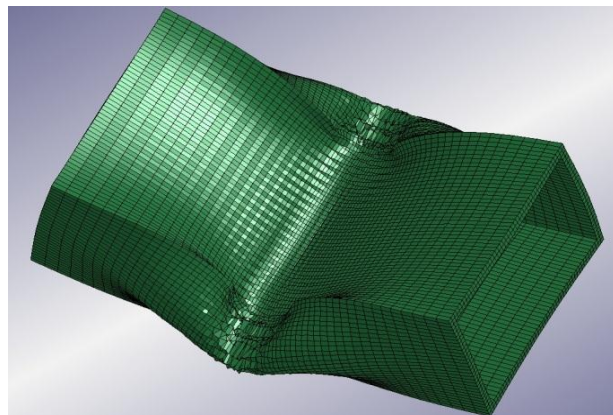


Θεωρητικό μοντέλο μετά την ολοκλήρωση της κατάρρευσης

Σε αυτή την περίπτωση (flatwise) όπου η κατάρρευση του κελύφους γίνεται κατά μήκος της μικρής του πλευράς, το αναπτυσσόμενο φορτίο παρουσιάζει αισθητά μεγαλύτερο δείκτη ομοιομορφίας σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση όπου η κατάρρευση γίνεται κατά μήκος της μεγάλης πλευράς (edgewise), καθώς μετά την αρχική του αύξηση, διατηρείται σχεδόν σταθερό μέχρι το τέλος της κατάρρευσης, ενώ δεν παρατηρείται κάποια μεγάλη αύξησή του στο τελικό στάδιο της που να οφείλεται σε συμπίεση συμπαγούς υλικού. Στο πείραμα αυτό δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά στην ομοιότητα των δύο θεωρητικών καμπύλων με την πραγματική και δεν μπορούμε να αποφανθούμε για το ποια είναι η καταλληλότερη μέθοδος μοντελοποίησης. Εν τούτοις και πάλι η καμπύλη που αντιστοιχεί σε fully-integrated element formulation (κόκκινη καμπύλη) μπορεί να εμποδίζει το φαινόμενο σχηματισμού κλεψύδρων αλλά κάνει το θεωρητικό δοκίμιο πιο στιβαρό απ' ότι είναι στην πραγματικότητα.



Element Formulation 2

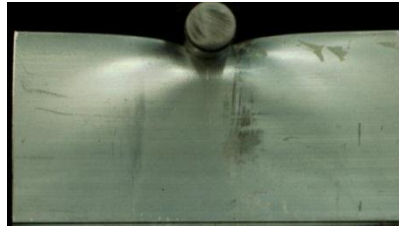


Element Formulation 1

2.1.3: Τετραγωνικό κέλυφος διαστάσεων 50x50x2



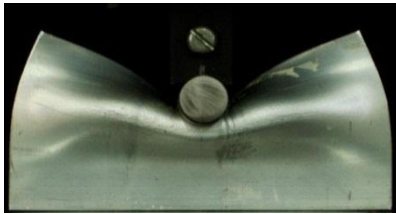
1(0mm)



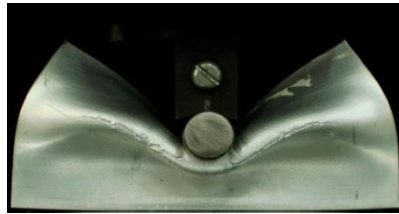
2(7.8mm)



3(15.6mm)



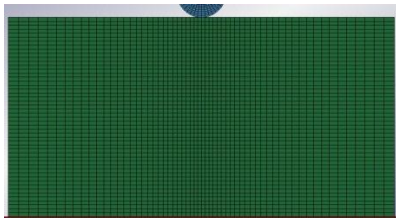
4(27.2mm)



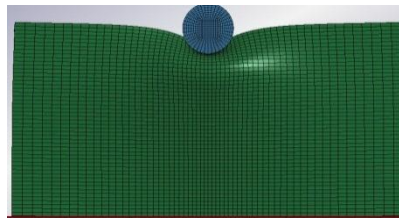
5(36.1mm)



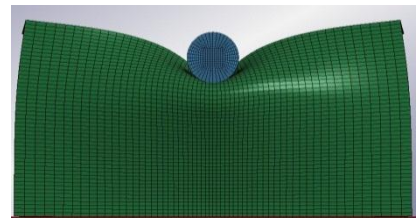
6(40mm)



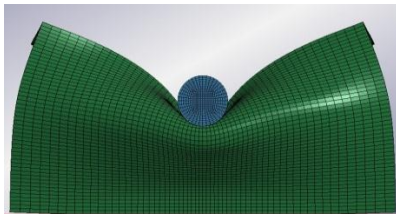
1(0mm)



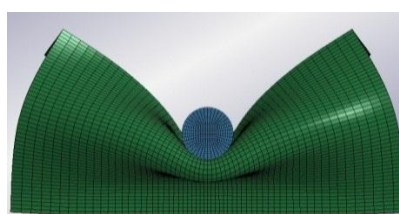
2(7.8mm)



3(15.6mm)



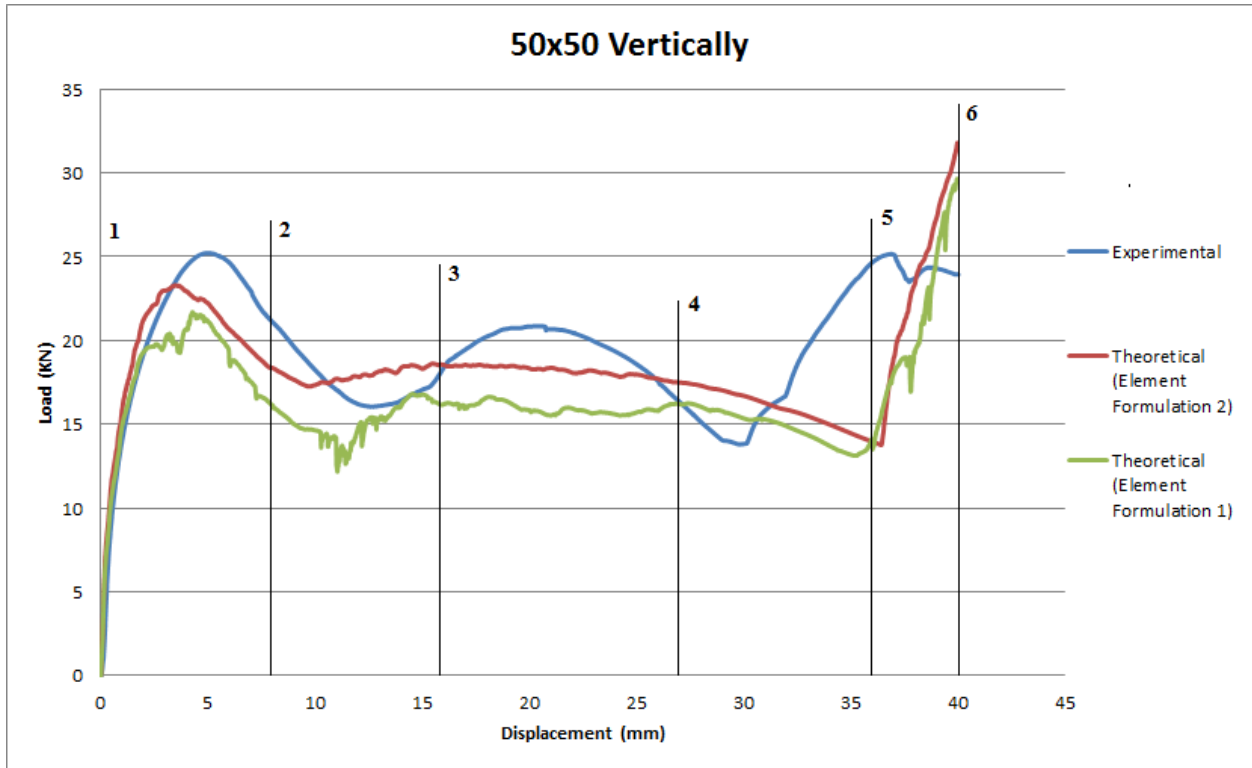
4(27.2mm)



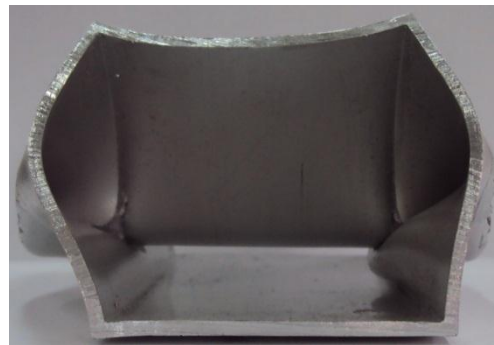
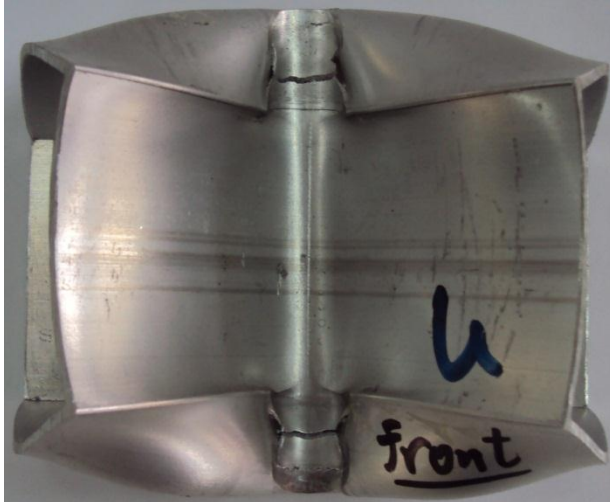
5(36.1mm)



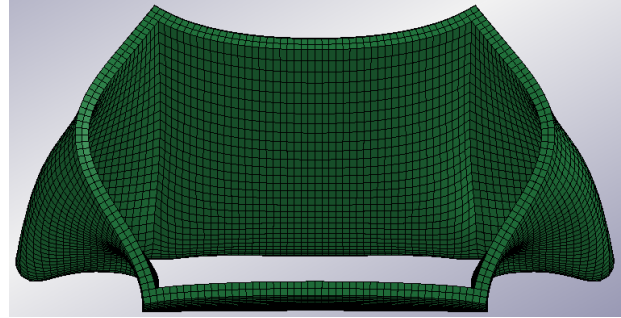
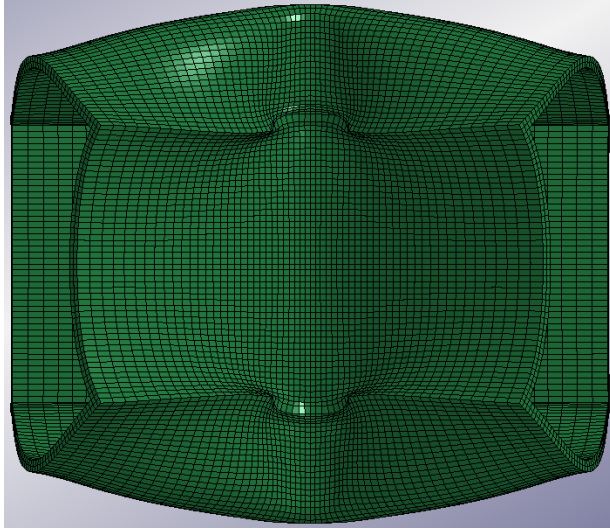
6(40mm)



Διάγραμμα 2.3: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για το τετραγωνικό δοκίμιο 50x50

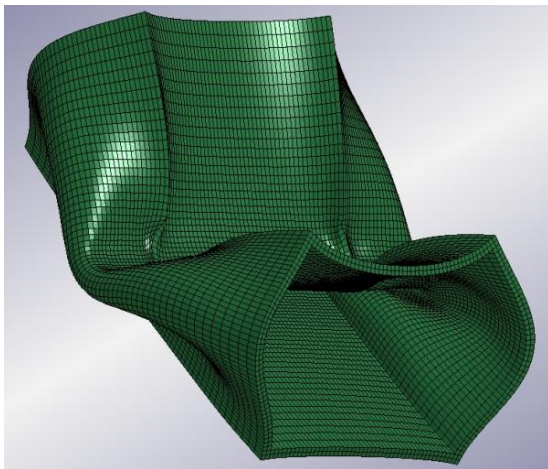


Πειραματικό δοκίμιο μετά την ολοκλήρωση της κατάρρευσης

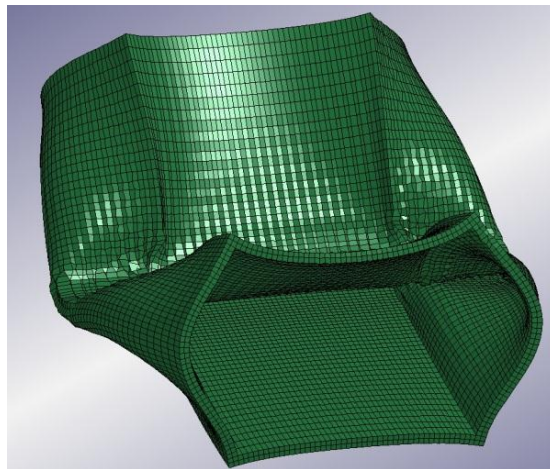


Θεωρητικό μοντέλο μετά την ολοκλήρωση της κατάρρευσης

Στην περίπτωση του τετραγωνικού 50x50 δοκιμίου η κόκκινη καμπύλη βρίσκεται πιο κοντά στην πειραματική σε σχέση με την πράσινη. Η έντονη πτώση του φορτίου μετά τα 20mm της κατάρρευσης οφείλεται σε τοπική θραύση του δοκιμίου που φαίνεται στη θέση 4 και πιο έντονα στις θέσεις 5 και 6. Ο αντίστοιχος κώδικας δεν εξέτασε την πιθανότητα θραύσης γι' αυτό και οι θεωρητικές καμπύλες έχουν διαφορετική μορφή απ' την πειραματική. Παρ' όλα αυτά και μετά από αστοχία του υλικού σε κάποιες διατομές που υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση τάσεων, ο ενεργειακός απορροφητής εξακολουθεί να παραμένει λειτουργικός και απλά χάνει ένα μικρό μέρος της απορροφητικής του ικανότητας. Κατά τα γνωστά οι απότομες αυξήσεις του φορτίου στο τέλος της διαδικασίας οφείλονται σε αδυναμία δημιουργίας νέων πλαστικών αρμών που αναπόφευκτα οδηγεί στη συμπίεση συμπαγούς υλικού.



Element Formulation 2



Element Formulation 1

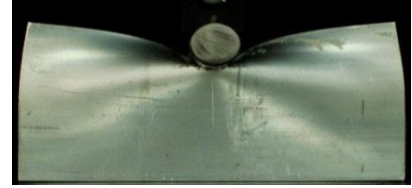
2.1.4: Τετραγωνικό κέλυφος διαστάσεων 40x40x2



1(0mm)



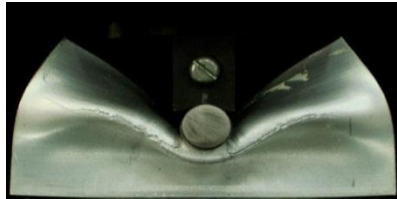
2(6.7mm)



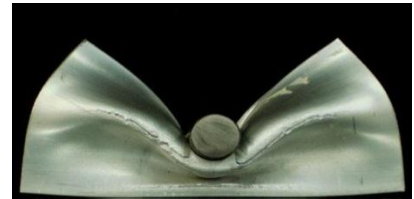
3(15.6mm)



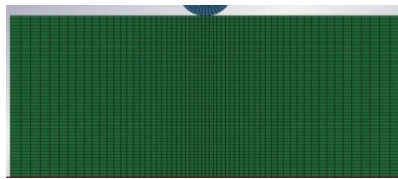
4(20.4mm)



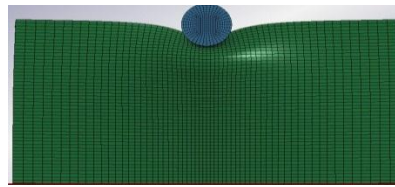
5(25.9mm)



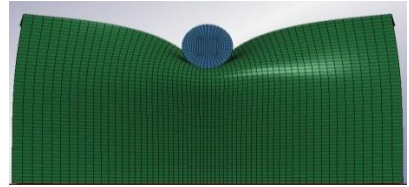
6(30mm)



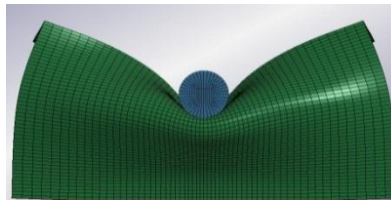
1(0mm)



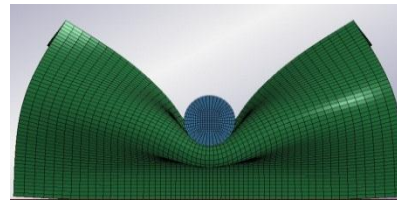
2(6.7mm)



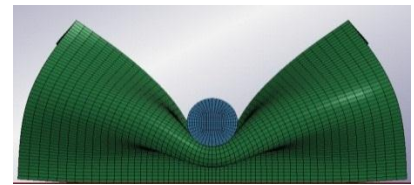
3(15.6mm)



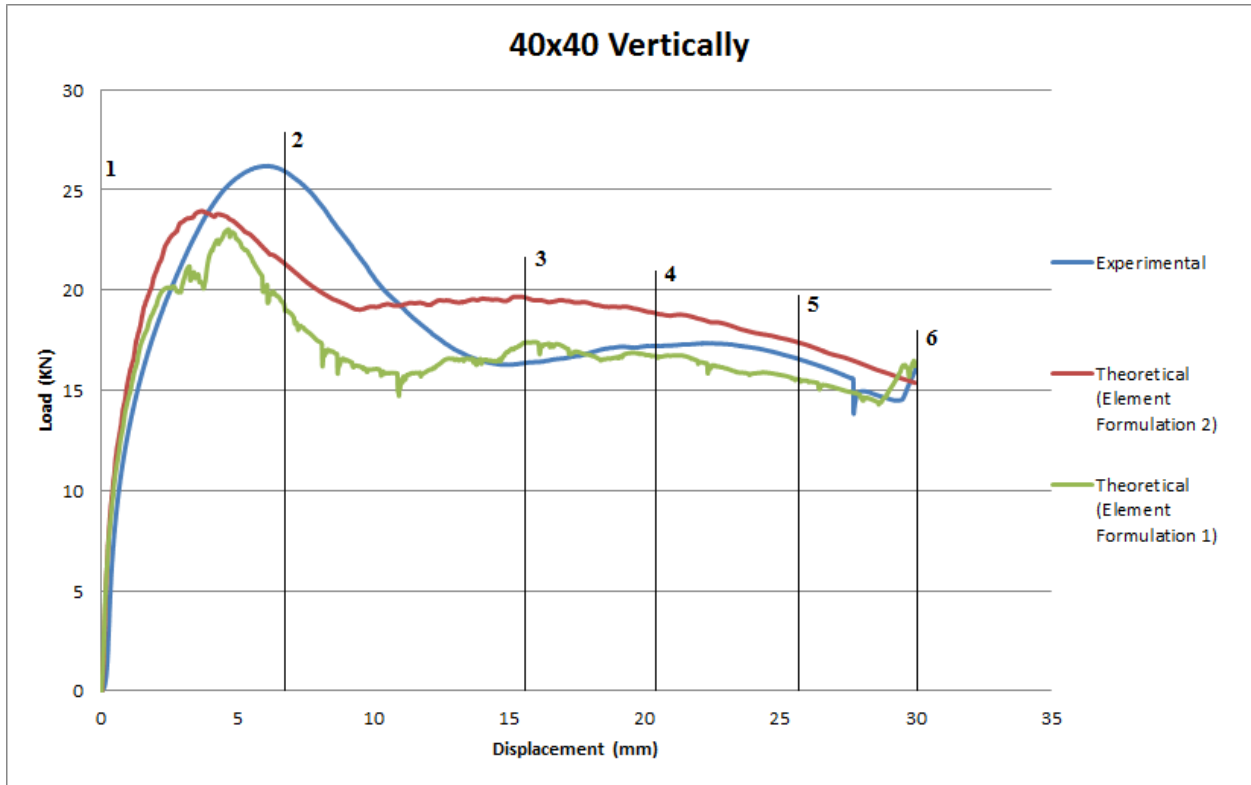
4(20.4mm)



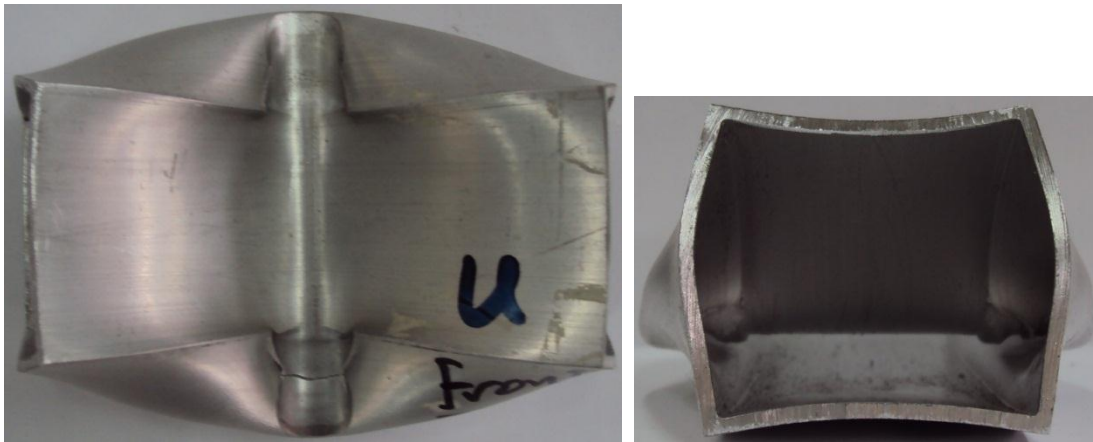
5(25.9mm)



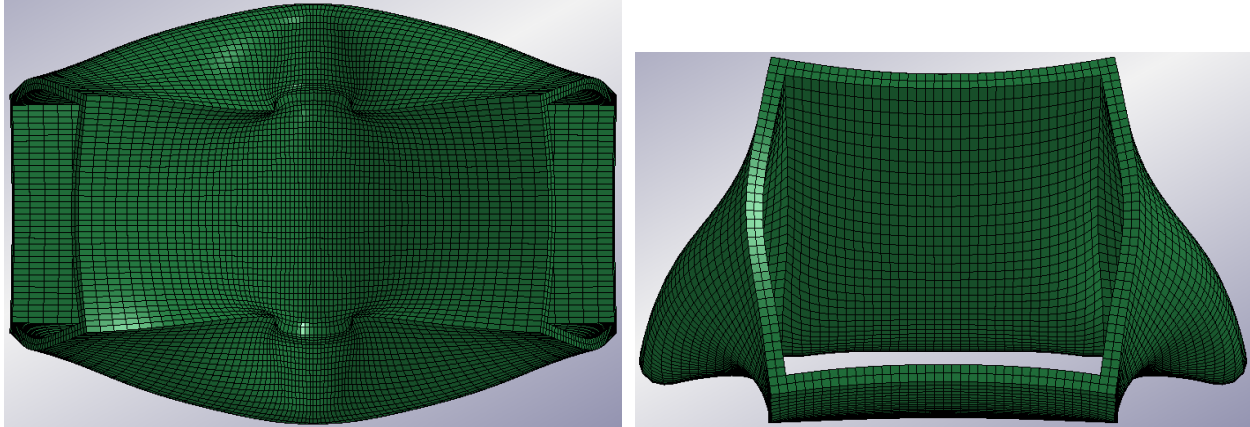
6(30mm)



Διάγραμμα 2.4: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για το τετραγωνικό δοκίμιο 40x40

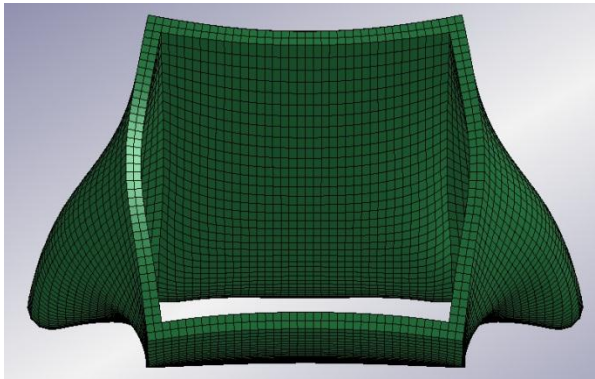


Πειραματικό δοκίμιο μετά την ολοκλήρωση της κατάρρευσης

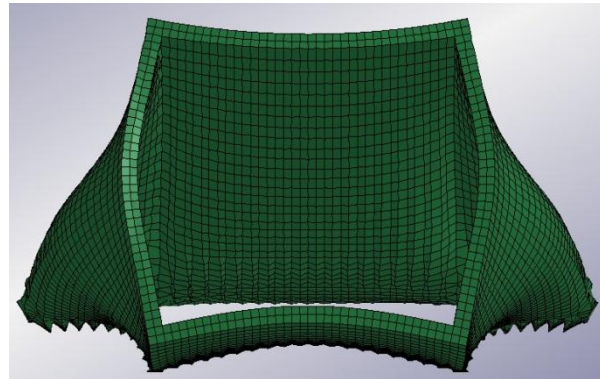


Θεωρητικό μοντέλο μετά την ολοκλήρωση της κατάρρευσης

Οι δύο θεωρητικές καμπύλες μοιάζουν αρκετά με την πειραματική. Η καμπύλη που αντιστοιχεί σε μοντέλο με έντονο hourglass (πράσινη) προσεγγίζει πιστά την πειραματική μετά την ολοκλήρωση της μισής διείδυσης, ενώ η άλλη (κόκκινη) κυρίως στην αρχική απότομη αύξηση του φορτίου. Επίσης έχουν πολύ καλύτερο δείκτη ομοιομορφίας σε σχέση με την πειραματική (μεγάλη αρχική αύξηση του αναπτυσσόμενου φορτίου μικρής διάρκειας) που μπορεί να οφείλεται σε κάποια γεωμετρική ατέλεια του πειραματικού δοκιμίου όπως για παράδειγμα ύπαρξη καμπυλότητας στις γωνίες του δοκιμίου, δηλαδή και επιπλέον υλικού, ατέλεια που φυσικά δεν υπάρχει στον κώδικα του υπολογιστικού μοντέλου. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται για άλλη μια φορά το έντονο φαινόμενο δημιουργίας κλεψύδρων που εντοπίζεται κυρίως στις περιοχές όπου υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση τάσεων.

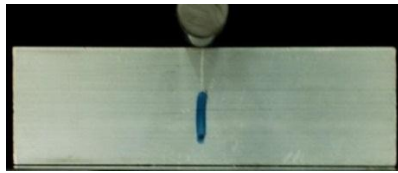


Element Formulation 2

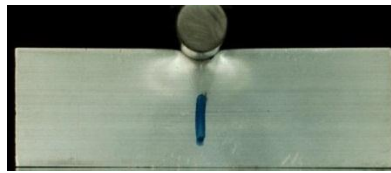


Element Formulation 1

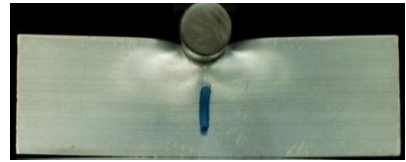
2.1.5: Τετραγωνικό κέλυφος διαστάσεων 30x30x2



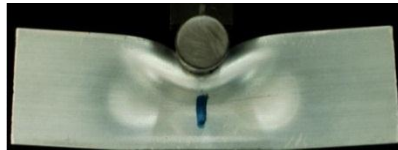
1(0mm)



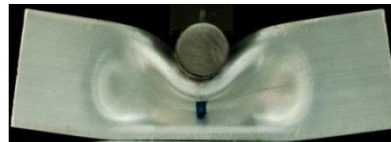
2(3.2mm)



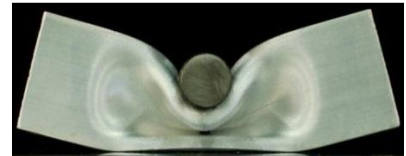
3(6.6mm)



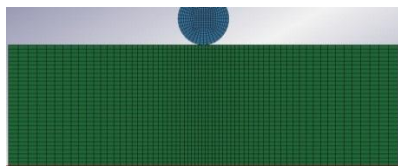
4(10.7mm)



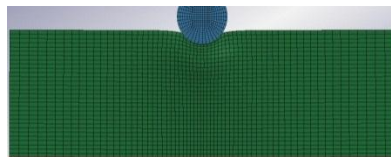
5(14.9mm)



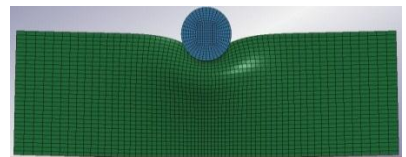
6(20mm)



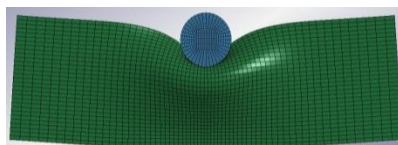
1(0mm)



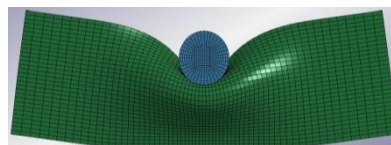
2(3.2mm)



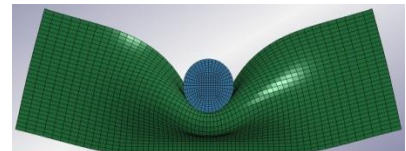
3(6.6mm)



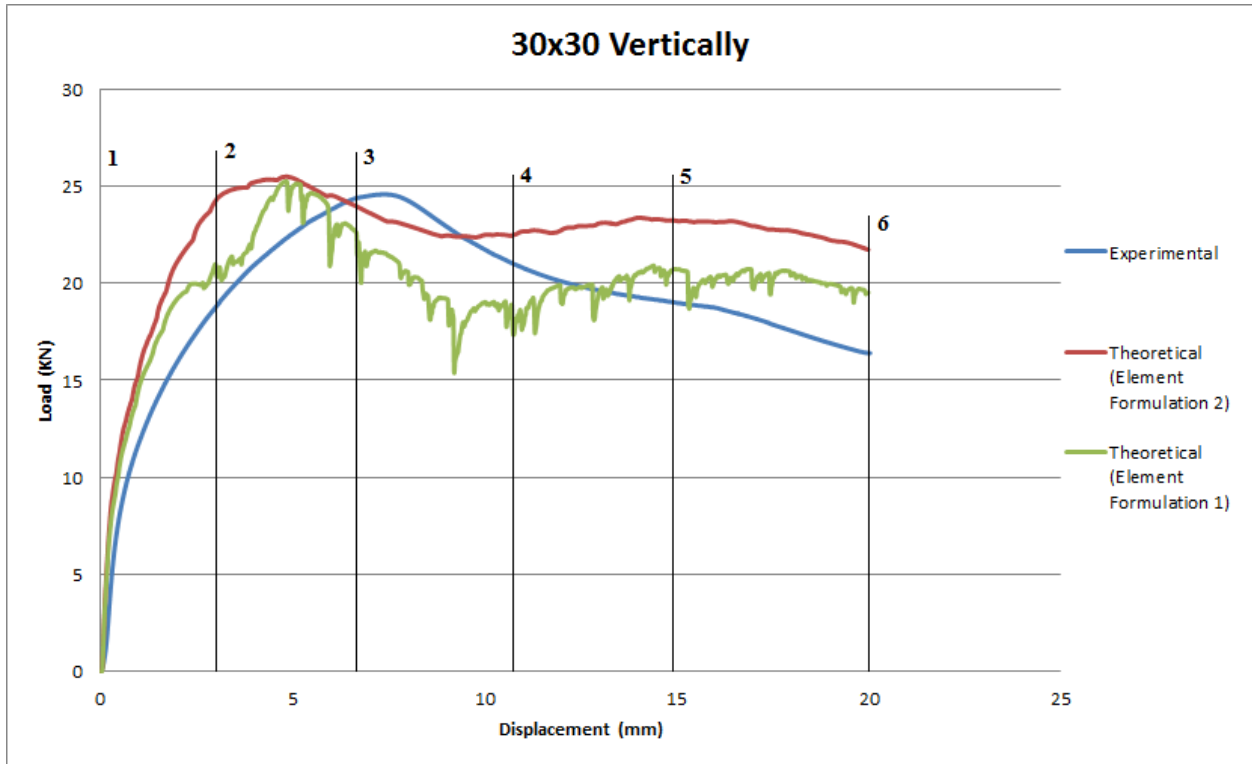
4(10.7mm)



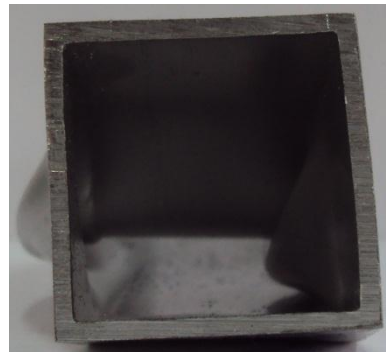
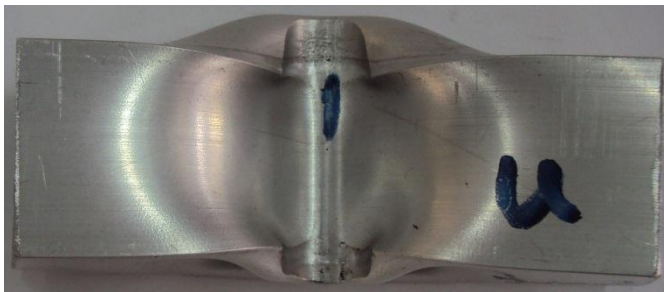
5(14.9mm)



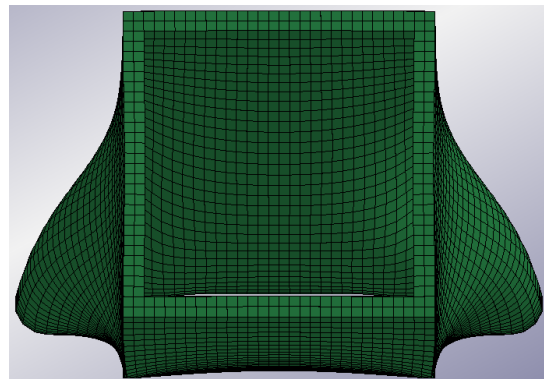
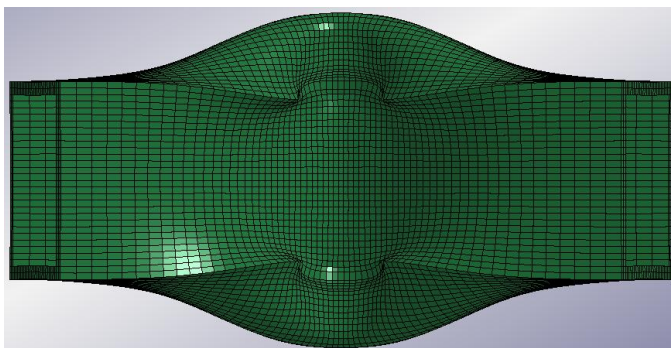
6(20mm)



Διάγραμμα 2.5: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για το τετραγωνικό δοκίμιο 30x30

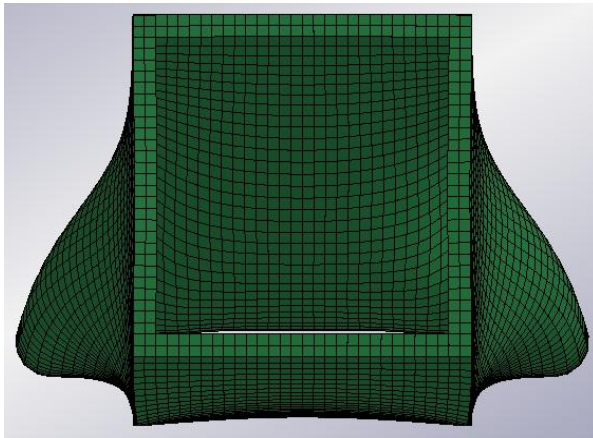


Πειραματικό δοκίμιο μετά την ολοκλήρωση της κατάρρευσης

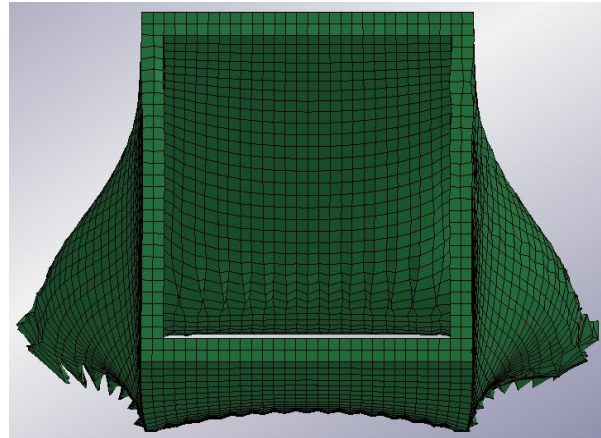


Θεωρητικό μοντέλο μετά την ολοκλήρωση της κατάρρευσης

Μία βασική διαφορά ανάμεσα στο πειραματικό δοκίμιο και στην προσομοίωσή του αφορά στον τρόπο κατάρρευσης με το θεωρητικό κέλυφος να καταρρέει ιδιόμορφα σχηματίζοντας τον ένα πλευρικό πλαστικό αρμό προς το εσωτερικό του και τον άλλο προς το εξωτερικό του μέρος. Παράλληλα για άλλη μια φορά παρατηρούμε ότι και οι δύο θεωρητικές καμπύλες έχουν μεγάλη ομοιότητα με την πειραματική, με την πράσινη καμπύλη να παρουσιάζει εξαιρετικά μεγάλο θόρυβο. Ο θόρυβος οφείλεται στη μεγάλη στιβαρότητα του συγκεκριμένου δοκιμίου σε σχέση με τα προηγούμενα, καθώς έχει ίδιο πάχος μ' αυτά αλλά αρκετά μικρότερο πλάτος και ύψος. Τα μεγάλα φορτία που ασκούνται στο δοκίμιο στην περιοχή της επαφής του με το διεισδυτή οδηγούν σε έντονο σχηματισμό κλεψύδρων που διαδίδεται άμεσα σε όλο σχεδόν το δοκίμιο. Οι εικόνες που ακολουθούν επιβεβαιώνουν τα παραπάνω συμπεράσματα.



Element Formulation 2

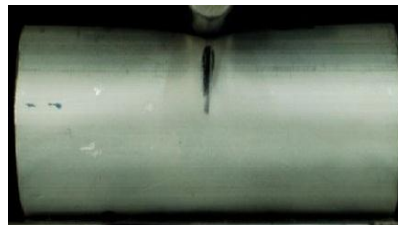


Element Formulation 1

2.1.6: Κυλινδρικό κέλυφος διαστάσεων $\Phi 50 \times 2$



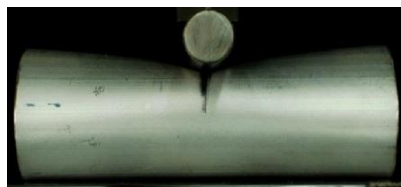
1(0mm)



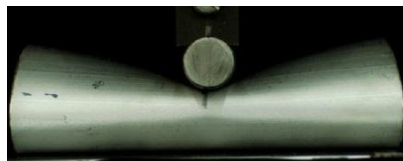
2(9.9mm)



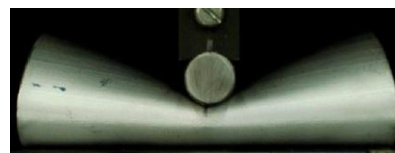
3(16.4mm)



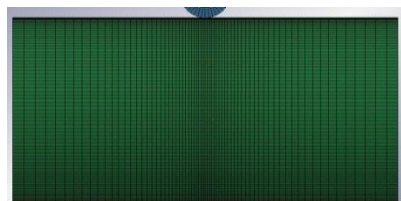
4(22.1mm)



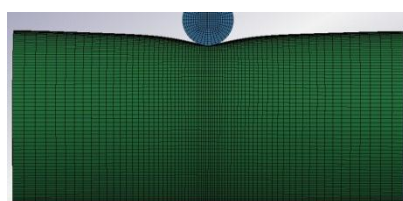
5(34.1mm)



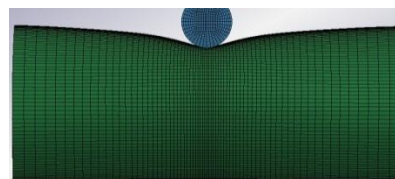
6(40mm)



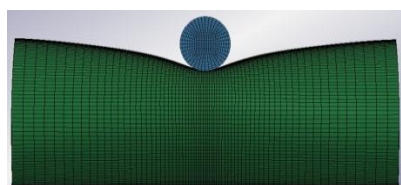
1(0mm)



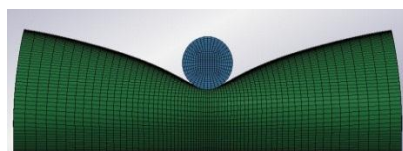
2(9.9mm)



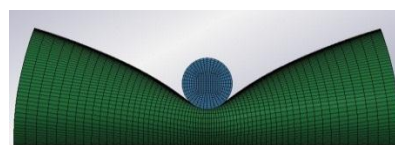
3(16.4mm)



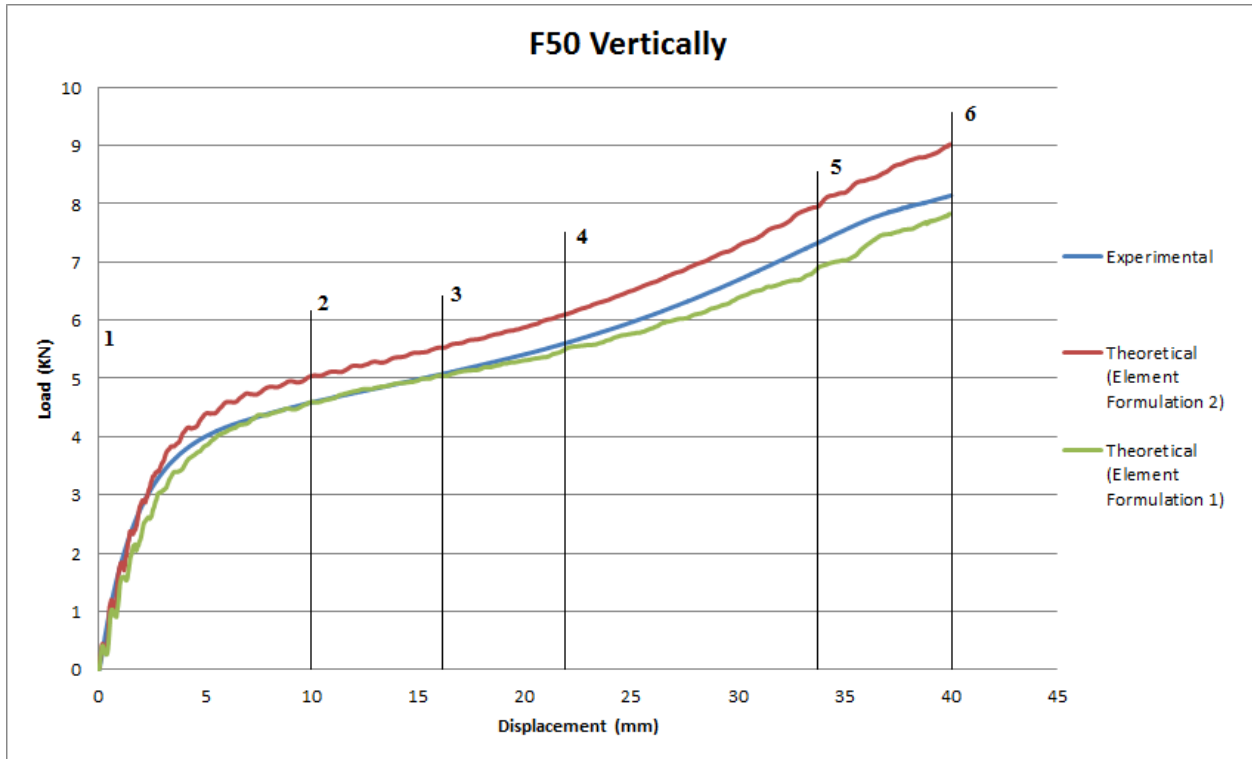
4(22.1mm)



5(34.1mm)



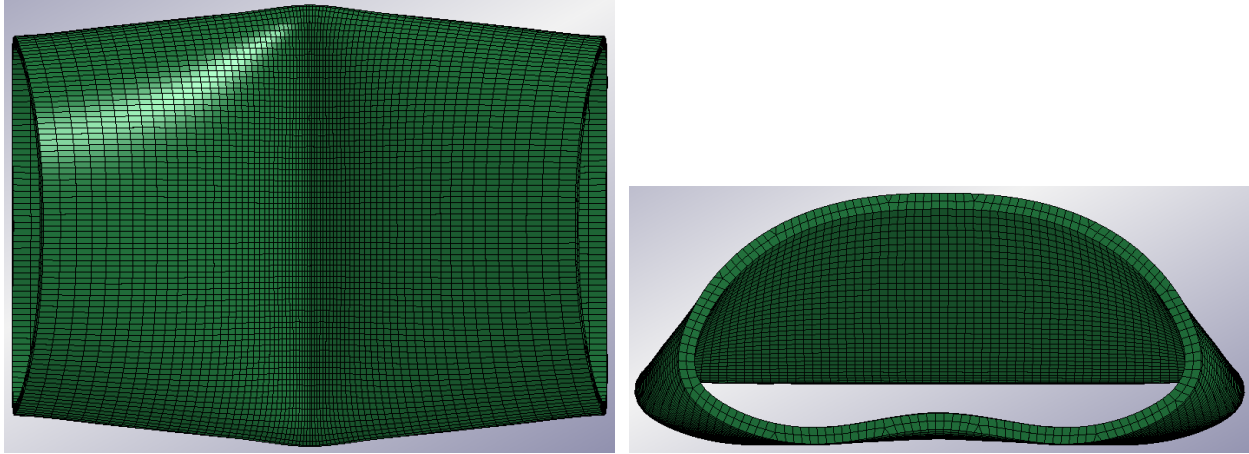
6(40mm)



Διάγραμμα 2.6: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για το κυλινδρικό δοκίμιο Φ50

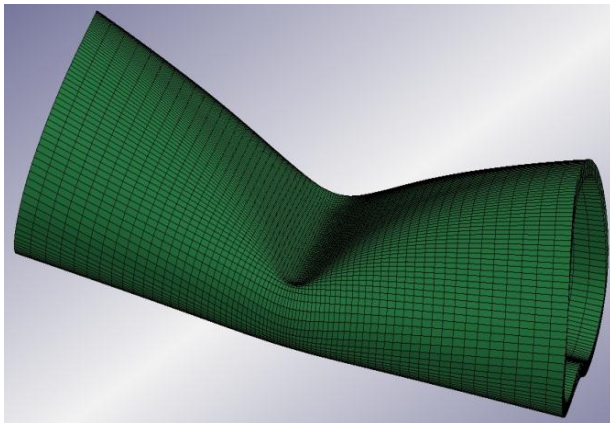


Πειραματικό δοκίμιο μετά την ολοκλήρωση της κατάρρευσης

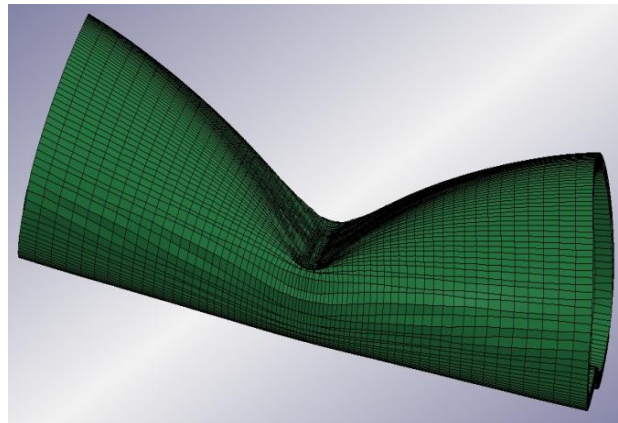


Θεωρητικό μοντέλο μετά την ολοκλήρωση της κατάρρευσης

Σε σχέση με τα προηγούμενα ορθογωνικά δοκίμια το κυλινδρικό παρουσιάζει πολύ πιο ομαλή κατάρρευση. Το φορτίο αυξάνει σταδιακά και σχεδόν γραμμικά καθώς όλο και περισσότερο υλικό συμμετέχει στην κατάρρευση. Απ' την άλλη μεριά το μέσο φορτίο είναι 3-4 φορές μικρότερο σε σχέση με τα προηγούμενα ίδιου πάχους και παρόμοιων διαστάσεων ορθογωνικά και τετραγωνικά δοκίμια. Για άλλη μία φορά η κόκκινη καμπύλη είναι υψηλότερα απ' την πειραματική (μπλε) και από τη θεωρητική που αντιστοιχεί σε μοντέλο με σχηματισμό κλεψύδρων (πράσινη) η οποία σχεδόν συμπίπτει με την πειραματική.



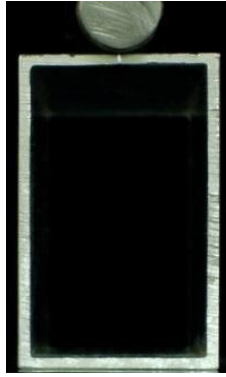
Element Formulation 2



Element Formulation 1

2.2: Παράλληλη διεύθυνση:

2.2.1: Ορθογωνικό κέλυφος διαστάσεων 50x30x2 κατά μήκος της μεγάλης πλευράς



1(0mm)



2(8.3mm)



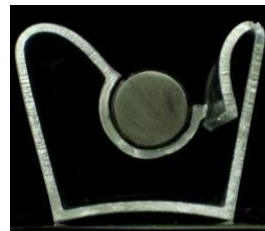
3(17.7mm)



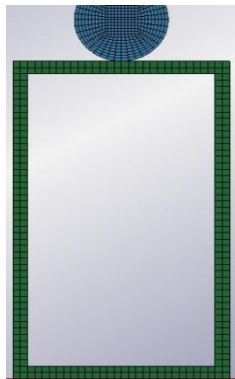
4(25.3mm)



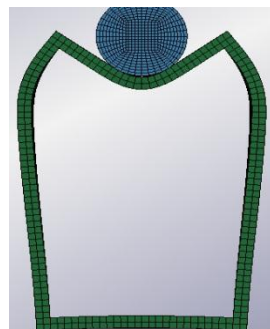
5(35.1mm)



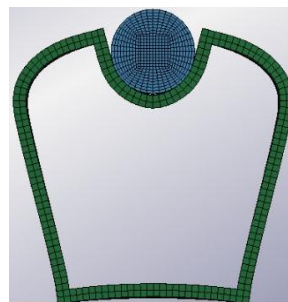
6(40mm)



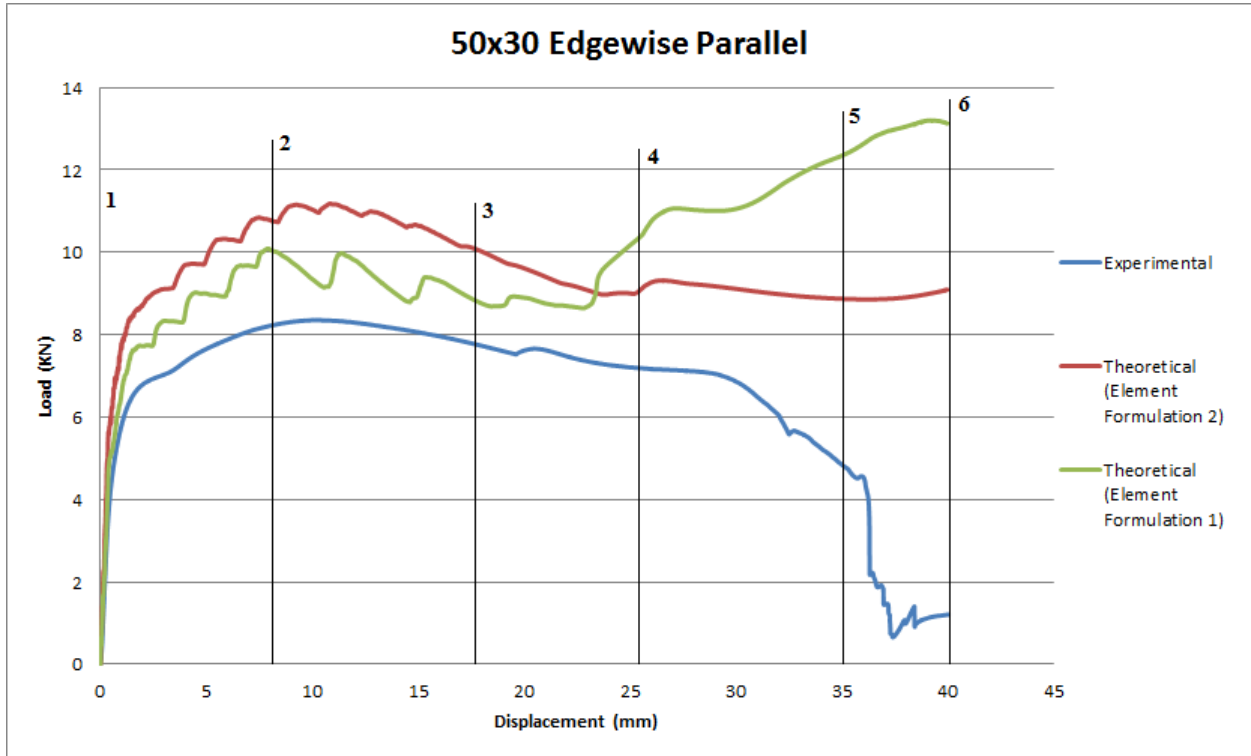
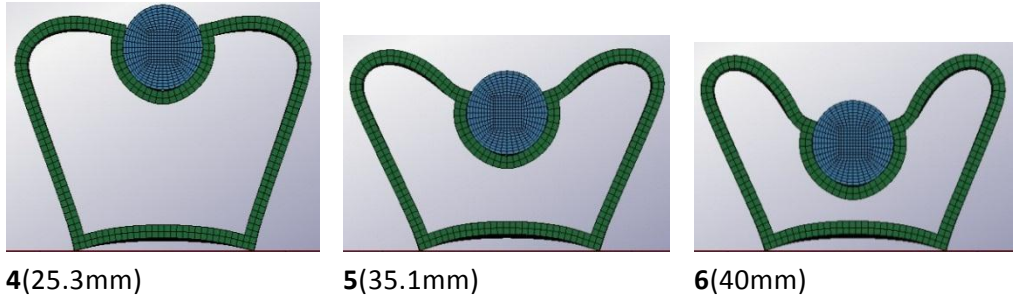
1(0mm)



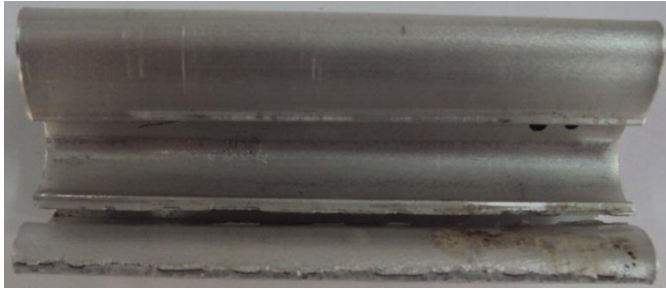
2(8.3mm)



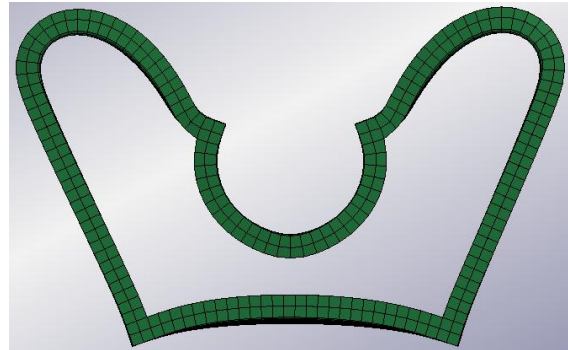
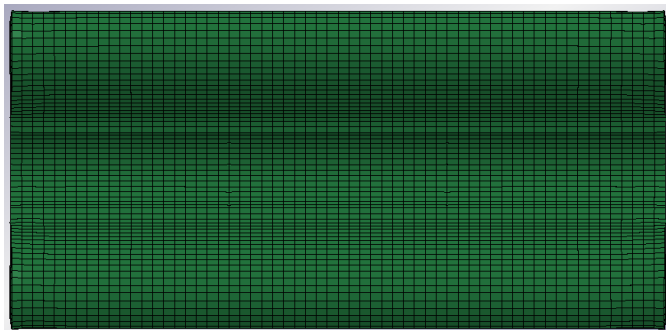
3(17.7mm)



Διάγραμμα 2.7: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για το ορθογωνικό δοκίμιο 50x30

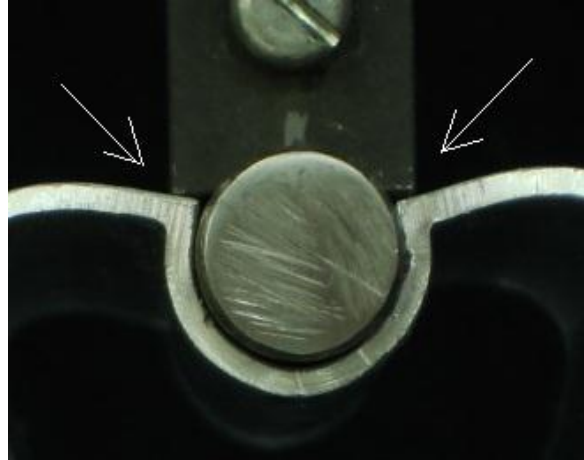


Πειραματικό δοκίμιο μετά την ολοκλήρωση της κατάρρευσης



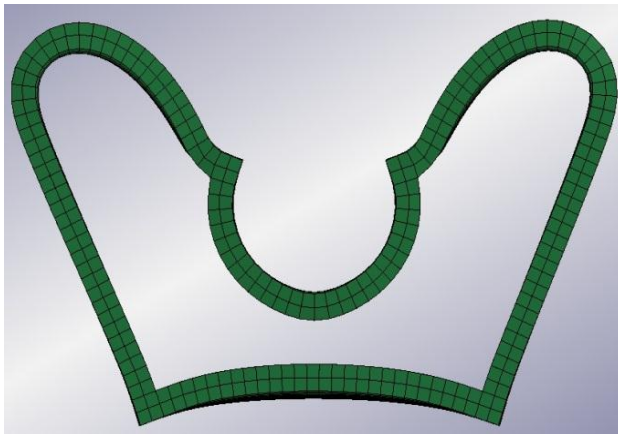
Θεωρητικό μοντέλο μετά την ολοκλήρωση της κατάρρευσης

Η μελέτη της πειραματικής καμπύλης έχει νόημα μέχρι τα 30mm περίπου της διείσδυσης διότι σε αυτή περίπου τη στιγμή αρχίζει να παρατηρείται θραύση του δοκιμίου. Η θραύση αυτή οφείλεται στην επαφή του δοκιμίου με τη βάση του κυλινδρικού διεισδυτή όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (2.1) και όχι σε αστοχία του υλικού λόγω της φόρτισής του από το χρησιμοποιούμενο κυλινδρικό διεισδυτή. Το υλικό αρχικά άρχισε να εισέρχεται στο χώρο μεταξύ του διεισδυτή και της βάσης του, ενώ στη συνέχεια η βάση λειτούργησε σαν αιχμηρό έμβολο “κόβοντας” το δοκίμιο. Ο λόγος που η θραύση έγινε μόνο απ’ τη μία μεριά του δοκιμίου είναι η γεωμετρική ατέλεια των πειραματικών εξαρτημάτων που χρησιμοποιήθηκαν ή πιθανότερα η σχετικά μικρή ακρίβεια κατά την τοποθέτησή τους πριν την εκτέλεση του πειράματος.

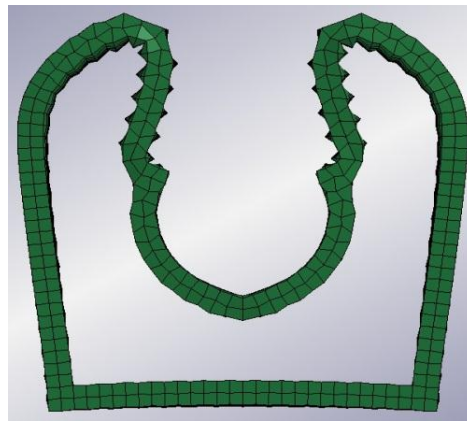


Εικόνα 2.1: Επαφή βάσης στήριξης διεισδυτή και κελύφους

Άλλο ένα θέμα που χρήζει σχολιασμού είναι η μεγάλη και σίγουρα μη αναμενόμενη αύξηση του φορτίου μετά τα 24mm της διείσδυσης στην πράσινη καμπύλη. Όπως θα δούμε στις εικόνες που ακολουθούν στο αντίστοιχο μοντέλο το φαινόμενο hourglass είναι τόσο έντονο που ουσιαστικά αλλοιώνει εντελώς τη φυσική μορφή του, γεγονός που επηρεάζει ανάλογα και τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε.

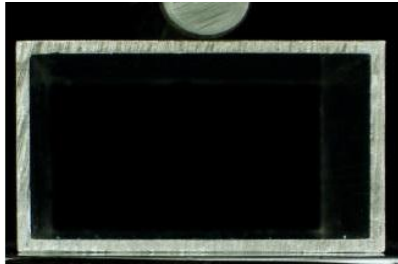


Element Formulation 2

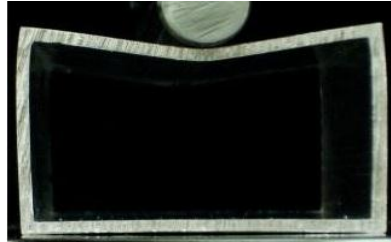


Element Formulation 1

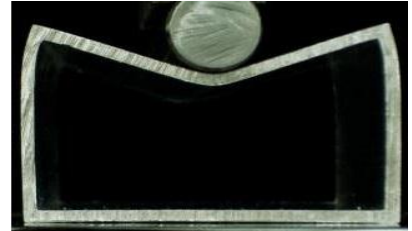
2.2.2: Ορθογωνικό κέλυφος διαστάσεων 50x30x2 κατά μήκος της μικρής πλευράς



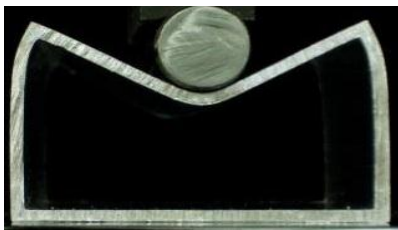
1(0mm)



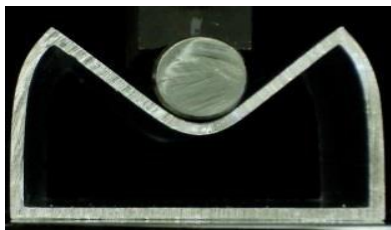
2(2.8mm)



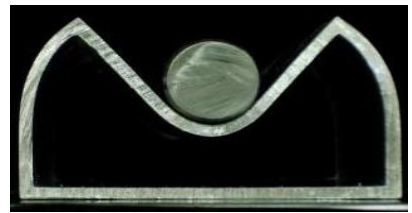
3(7.4mm)



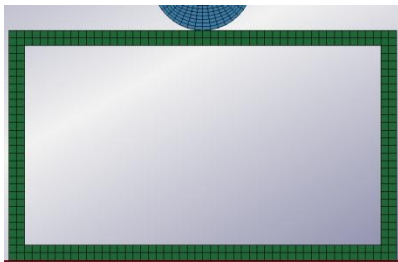
4(10.7mm)



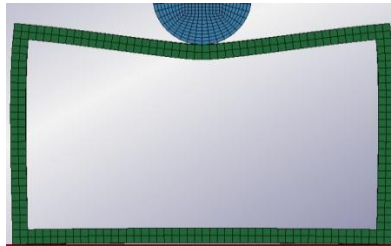
5(15.1mm)



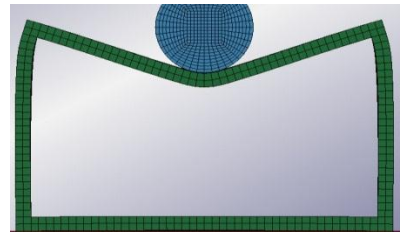
6(20mm)



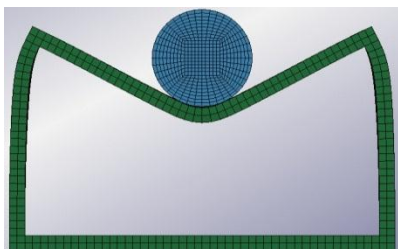
1(0mm)



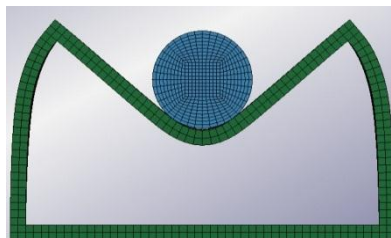
2(2.8mm)



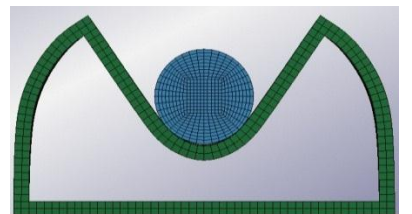
3(7.4mm)



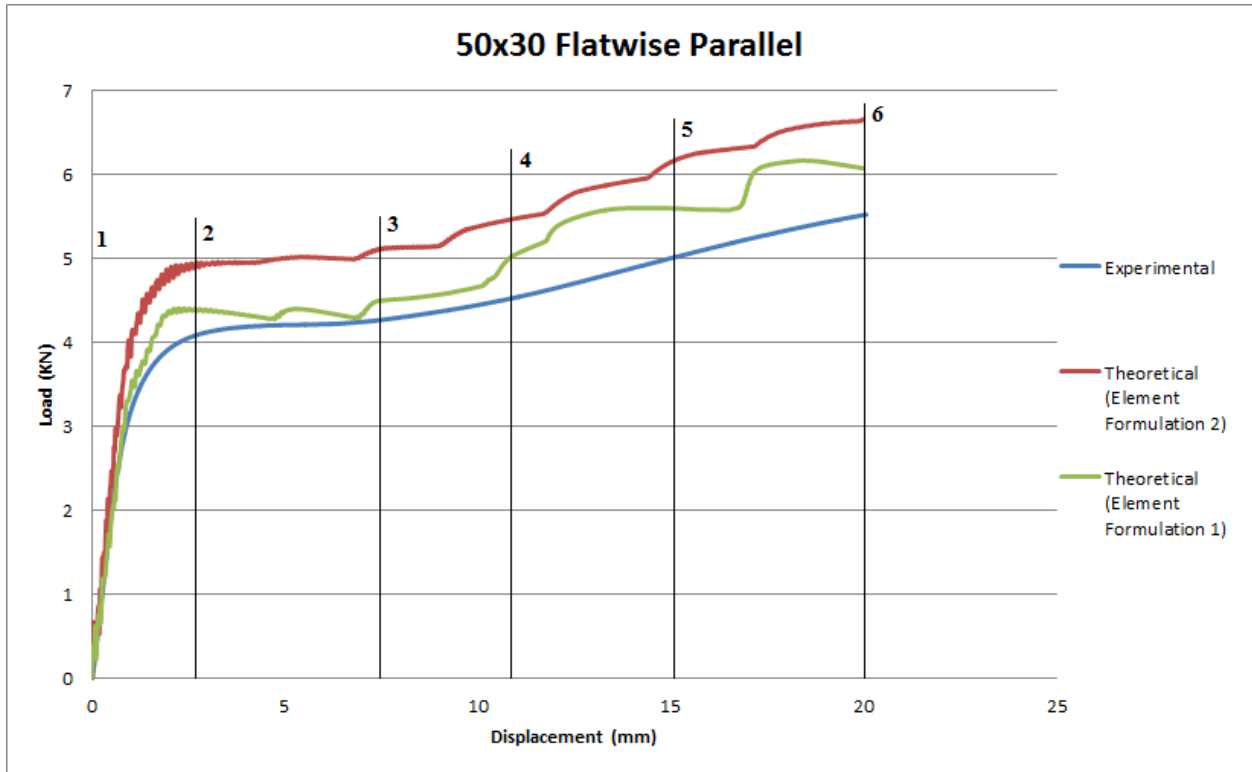
4(10.7mm)



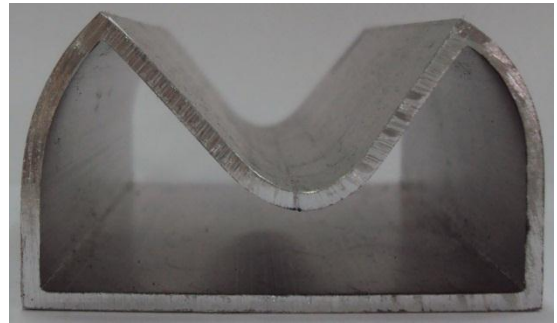
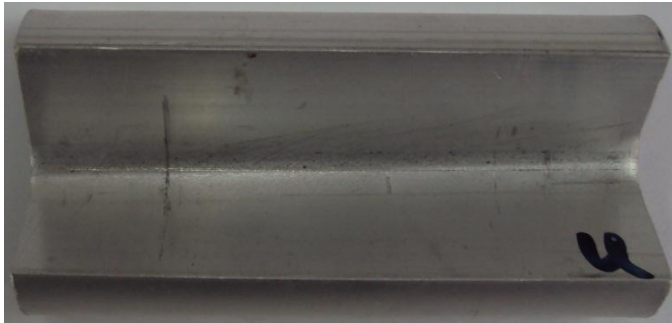
5(15.1mm)



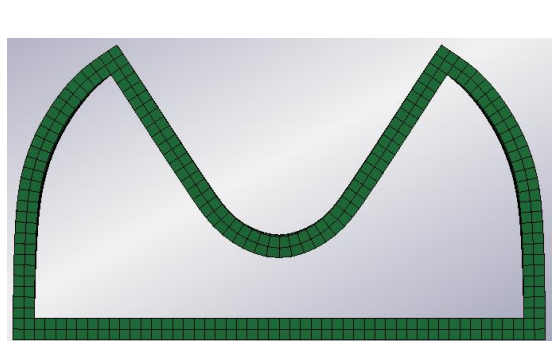
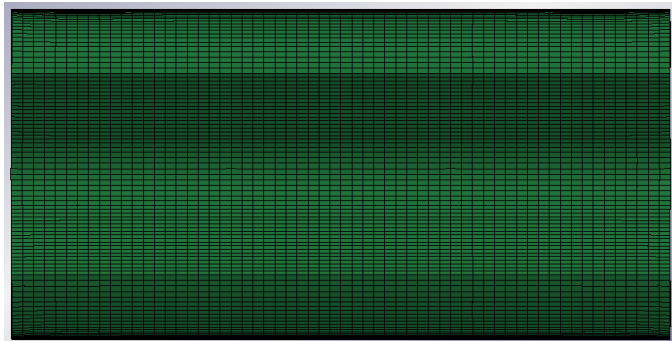
6(20mm)



Διάγραμμα 2.8: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για το ορθογωνικό δοκίμιο 50x30

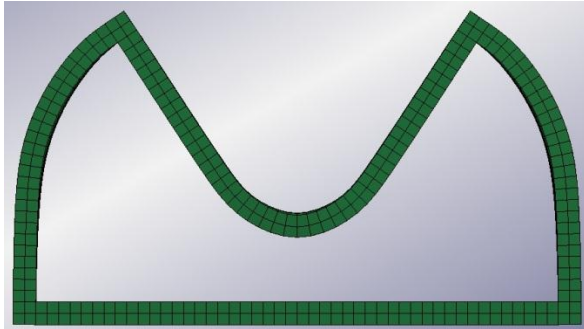


Πειραματικό δοκίμιο μετά την ολοκλήρωση της κατάρρευσης

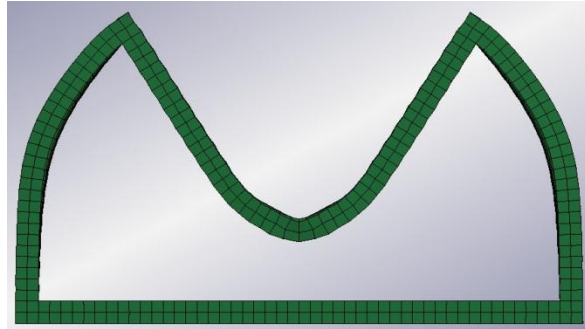


Θεωρητικό μοντέλο μετά την ολοκλήρωση της κατάρρευσης

Στην παραπάνω περίπτωση και οι δύο θεωρητικές καμπύλες βρίσκονται πολύ κοντά στην πειραματική με την κόκκινη καμπύλη να αντιστοιχεί για ακόμη μια φορά σε λίγο μεγαλύτερα φορτία. Το φαινόμενο δημιουργίας κλεψύδρων είναι πολύ περιορισμένο σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση όπου η διείδυση γινόταν κατά μήκος της μεγάλης πλευράς του ορθογωνικού δοκιμίου, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τις παρακάτω εικόνες και από το μικρό (σε σχέση με προηγούμενα διαγράμματα) θόρυβο της πράσινης καμπύλης.

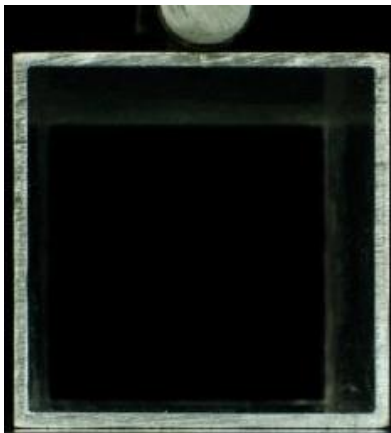


Element Formulation 2

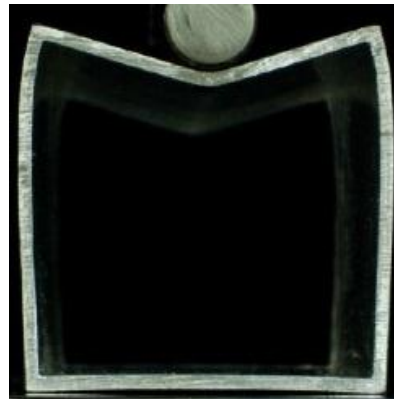


Element Formulation 1

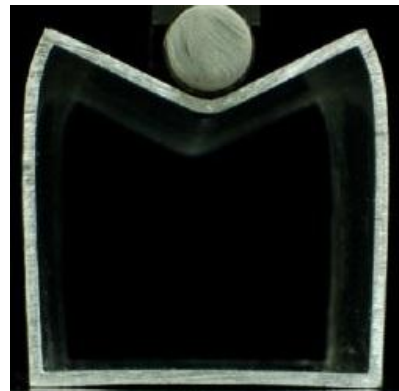
2.2.3: Τετραγωνικό κέλυφος διαστάσεων 50x50x2



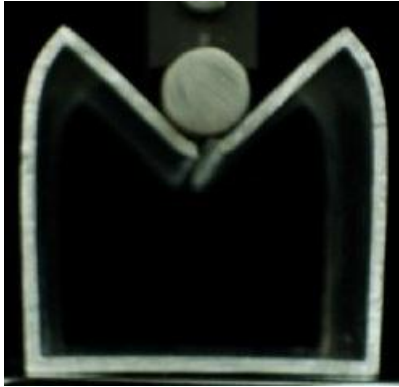
1(0mm)



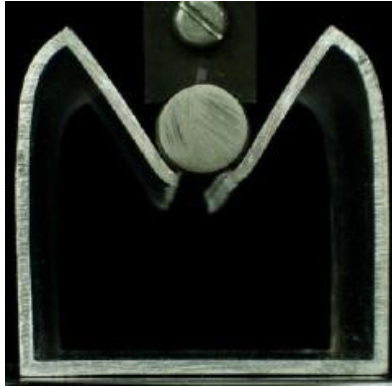
2(6.5mm)



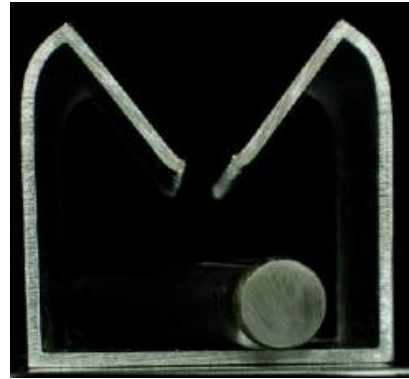
3(10.1mm)



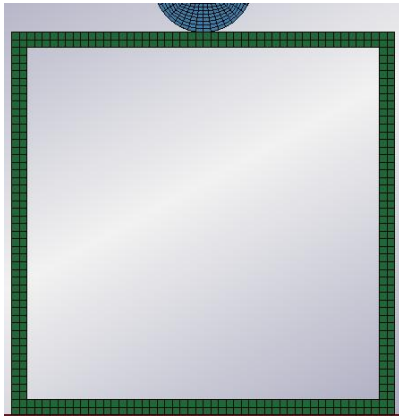
4(17mm)



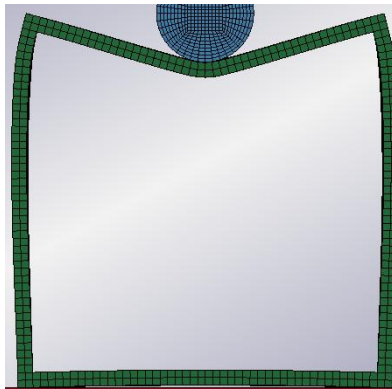
5(22.7mm)



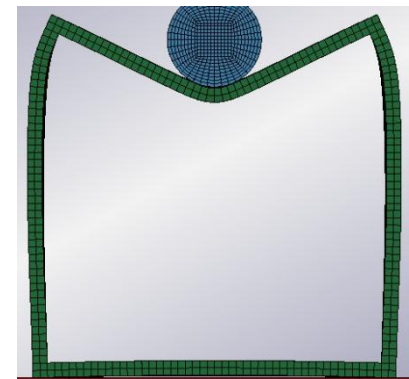
6(27.8mm)



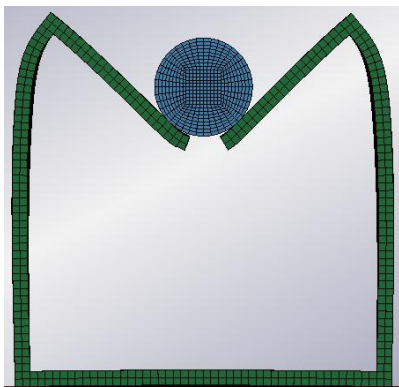
1(0mm)



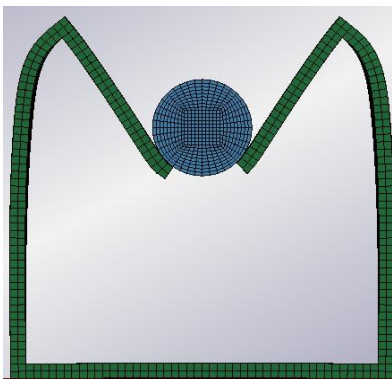
2(6.5mm)



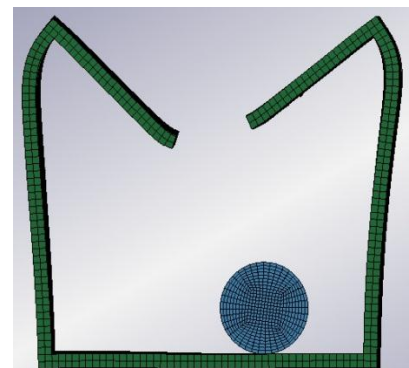
3(10.1mm)



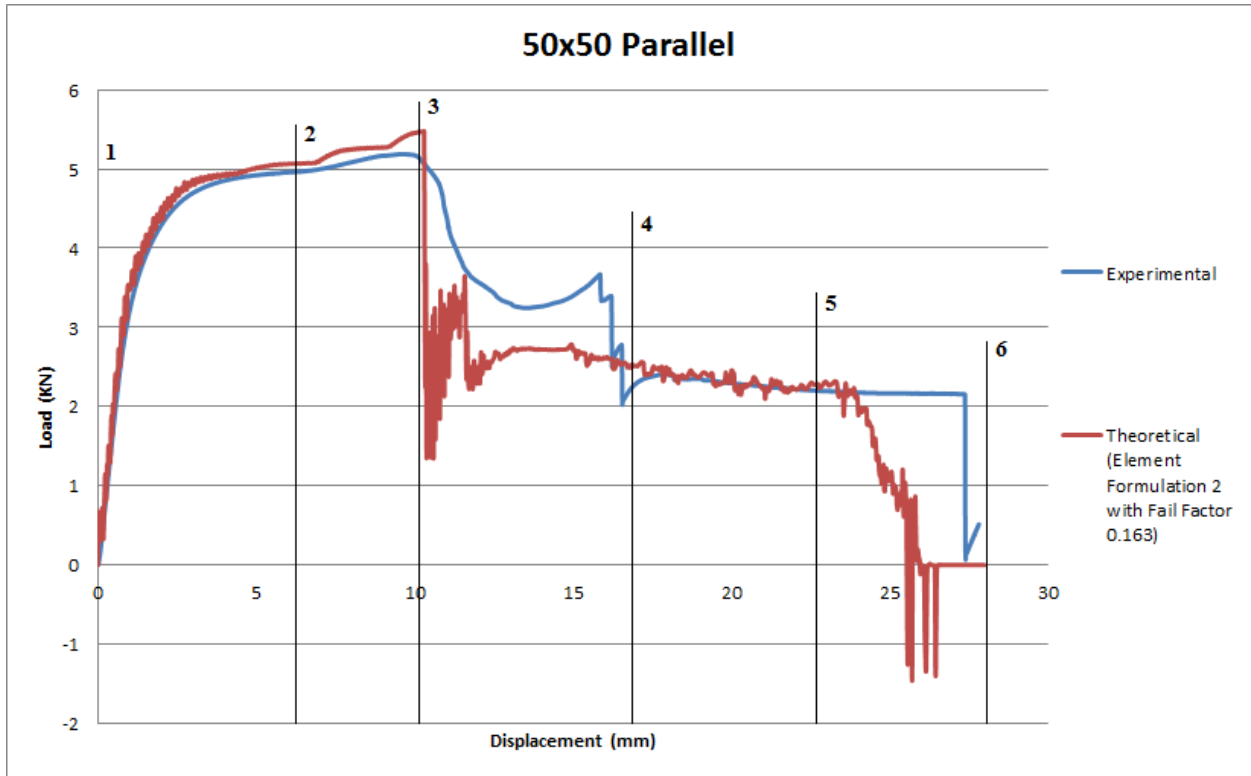
4(17mm)



5(22.7mm)



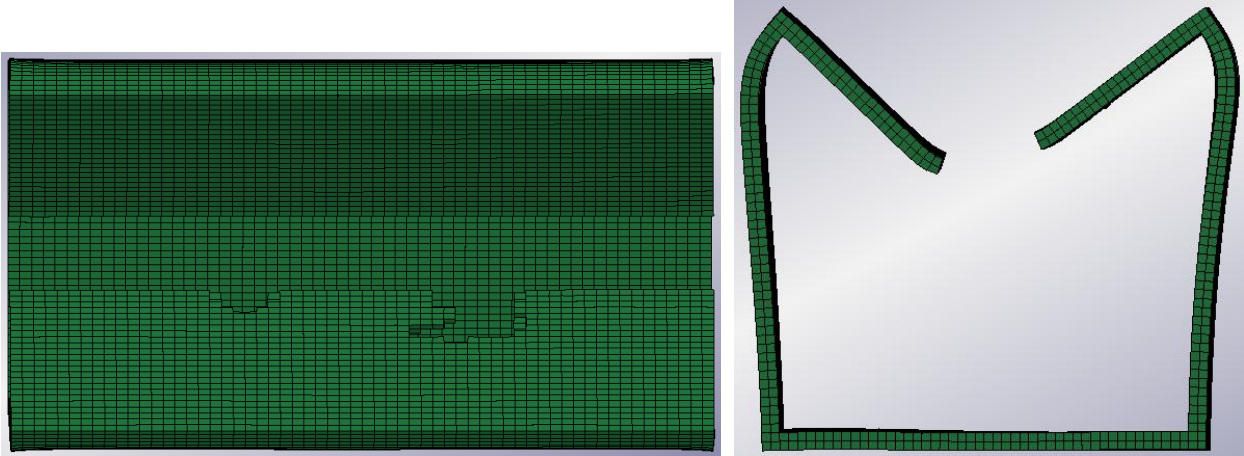
6(27.8mm)



Διάγραμμα 2.9: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για το τετραγωνικό δοκίμιο 50x50 (η θεωρητική καμπύλη αντιστοιχεί σε συντελεστή θραύσης fail factor=0.163)



Πειραματικό δοκίμιο μετά την ολοκλήρωση της κατάρρευσης

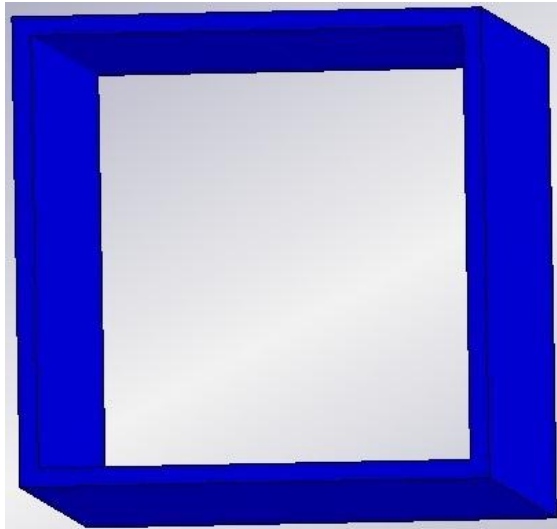


Θεωρητικό μοντέλο μετά την ολοκλήρωση της κατάρρευσης

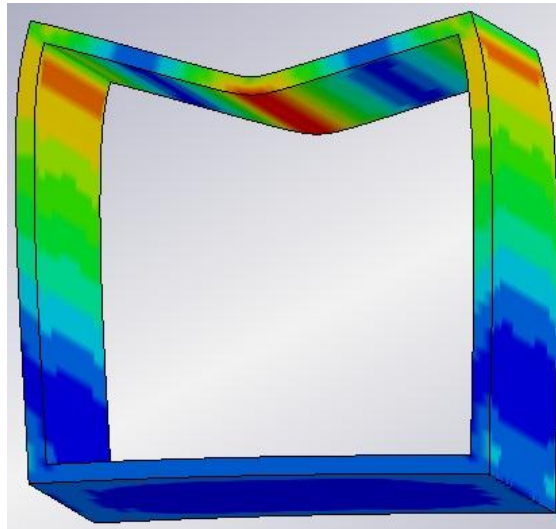
Κατά την πειραματική διαδικασία μετά τα 10mm της διείσδυσης άρχισε να αναπτύσσεται μια διαμήκης ρωγή στην κάτω πλευρά του δοκιμίου στο σημείο επαφής με το διεισδυτή. Η ρωγή αυτή σταδιακά εξαπλώθηκε σε όλο το μήκος του δοκιμίου και περίπου μετά τα 15mm είχαμε ολικό διαχωρισμό της άνω έδρας του δοκιμίου κάτι που παρατηρούμε στην παραπάνω πειραματική καμπύλη απ' την απότομη πτώση του αναπτυσσόμενου φορτίου. Στη συνέχεια η κατάρρευση συνεχίστηκε με τη μορφή λυγισμού των δύο μερών της άνω έδρας που σχηματίστηκαν μετά το διαχωρισμό αυτής, ενώ ολοκληρώθηκε στα 27.8mm της διείσδυσης όπου το έμβολο πέρασε ανάμεσα απ' τα δύο μέρη και υπό την επίδραση της βαρύτητας έπεσε χάνοντας την επαφή του με την πρέσσα. Η μοντελοποίηση της θραύσης έγινε προσθέτοντας ένα συντελεστή θραύσης (fail factor) στην αντίστοιχη καρτέλα του υλικού του δοκιμίου. Η επιλογή αναγκαστικά γίνεται με τη μέθοδο trial and error, δηλαδή βάζοντας κάποια τυχαία αρχική τιμή, ελέγχοντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν απ' αυτή και στη συνέχεια διορθώνοντας την παραπάνω τιμή ώσπου να καταλήξουμε στο επιθυμητό αποτέλεσμα. Μετά από πολλές δοκιμές καταλήξαμε στην τιμή 0.163 ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι οποιαδήποτε μεγαλύτερη τιμή (ακόμα και 0.164) οδηγούσε σε μοντέλο που δεν εμφάνιζε καθόλου θραύση. Για να κατανοήσουμε καλύτερα τον τρόπο θραύσης του κελύφους θα παραθέσουμε κάποιες επιπλέον εικόνες των καταστάσεων 1,2,3 και 4 (μέχρι και την εμφάνιση θραύσης δηλαδή). Η πρώτη ομάδα εικόνων παρουσιάζει εικονικά με βάση μια χρωματική κλίμακα τη συνολική κατά Von Mises τάση στο κέλυφος κατά τη διάρκεια της κατάρρευσής του, ενώ η δεύτερη παρουσιάζει με τη βοήθεια αντίστοιχης χρωματικής κλίμακας τα επίπεδα της πλαστικής παραμόρφωσης (plastic strain), σε όσες προφανώς περιοχές του κελύφους βρίσκονται πέρα απ' τα όρια της ελαστικής περιοχής. Με βάση αυτές θα μπορούσε να γίνει μια τοπική ενίσχυση του κελύφους στα σημεία που κρίνεται απαραίτητο ώστε να

αποφευχθεί το ενδεχόμενο θραύσης. Οι εικόνες που ακολουθούν προέρχονται όπως και οι προηγούμενες απ' το περιβάλλον του LS-PrePost (οι δύο χρωματικές κλίμακες δεν παρουσιάζονται σκόπιμα).

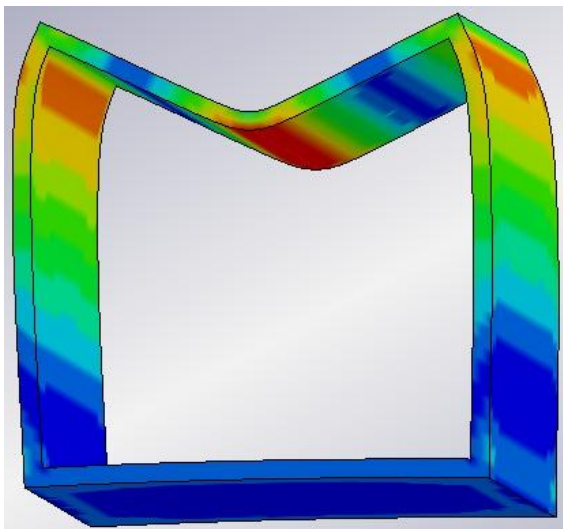
Von Mises stress



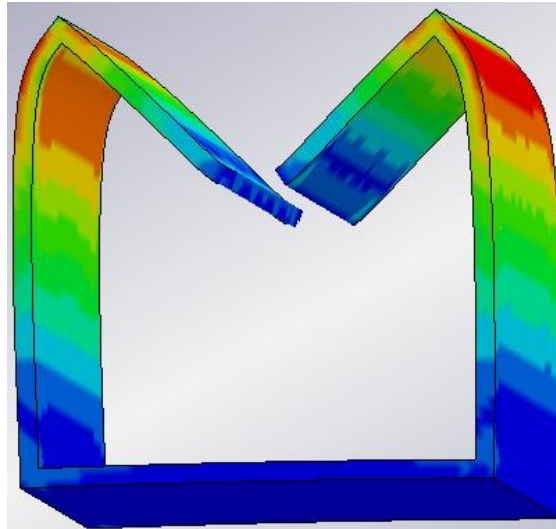
1(0mm)



2(6.5mm)

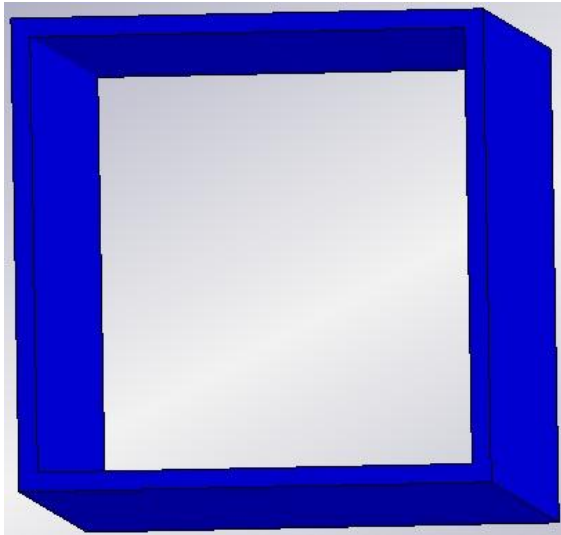


3(10.1mm)

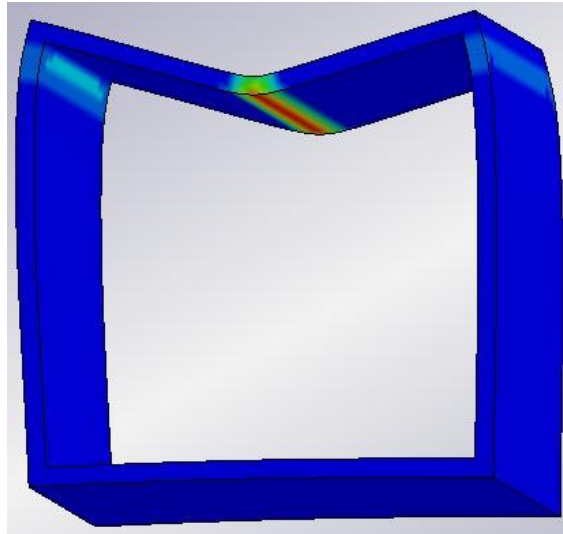


4(17mm)

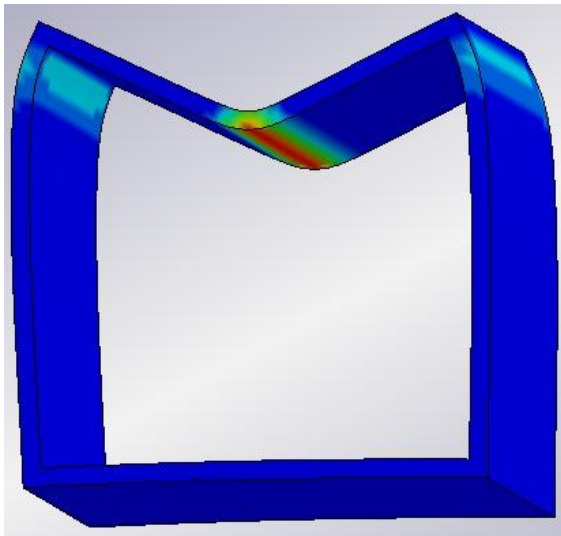
Plastic strain



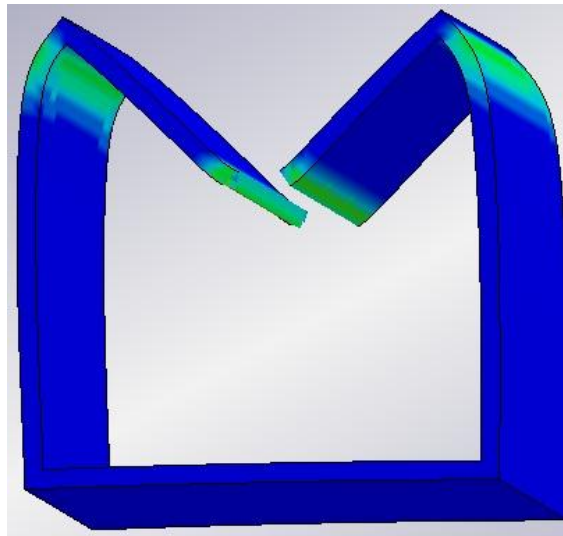
1(0mm)



2(6.5mm)

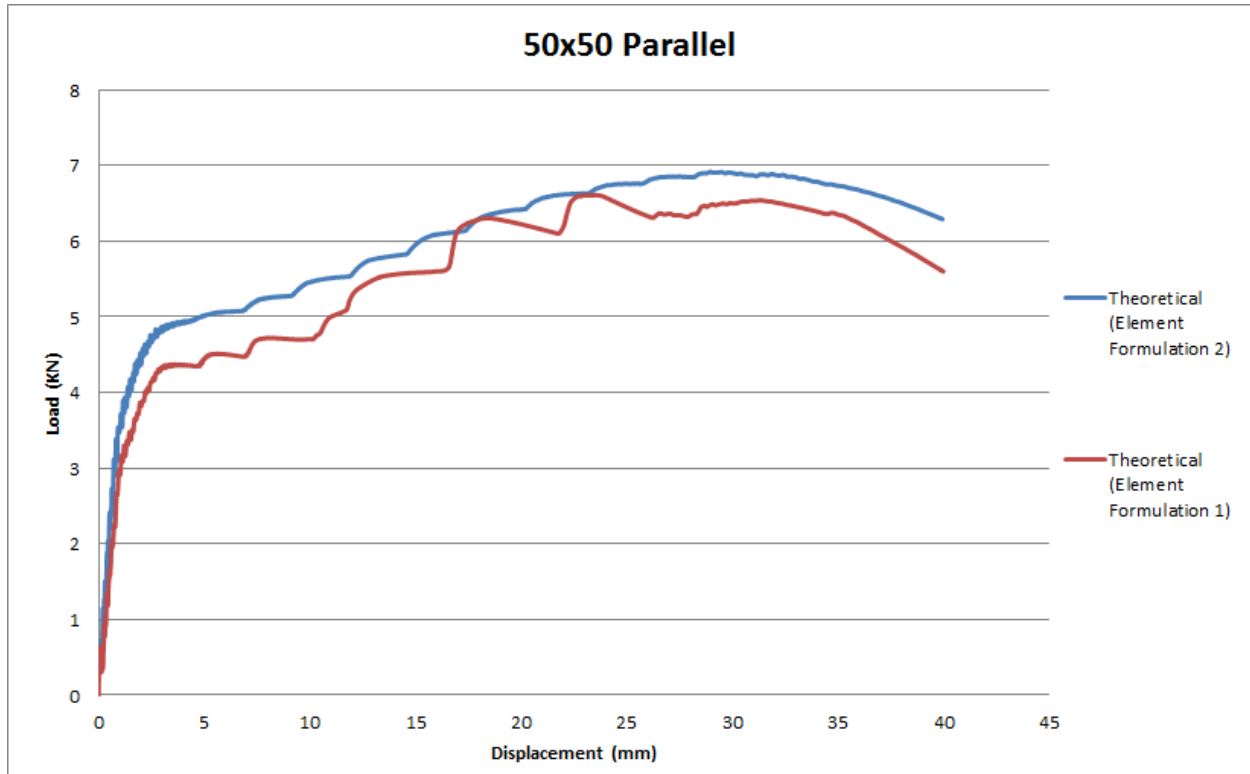


3(10.1mm)



4(17mm)

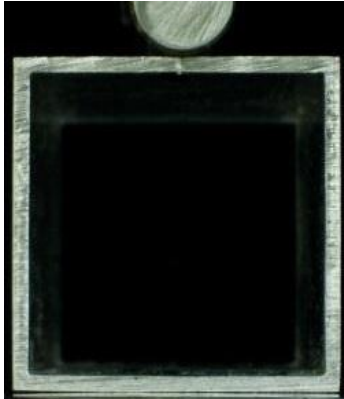
Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι η τιμή αυτή του fail factor είναι σχετικά μικρή σε σχέση με τις συνηθισμένες για τέτοιο υλικό (πάνω από 0.3), επομένως ενδέχεται η θραύση να προήλθε εξαιτίας κάποιας πειραματικής ατέλειας. Για το λόγο αυτό στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται και οι καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για μοντέλα που δεν εξετάζουν το ενδεχόμενο θραύσης.



Διάγραμμα 2.10: Θεωρητικές καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για το τετραγωνικό δοκίμιο 50x50 χωρίς έλεγχο πιθανής θραύσης.

Οι παραπάνω καμπύλες δεν χρίζουν κάποιου ιδιαίτερου σχολιασμού. Το μόνο που αξίζει να αναφέρουμε είναι ότι μέχρι τα πρώτα 10mm της διείδυσης που δεν είχε ξεκινήσει θραύση, και οι δύο βρίσκονται πολύ κοντά στην αντίστοιχη πειραματική που φαίνεται στο διάγραμμα 2.9.

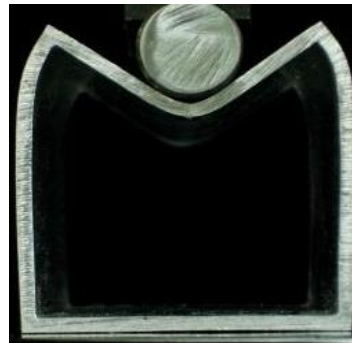
2.2.4: Τετραγωνικό κέλυφος διαστάσεων 40x40x2



1(0mm)



2(6.1mm)



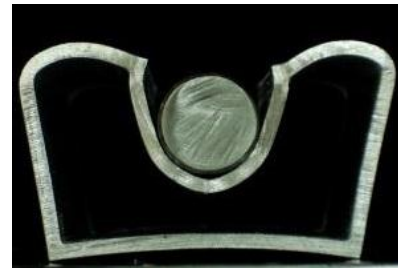
3(10.3mm)



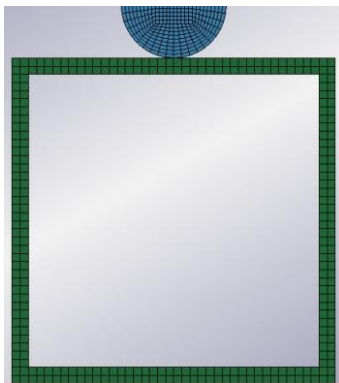
4(17.1mm)



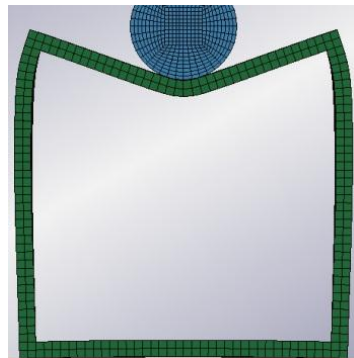
5(23.2mm)



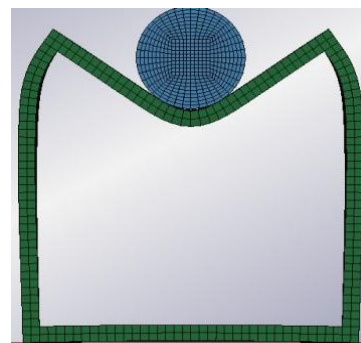
6(30mm)



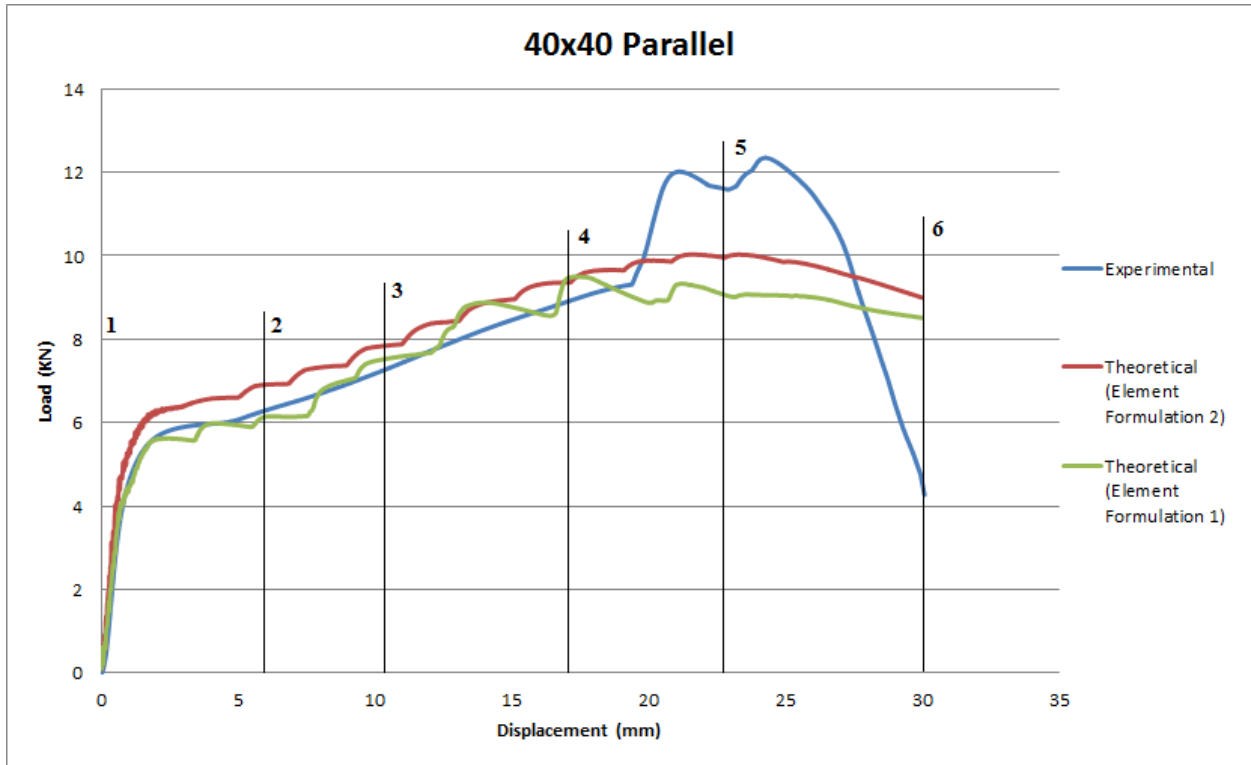
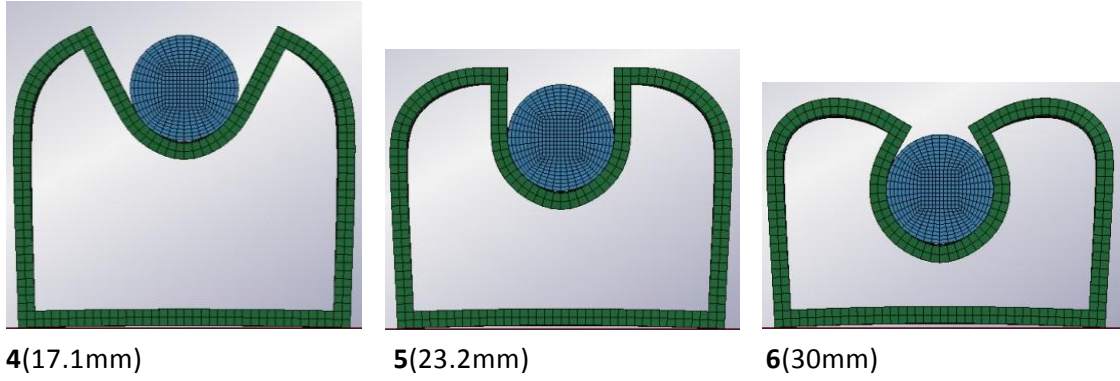
1(0mm)



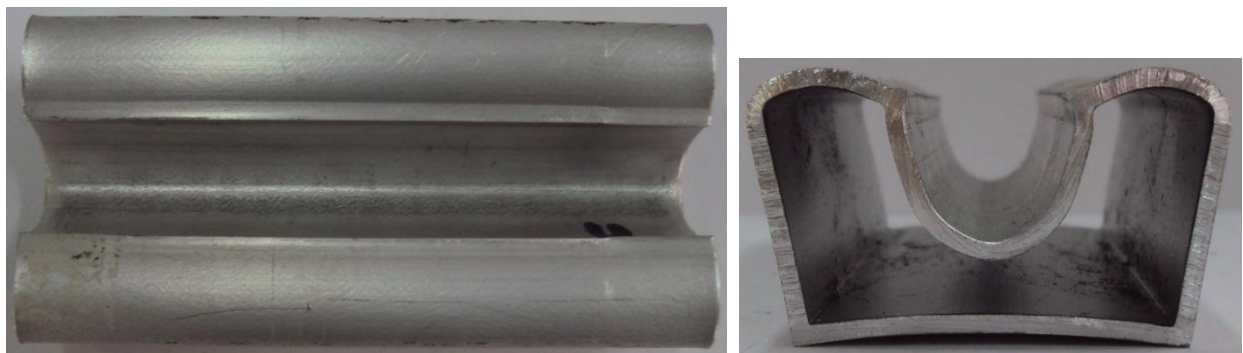
2(6.1mm)



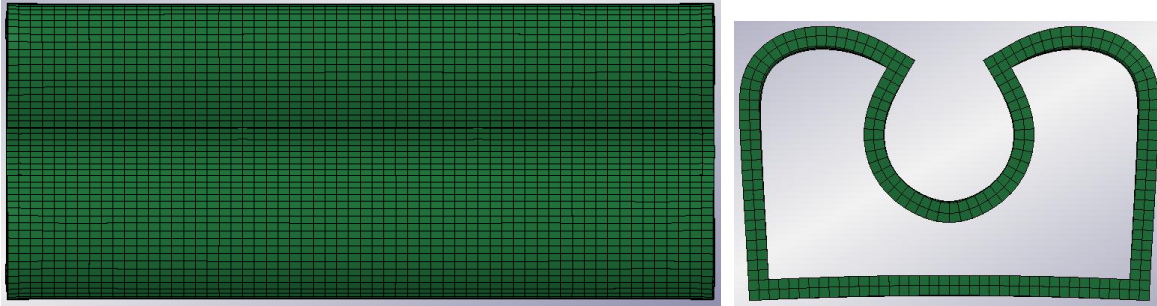
3(10.3mm)



Διάγραμμα 2.11: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για το τετραγωνικό δοκίμιο 40x40

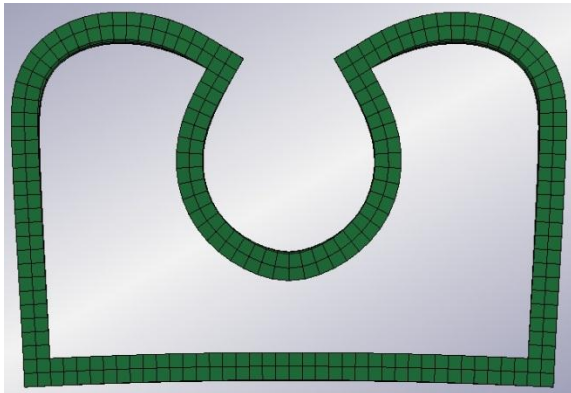


Πειραματικό δοκίμιο μετά την ολοκλήρωση της κατάρρευσης

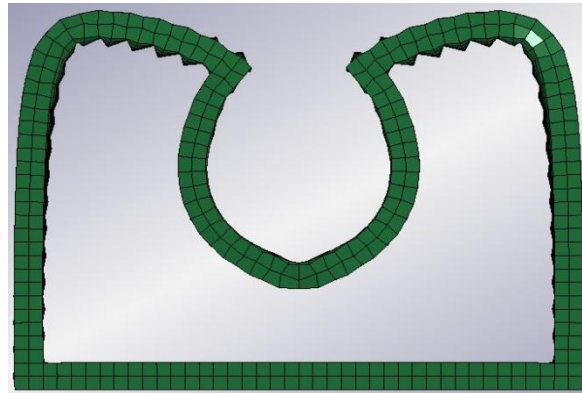


Θεωρητικό μοντέλο μετά την ολοκλήρωση της κατάρρευσης

Στα πρώτα 20mm της διείσδυσης οι τρεις καμπύλες σχεδόν συμπίπτουν. Απ' το σημείο αυτό και μετά η πειραματική καμπύλη παρουσιάζει μία απότομη αύξηση στο μετρούμενο φορτίο. Μελετώντας προσεκτικά τις φωτογραφίες που λήφθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία παρατηρούμε ότι στο σημείο αυτό αναπτύσσεται επαφή μεταξύ της βάσης του διεισδυτή και του δοκιμίου. Σε αντίθεση με την αντίστοιχη προηγούμενη περίπτωση του ορθογωνικού δοκιμίου 50x30mm, εδώ η επαφή αυτή δεν οδηγεί σε θραύση του δοκιμίου αλλά αυξάνει την επιφάνεια επαφής μεταξύ του δοκιμίου και της πρέσσας του εργαστηρίου, με αποτέλεσμα την αύξηση του μετρούμενου φορτίου. Τέλος όπως φαίνεται στην ομοιότητα των δύο θεωρητικών καμπύλων, το φαινόμενο σχηματισμού κλεψύδρων που παρατηρήθηκε ήταν μικρότερο σε σύγκριση με προηγούμενες περιπτώσεις.

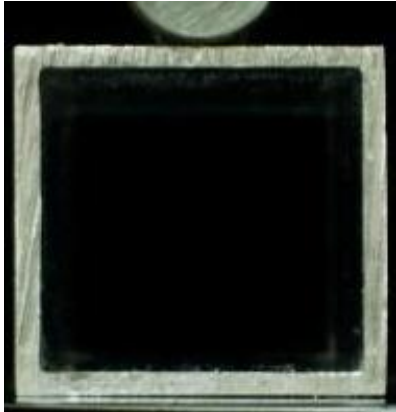


Element Formulation 2

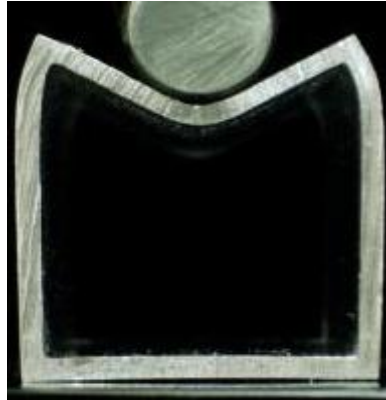


Element Formulation 1

2.2.5: Τετραγωνικό κέλυφος διαστάσεων 30x30x2



1(0mm)



2(5.9mm)



3(8.7mm)



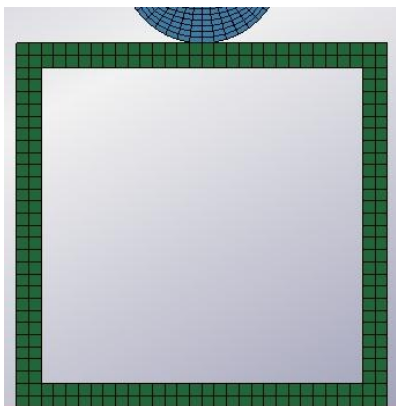
4(12.7mm)



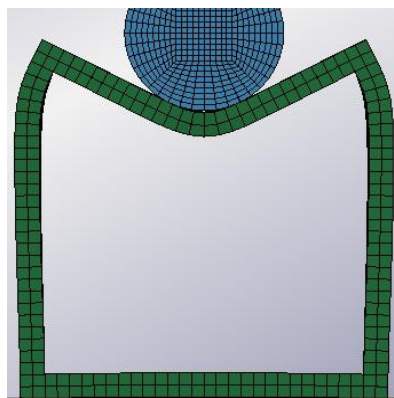
5(16.1mm)



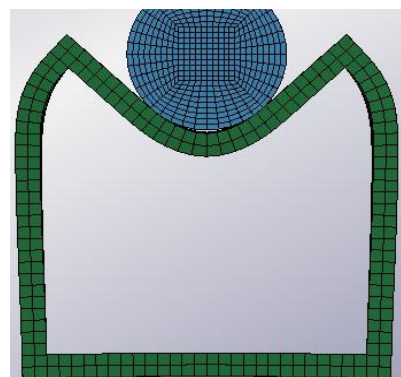
6(20mm)



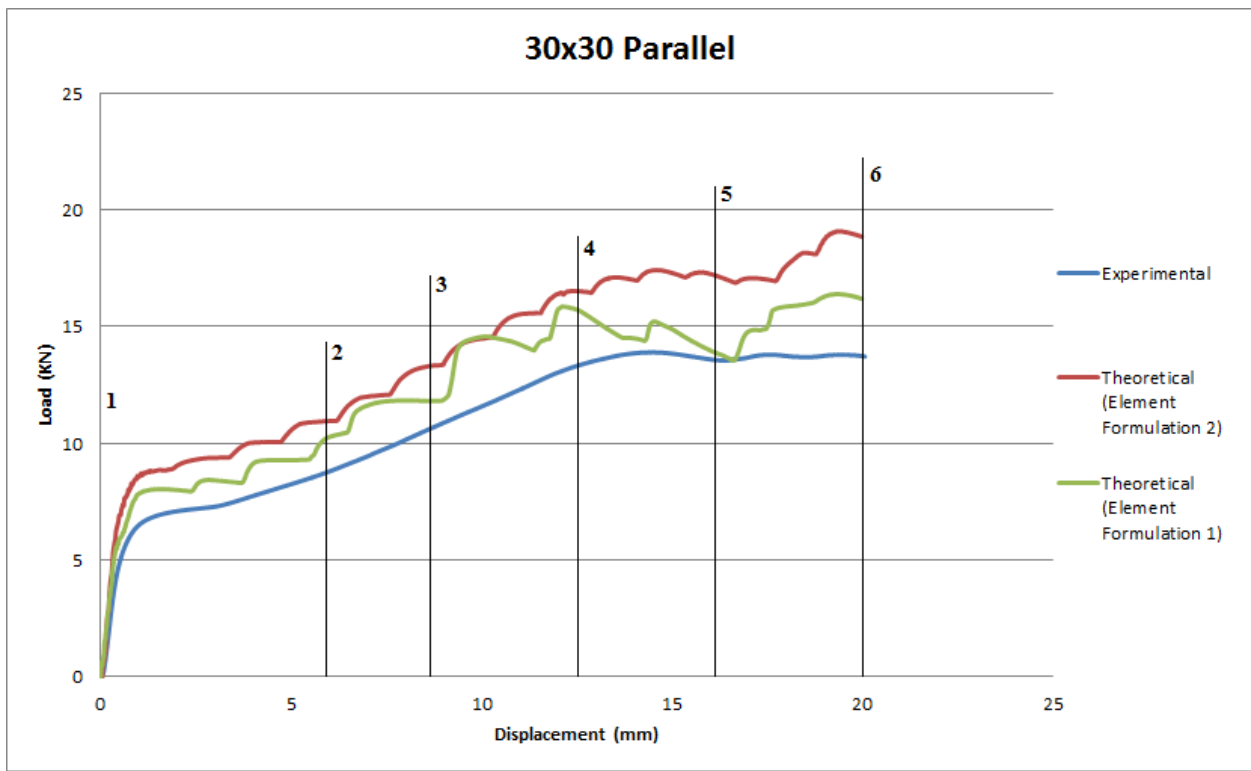
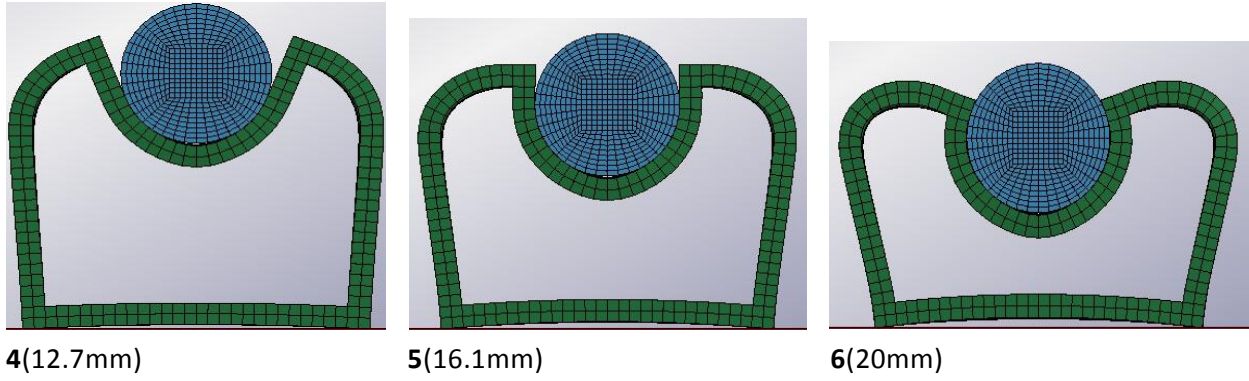
1(0mm)



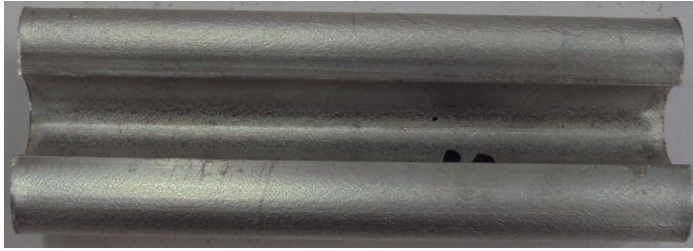
2(5.9mm)



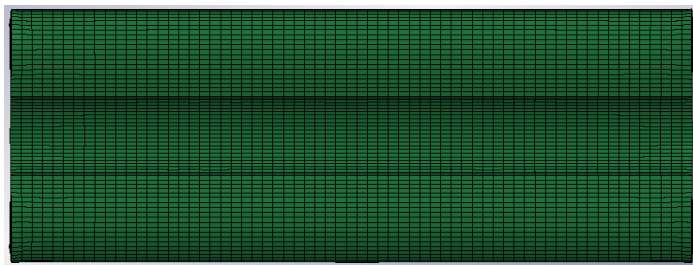
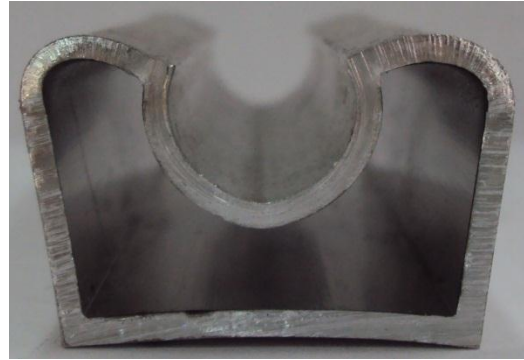
3(8.7mm)



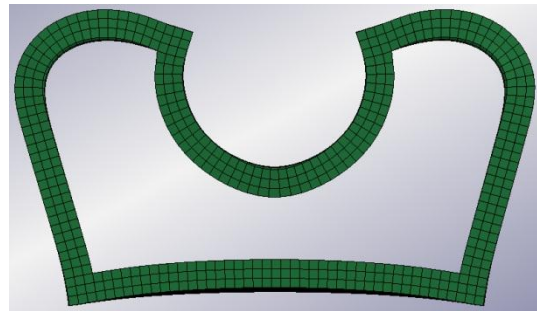
Διάγραμμα 2.12: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για το τετραγωνικό δοκίμιο 30x30



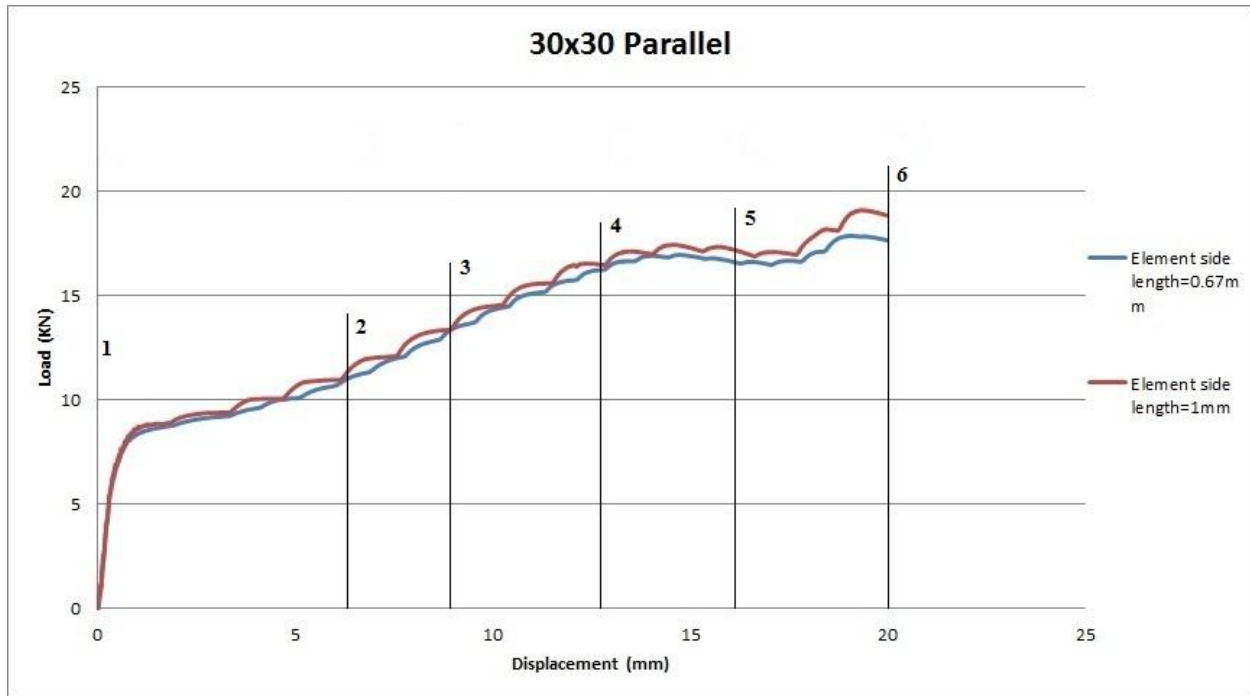
Πειραματικό δοκίμιο μετά την ολοκλήρωση της κατάρρευσης



Θεωρητικό μοντέλο μετά την ολοκλήρωση της κατάρρευσης

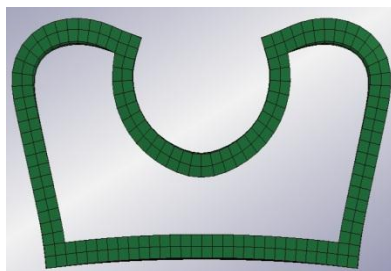


Παρατηρούμε ότι για ακόμη μια φορά υπάρχει μεγάλη ομοιότητα μεταξύ των θεωρητικών καμπύλων και της πειραματικής και επίσης ότι παρουσιάζουν αρκετά μεγαλύτερο θόρυβο (ειδικά η πράσινη) σε σχέση με τις αντίστοιχες καμπύλες των προηγούμενων κελυφών που μελετήσαμε. Θα μπορούσαμε επειδή το δοκίμιο είναι σημαντικά μικρότερο σε σχέση με τα προηγούμενα να αυξήσουμε τη διακριτοποίηση της προσομοίωσης (να μειώσουμε δηλαδή το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων) προκειμένου να υπάρχει πιο συχνή ανανέωση των επαφών μεταξύ κελύφους και διεισδυτή, με αποτέλεσμα να μειωθεί ο θόρυβος. Με μια γρήγορη ματιά στις φωτογραφίες του μοντέλου που παρουσιάστηκαν παραπάνω παρατηρούμε ότι σχεδόν σε όλη τη φάση της διεισδυσης υπάρχει κενό μεταξύ του διεισδυτή και του δοκιμίου, φαινόμενο που απέχει αρκετά από την πραγματικότητα. Βελτιώνοντας την ακρίβεια της προσομοίωσης, μειώνοντας δηλαδή το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων από $1 \times 1 \text{mm}$ σε $0.67 \times 0.67 \text{mm}$, παίρνουμε το αναμενόμενο αποτέλεσμα που φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:

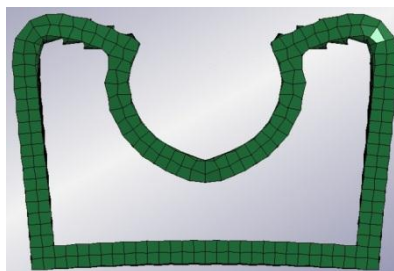


Διάγραμμα 2.13: Μελέτη της επίδρασης του μεγέθους των πεπερασμένων στοιχείων στην καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για το τετραγωνικό δοκίμιο 30x30.

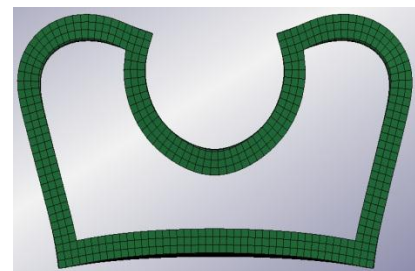
Στο σημείο αυτό αποδεικνύεται (κάτι που αναφέραμε και στο εισαγωγικό κεφάλαιο) ότι η αύξηση της πυκνότητας του πλέγματος από ένα σημείο και έπειτα επηρεάζει ελάχιστα την ποιότητα των αποτελεσμάτων αυξάνοντας έντονα τους υπολογιστικούς πόρους που απαιτούνται για την επίλυση της προσομοίωσης. Τέλος εμφανίστηκε και πάλι έντονο το φαινόμενο σχηματισμού κλεψύδρων όπως φαίνεται και στις εικόνες που ακολουθούν, στις οποίες προστίθεται επίσης και η εικόνα του τελικού δοκιμίου στην περίπτωση της αυξημένης ακρίβειας (Element side length=0.67mm) που είναι η μπλε καμπύλη στο δεύτερο διάγραμμα της ενότητας (διάγραμμα 2.13).



Element Formulation 2



Element Formulation 1



El Form 2 (Element size 0.667)

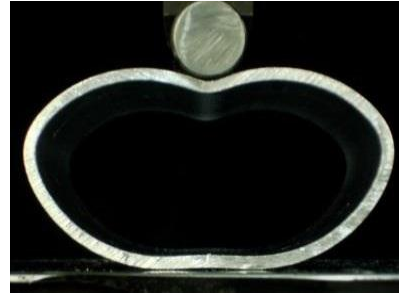
2.2.6: Κυλινδρικό κέλυφος διαστάσεων $\Phi 50 \times 2$



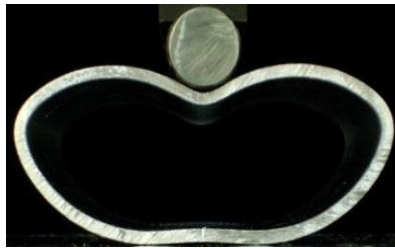
1(0mm)



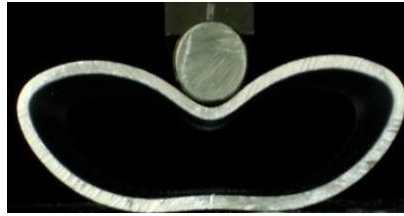
2(7.9mm)



3(19.7mm)



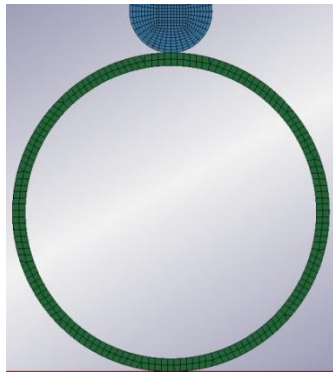
4(26.5mm)



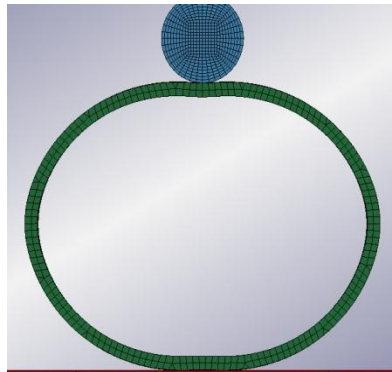
5(33.5mm)



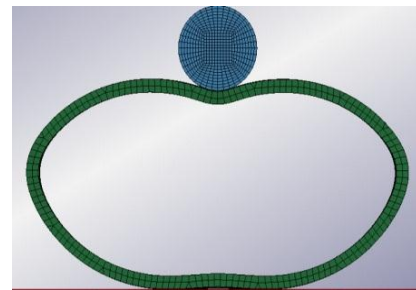
6(40mm)



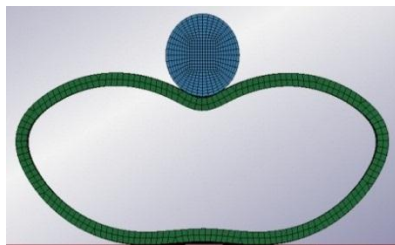
1(0mm)



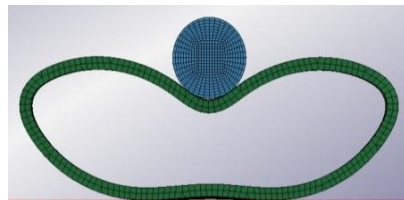
2(7.9mm)



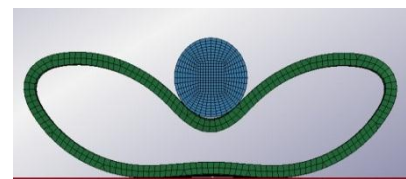
3(19.7mm)



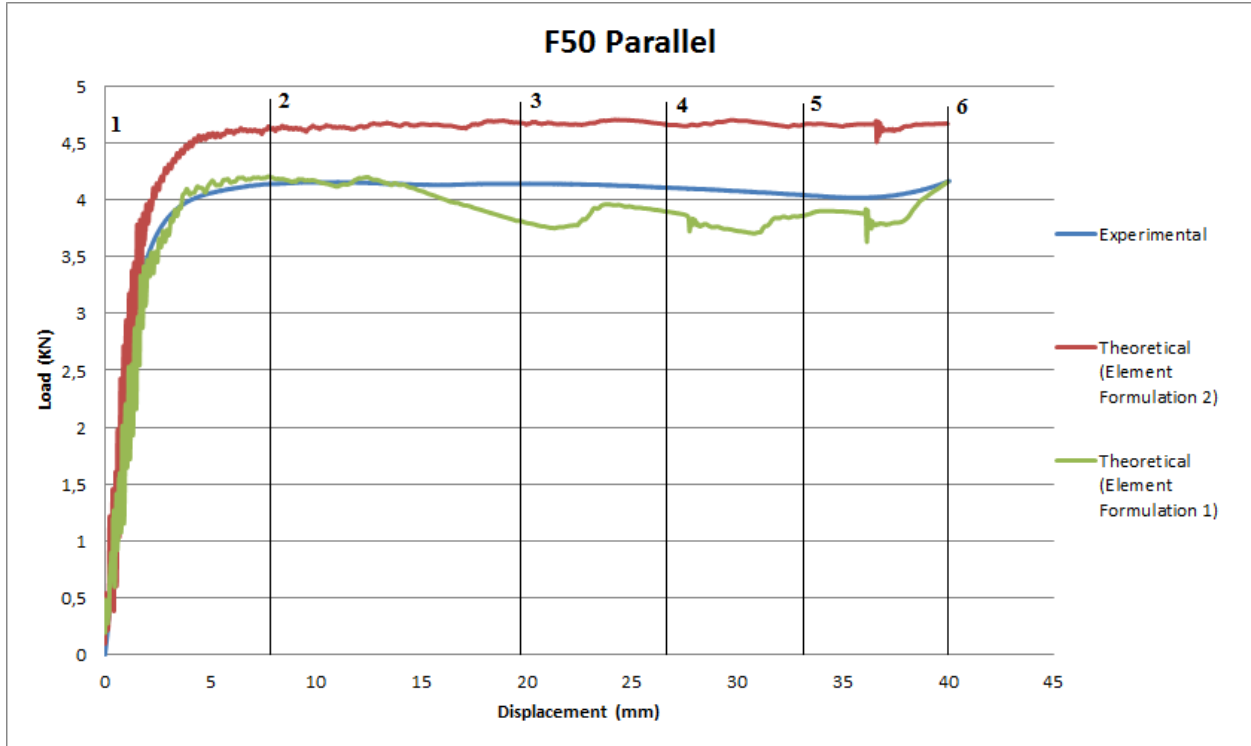
4(26.5mm)



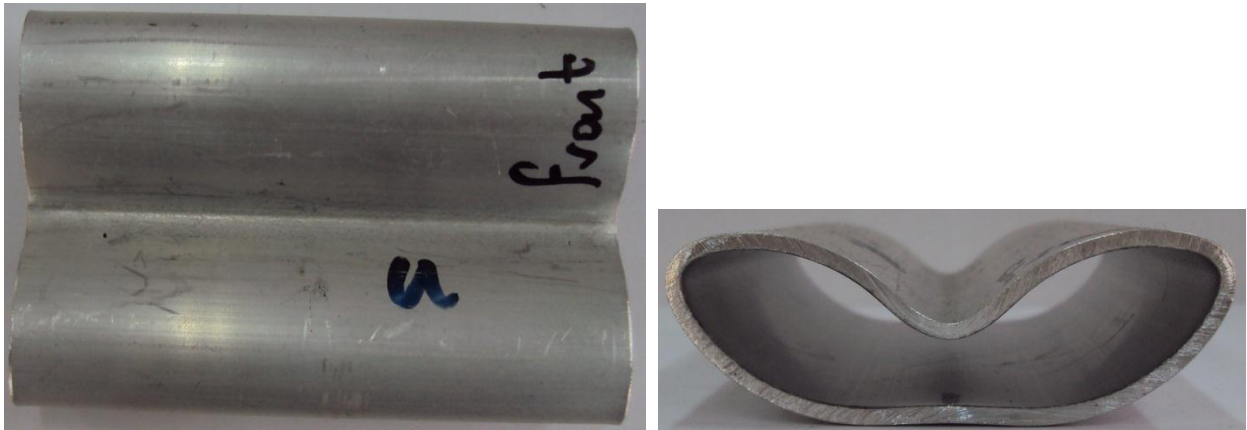
5(33.5mm)



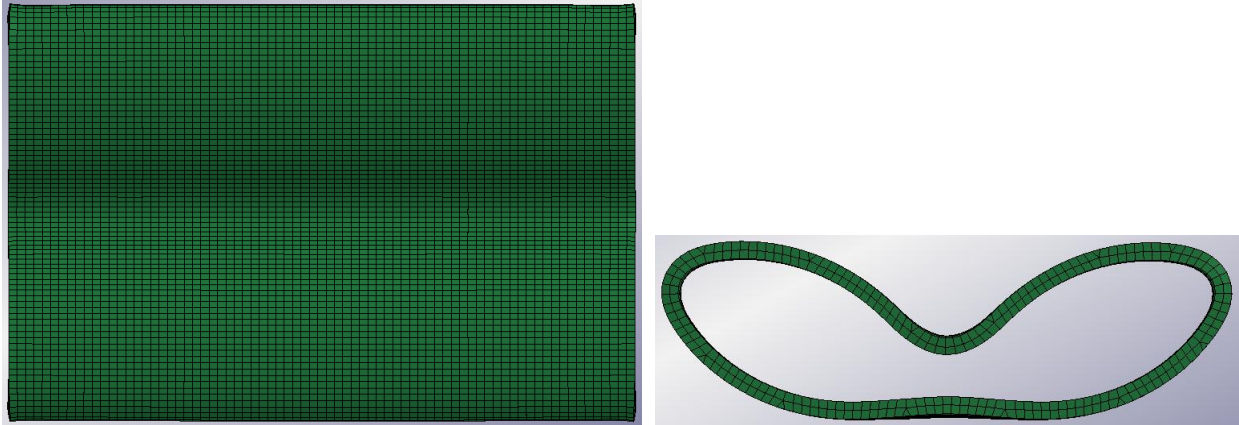
6(40mm)



Διάγραμμα 2.14: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για το κυλινδρικό δοκίμιο Φ50.

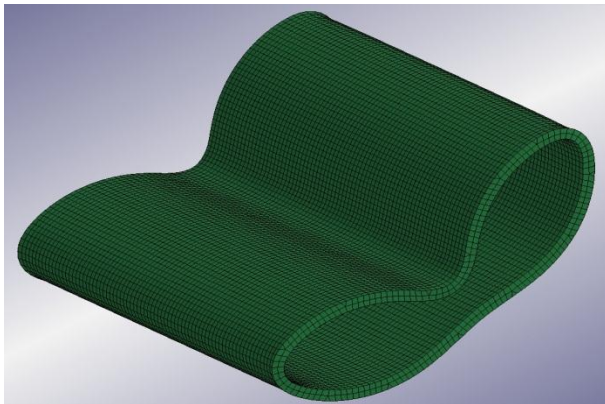


Πειραματικό δοκίμιο μετά την ολοκλήρωση της κατάρρευσης

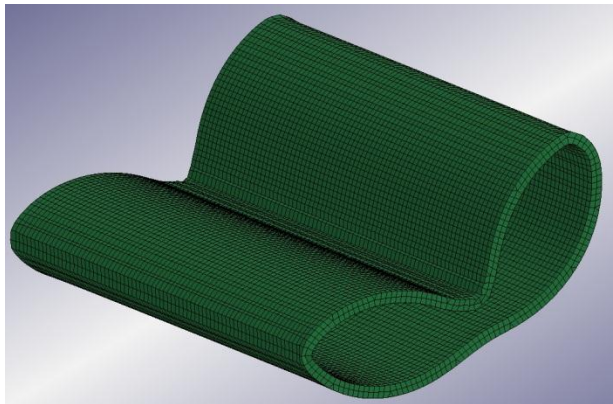


Θεωρητικό μοντέλο μετά την ολοκλήρωση της κατάρρευσης

Και η πειραματική και οι θεωρητικές καμπύλες παρουσιάζουν μια εξαιρετική ομοιογένεια. Το φορτίο 3-4mm μετά την έναρξη της κατάρρευσης καταλήγει στη τιμή των 4KN περίπου (λίγο παραπάνω στην κόκκινη καμπύλη) η οποία διατηρείται σχεδόν σταθερή μέχρι την ολοκλήρωσή της. Ο έντονος θόρυβος που υπάρχει στις θεωρητικές καμπύλες στην αρχή της διαδικασίας οφείλεται στη συνεχόμενη προσθήκη νέων επαφών κατά τη επαφή των δύο κυλινδρικών επιφανειών μεταξύ τους, ο οποίος εξαφανίζεται περίπου μετά τα 10mm όπου το κυλινδρικό δοκίμιο έχει πάρει το σχήμα του διεισδυτή, κοντά στην περιοχή της επαφής τους. Για ακόμη μία φορά η κόκκινη καμπύλη (Element Formulation 2) έχει λιγότερο θόρυβο και βρίσκεται ψηλότερα από την πράσινη (Element Formulation 1), ενώ το φαινόμενο σχηματισμού κλεψύδρων είναι περιορισμένο σε σχέση με προηγούμενες περιπτώσεις, όπως φαίνεται και στις εικόνες που ακολουθούν:



Element Formulation 2



Element Formulation 1

2.3: Συγκέντρωση αποτελεσμάτων και σχολιασμός

Ύστερα από κάθε πείραμα λαμβάνουμε από το συνεργαζόμενο με την πρέσσα λογισμικό, την αντίστοιχη καμπύλη αναπτυσσόμενου φορτίου – παραμόρφωσης που μετρήθηκε. Στη συνέχεια για ευκολία στην επεξεργασία τους, τα δεδομένα αυτά περάστηκαν στο Microsoft Excel όπου και δημιουργήσαμε πίνακα δύο στηλών με τα αντίστοιχα σημεία (βράχυνσης κελύφους, αναπτυσσόμενου φορτίου) και έπειτα την αντίστοιχη καμπύλη που όπως είδαμε παραπάνω την παραθέτουμε σε κοινό διάγραμμα με τις αντίστοιχες θεωρητικές καμπύλες. Με μία προσεκτική ματιά στην πειραματική καμπύλη ή για μεγαλύτερη ακρίβεια με μία συνάρτηση μεγίστου στην αντίστοιχη στήλη του φορτίου, λαμβάνουμε το μέγιστο για κάθε περίπτωση φορτίο που παρουσιάζεται στον πίνακα 2.1. Στη συνέχεια ολοκληρώνοντας τη συνάρτηση φορτίου-βράχυνσης κελύφους ή πιο εύκολα υπολογίζοντας το εμβαδόν που περικλείεται ανάμεσα στην αντίστοιχη καμπύλη και τον οριζόντιο άξονα υπολογίζουμε την ολική ενέργεια που απορροφήθηκε $E_{abs} = \int P dx$ η οποία καταγράφηκε στον πίνακα 2.4. Έπειτα διαιρώντας την απορροφηθείσα ενέργεια με το μήκος της βράχυνσης, λαμβάνουμε το αντίστοιχο μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο που φαίνεται στον πίνακα 2.2. Τέλος υπολογίζοντας το λόγο του μέσου (πίνακας 2.2) προς του μεγίστου (πίνακας 2.1) αναπτυσσόμενου φορτίου προκύπτει και ο συντελεστής ομοιομορφίας φορτίου που παρουσιάζεται στον πίνακα 2.3. Τα στοιχεία των παρακάτω πινάκων που αφορούν τις θεωρητικές καμπύλες προέκυψαν με τον ίδιο τρόπο μεταφέροντάς τα στο Microsoft Excel (όπου έτσι κι αλλιώς μεταφέρθηκαν για να σχεδιαστούν οι καμπύλες σε κοινό διάγραμμα με την πειραματική) ή ευκολότερα απ' ευθείας από τα εργαλεία του PlotWindow του προεπεξεργαστή LS-PrePost.

Διεύθυνση διεισδυτή	Διαστάσεις δοκιμίου	Πειραματική καμπύλη	Θεωρητική καμπύλη (fully-integrated)	Θεωρητική καμπύλη (constant stress)
Κάθετη	50x30 μεγάλη πλευρά	26.3	31.44****	26.78
	50x30 μικρή πλευρά	23.9	24.83	23.97
	50x50	25.2	31.8****	29.65****
	40x40	26.2	23.96	23.03
	30x30	24.5	25.5	25.24

	Φ50	8.1	9.02	7.83
Παράλληλη	50x30 μεγάλη πλευρά	8.3*	11.18	13.2
	50x30 μικρή πλευρά	5.5	6.65	6.16
	50x50	5.1**	6.92 (5.48)*****	6.6
	40x40	12.3***	10.03	9.5
	30x30	13.8	19.08	16.38
	Φ50	4.1	4.7	4.2

Πίνακας 2.1: Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο σε KN

Διεύθυνση διεισδυτή	Διαστάσεις δοκιμίου	Πειραματική καμπύλη	Θεωρητική καμπύλη (fully-integrated)	Θεωρητική καμπύλη (constant stress)
Κάθετη	50x30 μεγάλη πλευρά	15.3	18.35	16.34
	50x30 μικρή πλευρά	19.6	21.93	19.4
	50x50	19.4	18.39	16.43
	40x40	18.3	19	16.85
	30x30	19.3	22.34	19.79
	Φ50	5.5	5.99	5.3
Παράλληλη	50x30 μεγάλη πλευρά	6.6*	9.54	9.99
	50x30 μικρή πλευρά	4.4	5.38	4.86
	50x50	3.2**	6 (2.76)*****	5.59
	40x40	8.2***	8.38	7.77
	30x30	10.8	13.81	12.33
	Φ50	3.9	4.5	3.83

Πίνακας 2.2: Μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο σε KN

Διεύθυνση διεισδυτή	Διαστάσεις δοκιμίου	Πειραματική καμπύλη	Θεωρητική καμπύλη (fully-integrated)	Θεωρητική καμπύλη (constant stress)
---------------------	---------------------	---------------------	--------------------------------------	-------------------------------------

Κάθετη	50x30 μεγάλη πλευρά	0.58	0.58****	0.61
	50x30 μικρή πλευρά	0.82	0.88	0.81
	50x50	0.76	0.58****	0.55****
	40x40	0.69	0.79	0.73
	30x30	0.78	0.88	0.78
	Φ50	0.67	0.66	0.68
Παράλληλη	50x30 μεγάλη πλευρά	0.79*	0.85	0.76
	50x30 μικρή πλευρά	0.8	0.81	0.79
	50x50	0.62**	0.867 (0.5)*****	0.847
	40x40	0.66***	0.84	0.82
	30x30	0.78	0.72	0.75
	Φ50	0.95	0.96	0.91

Πίνακας 2.3: Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου

Διεύθυνση διεισδυτή	Διαστάσεις δοκιμίου	Πειραματική καμπύλη	Θεωρητική καμπύλη (fully-integrated)	Θεωρητική καμπύλη (constant stress)
Κάθετη	50x30 μεγάλη πλευρά	615	733.83	653.78
	50x30 μικρή πλευρά	393	438.65	387.9
	50x50	776	735.57	657.29
	40x40	549	570.1	505.47
	30x30	386	446.75	395.74
	Φ50	220	239.46	212.1
Παράλληλη	50x30 μεγάλη πλευρά	264*	381.48	399.4
	50x30 μικρή πλευρά	88	107.68	97.14
	50x50	128**	239.9 (84.31)*****	223.5
	40x40	246***	251.27	233.21

	30x30	216	276.11	246.57
	Φ50	156	180.17	153.28

Πίνακας 2.4: Απορροφηθείσα ενέργεια παραμόρφωσης σε J

* Παρατηρήθηκε επαφή της βάσης του διεισδυτή με το δοκίμιο κατά το ήμισυ περίπου της διαδικασίας.

** Υπήρξε ολική θραύση του δοκιμίου σχεδόν από την αρχή της διείσδυσης.

*** Στο τέλος της διαδικασίας υπήρξε επαφή μεταξύ της βάσης του διεισδυτή και του δοκιμίου αυξάνοντας έτσι την επιφάνεια επαφής ανάμεσα στην πρέσα και το δοκίμιο, με αποτέλεσμα να αυξηθεί αντίστοιχα και το μετρούμενο φορτίο απότομα, όπως φαίνεται και στο αντίστοιχο διάγραμμα 2.11.

**** Οι μεγάλες τιμές του μέγιστου αναπτυσσόμενου φορτίου (και κατ' επέκταση οι μικρές τιμές του δείκτη ομοιομορφίας φορτίου) οφείλονται στη συμπίεση συμπαγούς υλικού, φαινόμενο που παρατηρείται σε αρκετά μοντέλα στο τέλος της διαδικασίας κατάρρευσης. Απ' την άλλη μεριά η απότομη αύξηση αυτή του φορτίου παρατηρείται σε μικρό μέρος της διείσδυσης, επομένως δεν επηρεάζει σημαντικά τις τιμές της απορροφηθείσας ενέργειας και του μέσου αναπτυσσόμενου φορτίου.

***** Οι τιμές που βρίσκονται μέσα στις παρενθέσεις αντιστοιχούν σε προσομοίωση που περιλάμβανε το ενδεχόμενο θραύσης συμπληρώνοντας έναν κατάλληλο συντελεστή (fail factor) στην αντίστοιχη καρτέλα του υλικού του δοκιμίου. Στην παρούσα περίπτωση ο συντελεστής θραύσης εκτιμήθηκε περίπου στο 0,163.

Από όλα τα στοιχεία (εικόνες, διαγράμματα, πίνακες, κτλ) που παρουσιάστηκαν παρακάτω προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιεί το LS-DYNA οδηγεί σε πολύ αξιόπιστες προσομοιώσεις πάνω στο αντικείμενο με το οποίο ασχολείται η παρούσα διπλωματική εργασία, δηλαδή την πλευρική κατάρρευση κελυφών.
- Στην πρώτη και βασικότερη αρχιτεκτονική επίλυσης της μοντελοποίησης που χρησιμοποιήθηκε στο δοκίμιο η διάταξη των πεπερασμένων στοιχείων σ' αυτό έγινε σύμφωνα με την αρχιτεκτονική fully-intergrated solid element formulation ή element formulation 2, όπως αυτή υπάρχει στις βιβλιοθήκες του LS-DYNA. Η μέθοδος αυτή έδωσε τέλεια ποιοτικά αποτελέσματα, αλλά ποσοτικά λίγο μεγαλύτερα απ' ότι στην πραγματικότητα καθώς για την αποφυγή φαινομένου hourglass, ο κώδικας εμπόδισε το σχηματισμό κάθε είδους μηχανισμού ανάμεσα

στα πεπερασμένα στοιχεία του κελύφους κάνοντάς το πιο στιβαρό απ' ότι είναι στην πραγματικότητα.

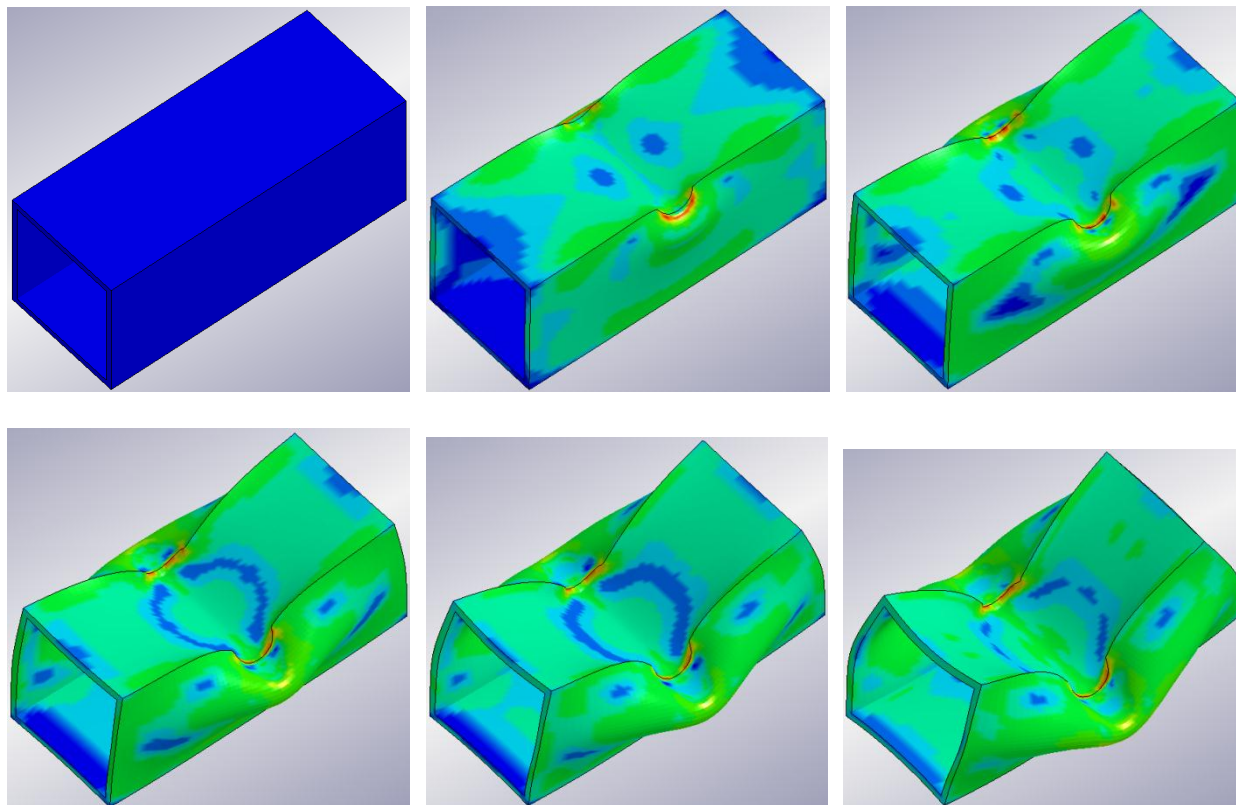
- Η δεύτερη μέθοδος στηρίχθηκε στην αρχιτεκτονική constant stress solid element formulation ή element formulation 1 που είναι και η προεπιλογή του LS-DYNA. Σε όλα τα κελύφη που μοντελοποιήθηκαν μ' αυτή την αρχιτεκτονική (ιδιαίτερα στα ορθογωνικά και τετραγωνικά και λιγότερο στα κυλινδρικά) εμφανίστηκε έντονο φαινόμενο σχηματισμού κλεψύδρων που διαδίδεται προοδευτικά σε όλη την έκταση του δοκιμίου οδηγώντας σε “αφύσικη” παραμόρφωσή του. Μολονότι το φαινόμενο αυτό ήταν ιδιαίτερα έντονο τα αποτελέσματα που λάβαμε απ' αυτή τη μέθοδο μοντελοποίησης μπορεί να περιείχαν αισθητά μεγαλύτερο θόρυβο, αλλά ήταν ποσοτικά κατά κανόνα πιο κοντά στα πειραματικά.
- Για τους δύο παραπάνω λόγους επιλέξαμε να αναπτύξουμε για κάθε κέλυφος δύο μοντέλα από ένα για κάθε μία από τις παραπάνω τεχνικές μοντελοποίησης. Η πιο αξιόπιστη είναι η πρώτη (fully-integrated) αλλά σε περίπτωση που τα αποτελέσματα που δίνει μοιάζουν με αυτά της δεύτερης τεχνικής (constant stress), τότε θα ήταν προτιμότερο να λάβουμε υπ' όψη και αυτά. Σε κάθε περίπτωση μιλάμε για μικρές διαφορές που στις περισσότερες εφαρμογές δεν αξιολογούνται καν.
- Σε ότι έχει να κάνει με την κατεύθυνση της πλευρικής φόρτισης είναι προφανές ότι η διείσδυση με διεισδυτή και κέλυφος παράλληλα μεταξύ τους οδηγεί σε σαφώς μικρότερη απορροφητική ικανότητα σε σχέση με την περίπτωση όπου διεισδυτής και κέλυφος σχηματίζουν γωνία 90° . Παράλληλα σε μια τέτοιου είδους εφαρμογή στα πλαίσια του crashworthiness είναι σχεδόν αδύνατο να επιβάλουμε το διεισδυτή και το πλευρικά φορτιζόμενο σωλήνα να είναι παράλληλοι και ευθυγραμμισμένοι, όπως στο πείραμα, για όλες τις περιπτώσεις σύγκρουσης. Με άλλα λόγια είναι μαθηματικά βέβαιο ότι η διείσδυση θα γίνεται σίγουρα με μια περιεχόμενη γωνία διαφορετική του μηδενός. Η εύρεση της ιδανικής γωνίας που οδηγεί σε βέλτιστα αποτελέσματα είναι αντικείμενο που εξετάζεται ενδελεχώς στο επόμενο κεφάλαιο της εργασίας.
- Η αύξηση της πυκνότητας του πλέγματος από ένα σημείο και μετά δεν οδηγεί σε βελτίωση των αποτελεσμάτων παρά μόνο σε μικρή βελτίωση του θορύβου αυτών και αναπόφευκτα σε μεγάλη αύξηση του χρόνου που απαιτείται για την επίλυση του μοντέλου. Από δοκιμές που έγιναν μέχρι να καταλήξουμε στα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν συμπεράναμε ότι για πεπερασμένα στοιχεία με πλευρά ίση με 1mm η ακρίβεια των αποτελεσμάτων που παίρνουμε είναι πολύ ικανοποιητική.

- Η χρήση τετραγωνικών και ορθογωνικών κελυφών σαφώς προτιμάται σε σχέση με τα κυλινδρικά. Στα κυλινδρικά δεν υπάρχουν περιοχές με υψηλή συγκέντρωση τάσεων (όπως οι γωνίες στα υπόλοιπα) με αποτέλεσμα να κατερρέουν πολύ πιο προοδευτικά μεν αλλά και πολύ ευκολότερα δε απ' τα τετραγωνικά και ορθογωνικά. Με δεδομένο ότι με την τεχνική της διέλασης και τα δύο κατασκευάζονται εξίσου εύκολα οδηγούμαστε μοιραία (από οικονομική και όχι μηχανολογική σκοπιά) σε αποφυγή χρήσης κυλινδρικών κελυφών.
- Στην περίπτωση της θεωρητικής κατάρρευσης κελυφών παρατηρούμε το σχηματισμό πιο μεγάλων σε έκταση πλαστικών αρμών σε σχέση με την πειραματική, γεγονός που οδηγεί σε τελικά δοκίμια με μεγαλύτερο πλάτος (όπως φαίνεται στις αντίστοιχες εικόνες των δοκιμών μετά την ολοκλήρωση της κατάρρευσής τους που παρουσιάστηκαν προηγουμένως).
- Ένα μέρος των διαφορών που εντοπίζουμε μεταξύ της πειραματικής και των δύο θεωρητικών καμπύλων μπορεί να οφείλεται σε σφάλματα κατά την πειραματική διαδικασία. Αναλυτικότερα το μήκος των δοκιμών δεν είναι σίγουρα ακριβώς 100mm διότι κατά τη διαδικασία κοπής τους η μέτρησή του έγινε με σχετικά μικρή ακρίβεια. Επίσης το ύψος, το πλάτος και το πάχος των κελυφών που χρησιμοποιήθηκαν ενδέχεται να διαφέρει ελάχιστα από το θεωρητικό, καθώς η εξακρίβωσή του έγινε με ένα απλό παχύμετρο και όχι με κάποιο εξειδικευμένο όργανο υψηλής ακρίβειας. Ακόμα είναι πιθανό στις γωνίες των ορθογωνικών και τετραγωνικών κελυφών να υπάρχει κάποια ακτίνα καμπυλότητας που συνεπάγεται τοπική αύξηση του υλικού άρα και της στιβαρότητας. Τέλος η τοποθέτηση του διεισδυτή, η ευθυγράμμιση των δοκιμών και γενικότερα η γεωμετρία του πειράματος ενδέχεται να διαφέρει λίγο από την ιδανική που υπάρχει στις προσομοιώσεις.
- Ο τρόπος θεωρητικής φόρτισης και κατάρρευσης των κελυφών που μελετήθηκαν φαίνεται στη συνέχεια με τη βοήθεια της γραφικής απεικόνισης της συνολικής κατά Von Mises τάσης και της πλαστικής παραμόρφωσης πάνω στο κέλυφος με τη βοήθεια χρωματικής κλίμακας (που σκόπιμα για να μη βλάψουμε τη γενικότητα του σχολίου δεν παρουσιάζεται). Οι εικόνες που ακολουθούν αφορούν στο τετραγωνικό δοκίμιο 40x40 (επιλέξαμε μόνο αυτό για λόγους συντομίας, διότι όλα τα ορθογωνικά και τετραγωνικά κελύφη παρουσιάζουν όμοιο τρόπο ανάπτυξης τάσεων και κατάρρευσης) και στο κυλινδρικό Φ50, για κάθετη και παράλληλη διεύθυνση φόρτισης αντίστοιχα (οι έξι προοδευτικές εικόνες που παραθέτονται σε όλες τις

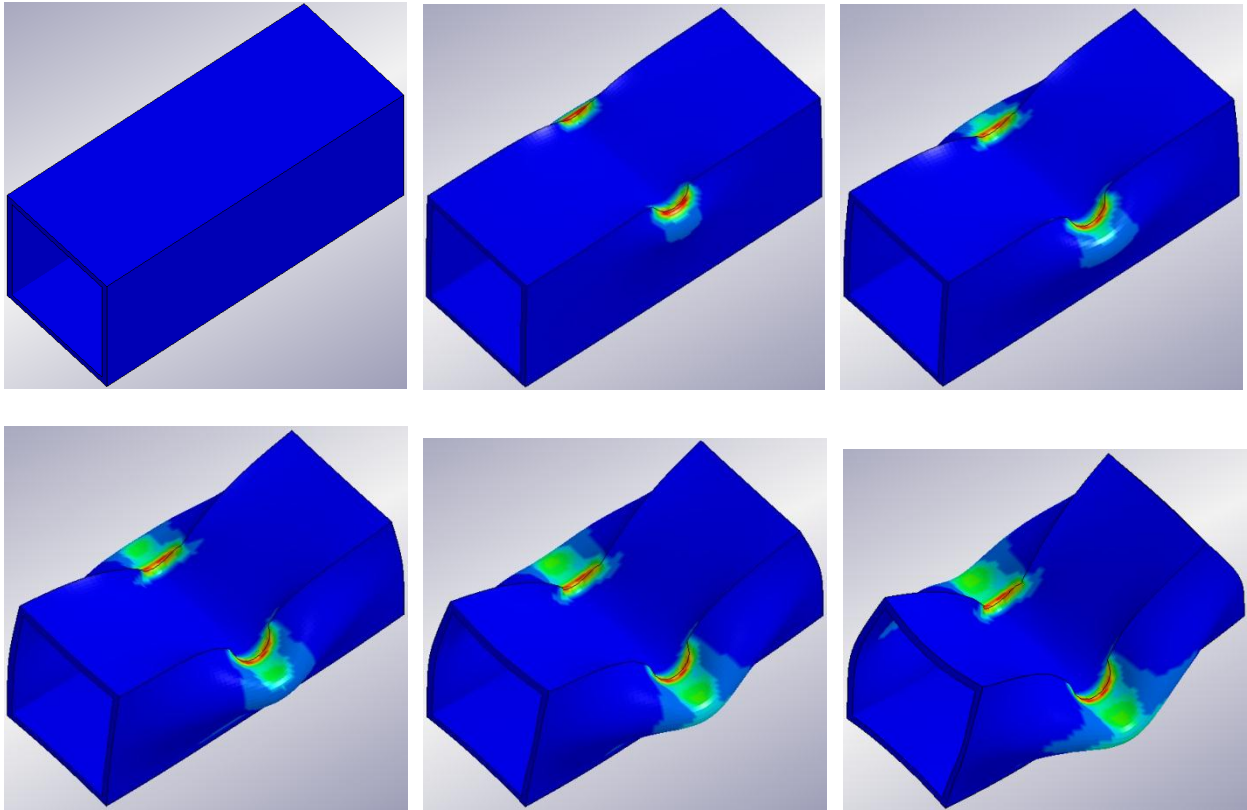
περιπτώσεις αντιστοιχούν σε σταθερό χρονικό βήμα ίσο με το $\frac{1}{6-1} = \frac{1}{5}$ του συνολικού χρόνου κατάρρευσης).

Τετραγωνικό 40x40 με κάθετη διεύθυνση φόρτισης

Von Mises stress

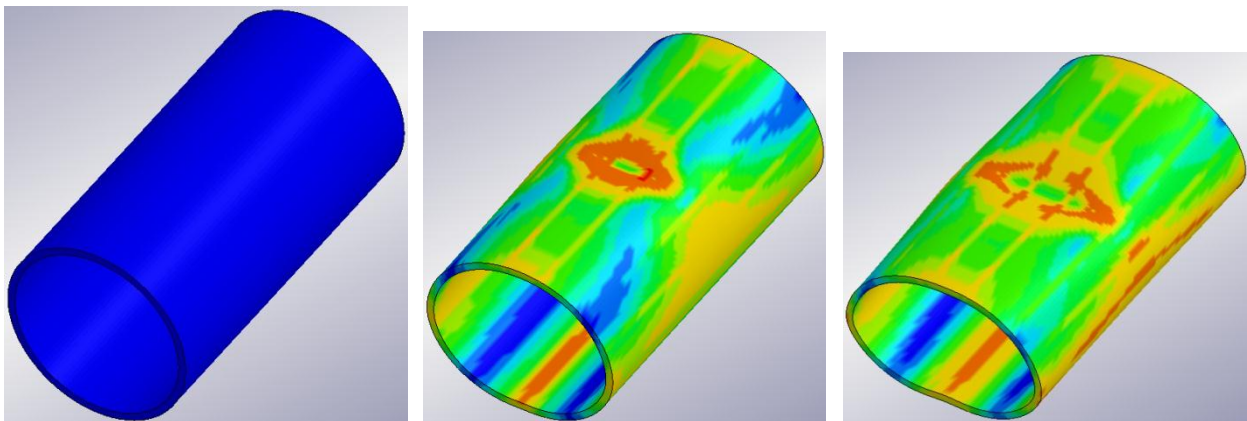


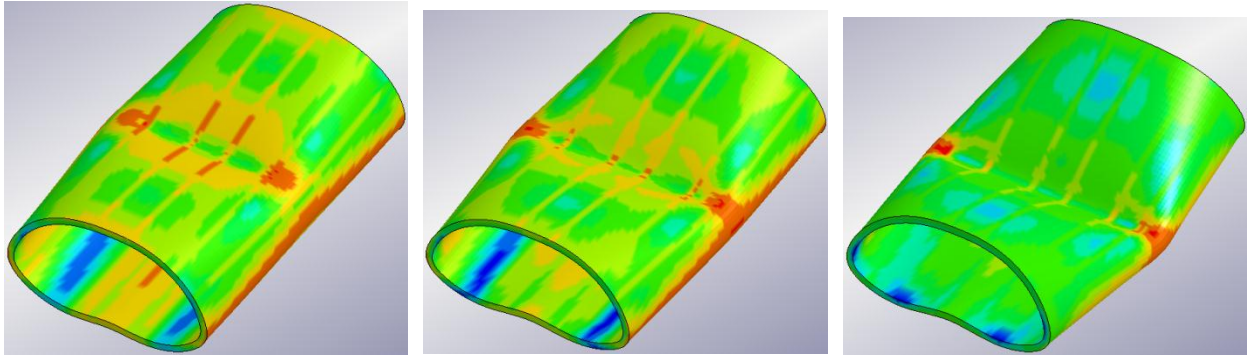
Plastic strain



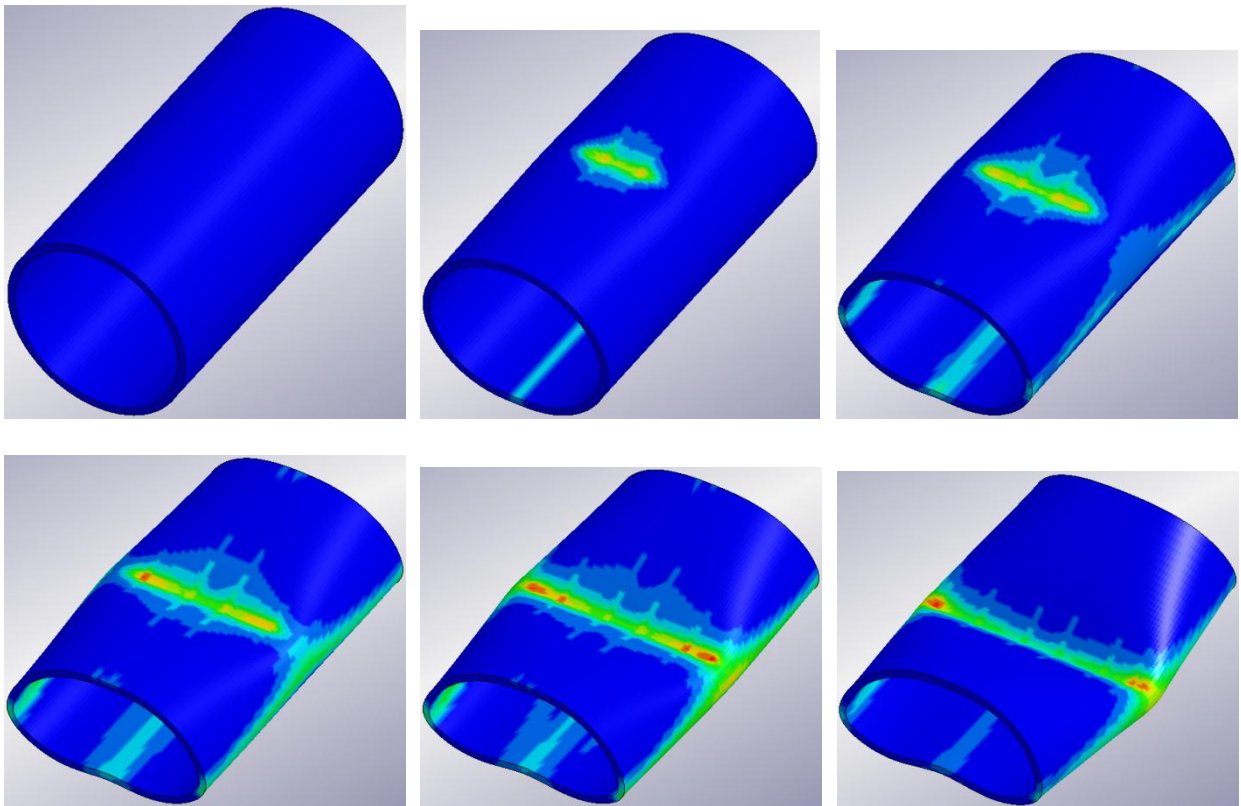
Κυλινδρικό Φ50 με κάθετη διεύθυνση φόρτισης

Von Mises stress



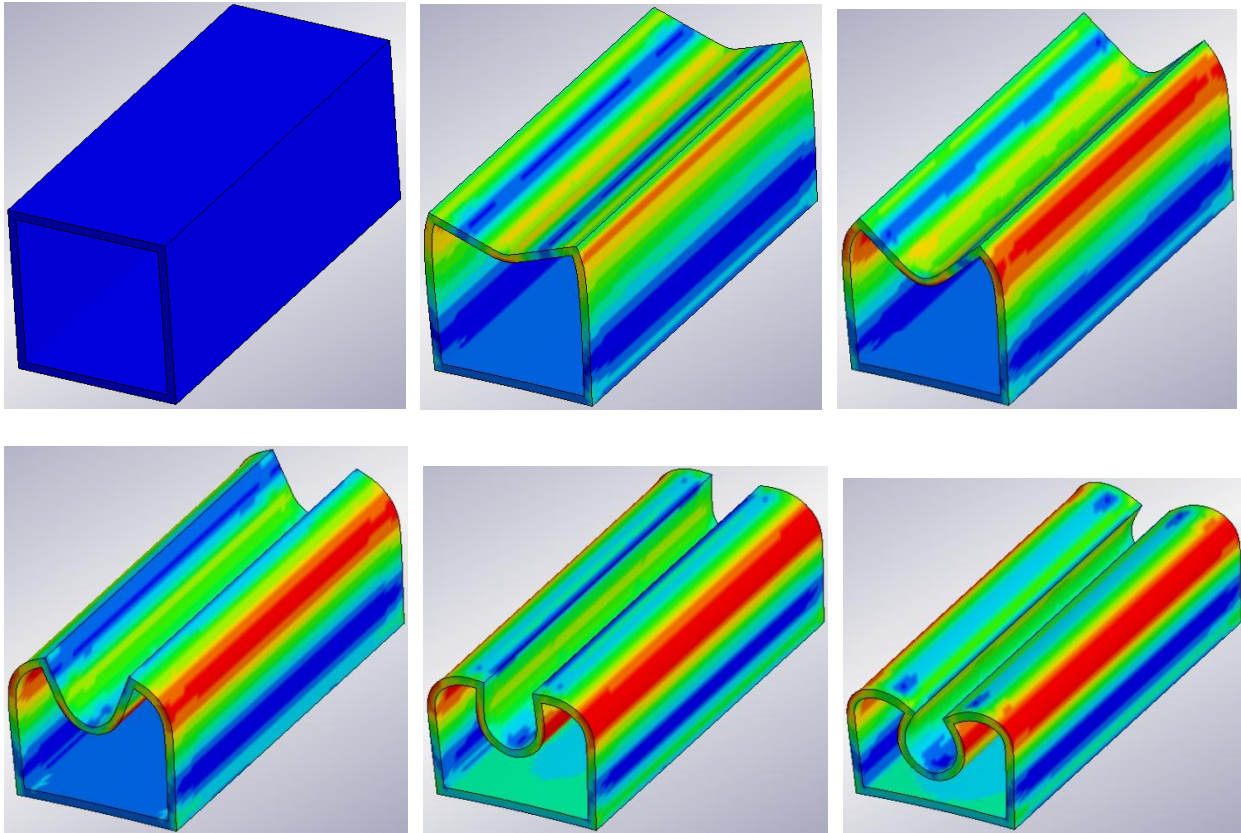


Plastic strain

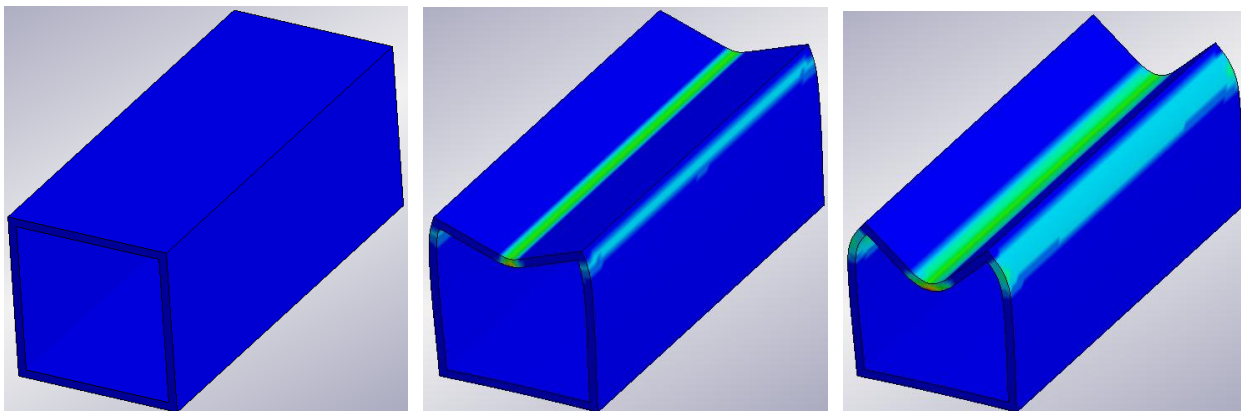


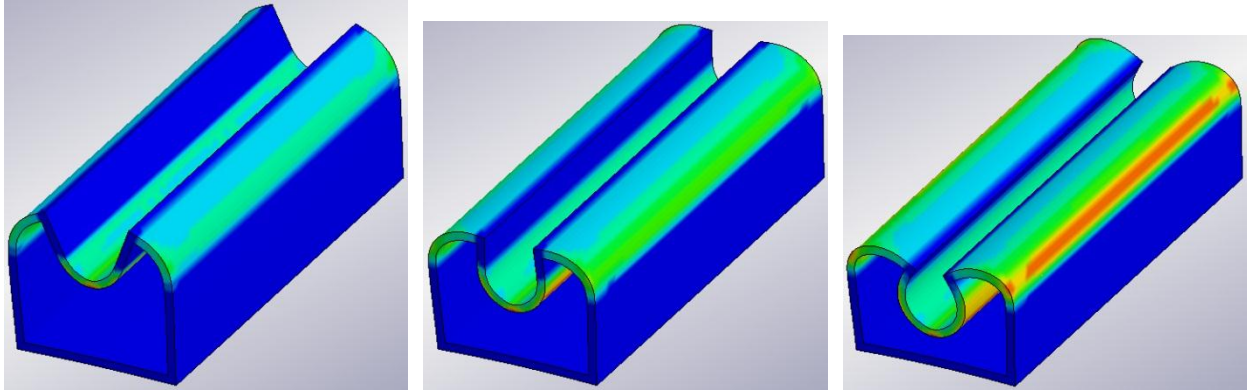
Τετραγωνικό 40x40 με παράλληλη διεύθυνση φόρτισης

Von Mises stress



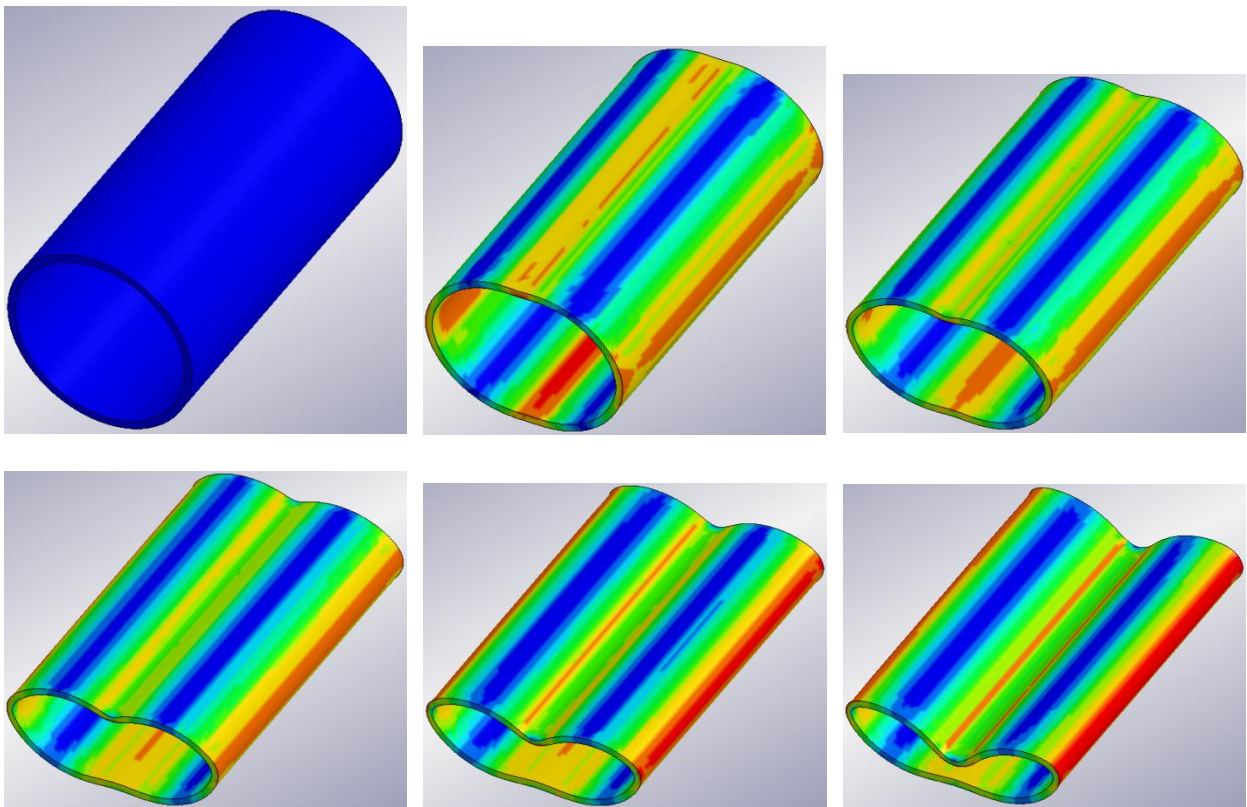
Plastic strain



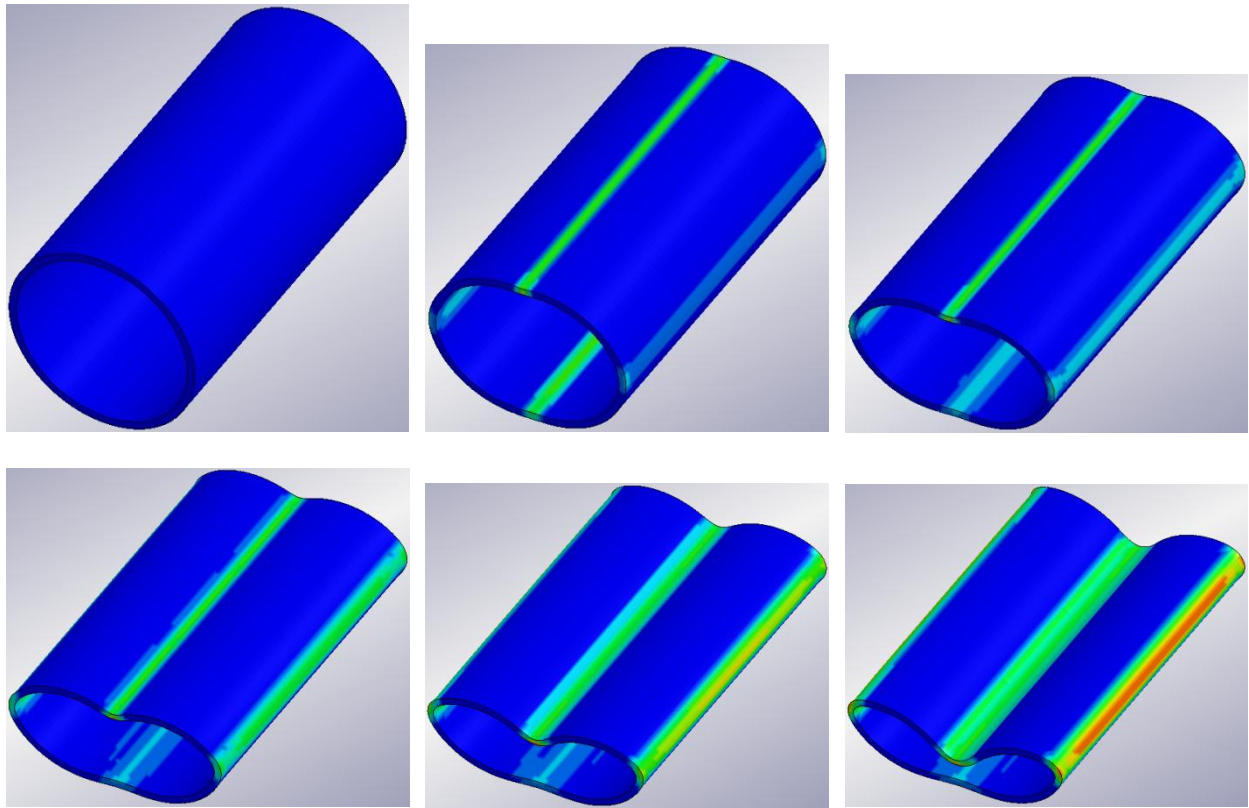


Κυλινδρικό $\Phi 50$ με παράλληλη διεύθυνση φόρτισης

Von Mises stress

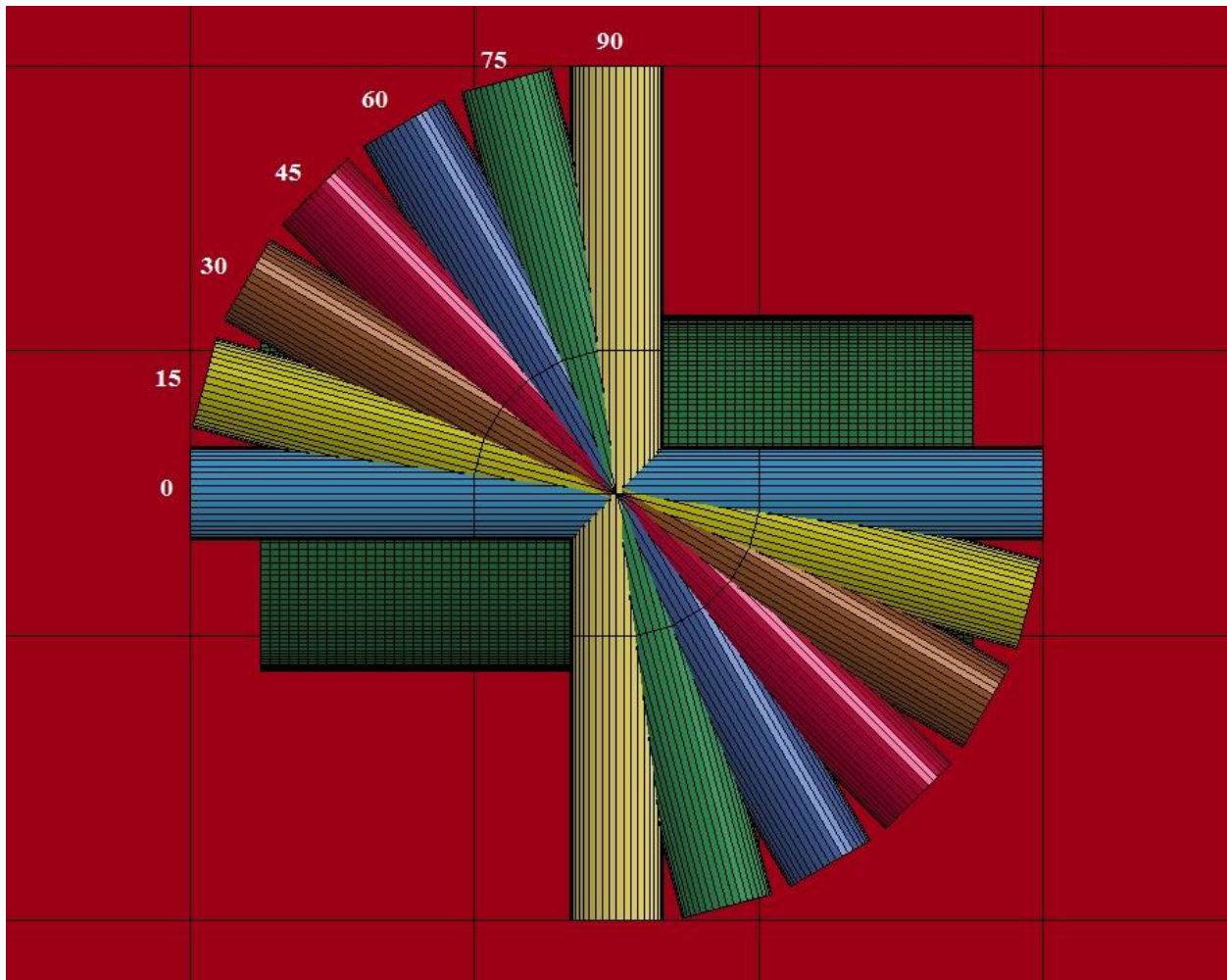


Plastic strain



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΔΙΕΙΣΔΥΤΗ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΣΤΟΝ ΤΡΟΠΟ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας και στα έξι δοκίμια που μελετήθηκαν, η γωνία που σχημάτιζε ο άξονας του διεισδυτή με το κέλυφος ήταν 0° και 90° , δηλαδή ο διεισδυτής και το κέλυφος ήταν παράλληλα ή κάθετα. Αμέσως φάνηκε και απ' τα πειράματα και απ' τη μοντελοποίηση ότι σε όλα τα δοκίμια η κάθετη γραμμική φόρτισή τους επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα ως προς την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του κελύφους, σε σχέση με την παράλληλη. Στην παρούσα ενότητα μελετάται πιο διεξοδικά ο τρόπος επίδρασης της παραπάνω γωνίας στον τρόπο πλευρικής κατάρρευσης των κελυφών με σκοπό να οδηγηθούμε σε μία βέλτιστη λύση. Για το λόγο αυτό στα θεωρητικά μοντέλα που παρουσιάστηκαν ήδη στο πρώτο μέρος της εργασίας προστέθηκαν επιπλέον μοντέλα κατάρρευσης που αντιστοιχούν σε διεισδύσεις με ενδιάμεσες γωνίες και βήμα 15° , και πιο συγκεκριμένα με γωνίες 15° , 30° , 45° , 60° και 75° , όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



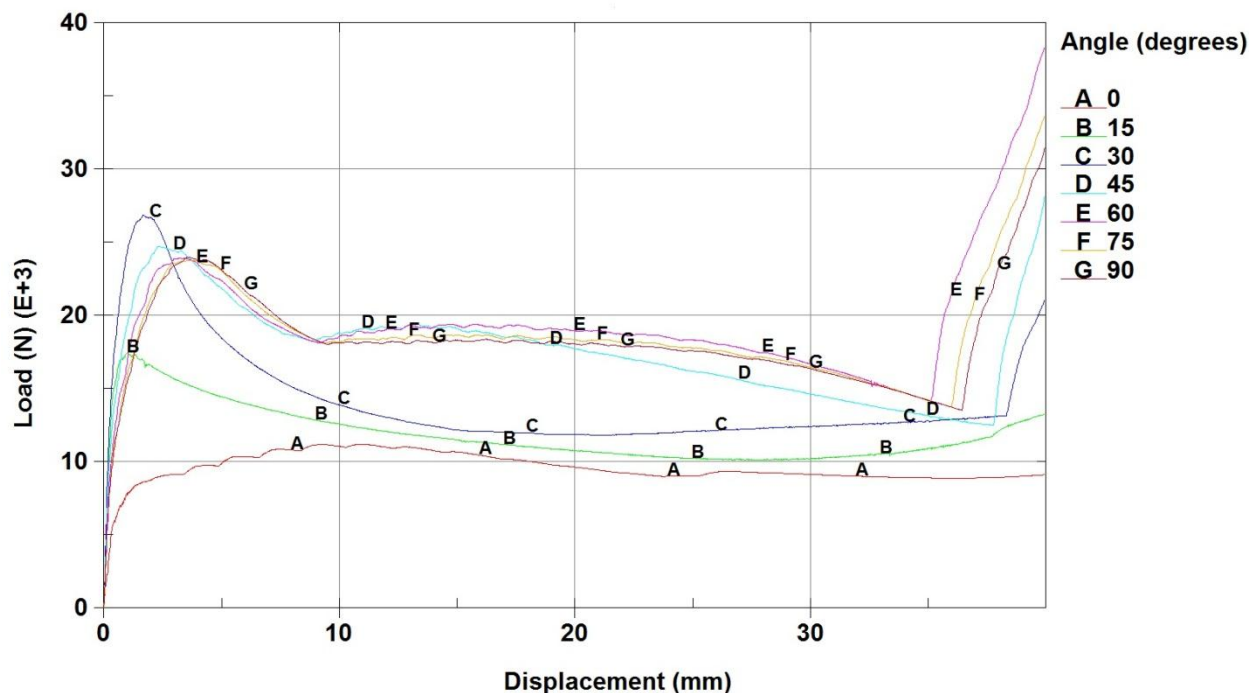
Εικόνα 3.1: Εικόνα από το περιβάλλον του προεπεξεργαστή του LS-DYNA LS-PrePost, που παρουσιάζει σχηματικά τον τρόπο μεταβολής της γωνίας μεταξύ διεισδυτή και κελύφους, τα αποτελέσματα της οποίας μελετώνται στο παρόν κεφάλαιο.

Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε περίπτωση είναι διαφορετικό και εξαρτάται απ' την προαναφερθείσα γωνία, με σκοπό σε κάθε περίπτωση να υπάρχει η απαιτούμενη ακρίβεια στην περιοχή της διείσδυσης χωρίς βέβαια να “βαραίνουμε” τον κώδικα με περιττά πεπερασμένα στοιχεία που δεν επηρεάζουν σημαντικά τους υπολογισμούς. Επίσης σε ορισμένα μοντέλα αυξήθηκε το μήκος του διεισδυτή στα 120mm διότι το αρχικό μήκος του των 100mm σε ορισμένες περιπτώσεις με διείσδυση υπό γωνία 15° ή 30° , δεν έφτανε για να καλύψει όλη την επιφάνεια επαφής του με το κέλυφος. Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης φαίνονται στη συνέχεια, ενώ στο τέλος του κεφαλαίου υπάρχουν και τέσσερα επιπλέον πειράματα κατάρρευσης πάνω σε κάποια τυχαία μοντέλα από αυτά που αναπτύχθηκαν, προκειμένου να αξιολογήσουμε ξανά την (αναμενόμενη με βάση το προηγούμενο κεφάλαιο) αξιοπιστία του κώδικα και στην περίπτωση διείσδυσης με

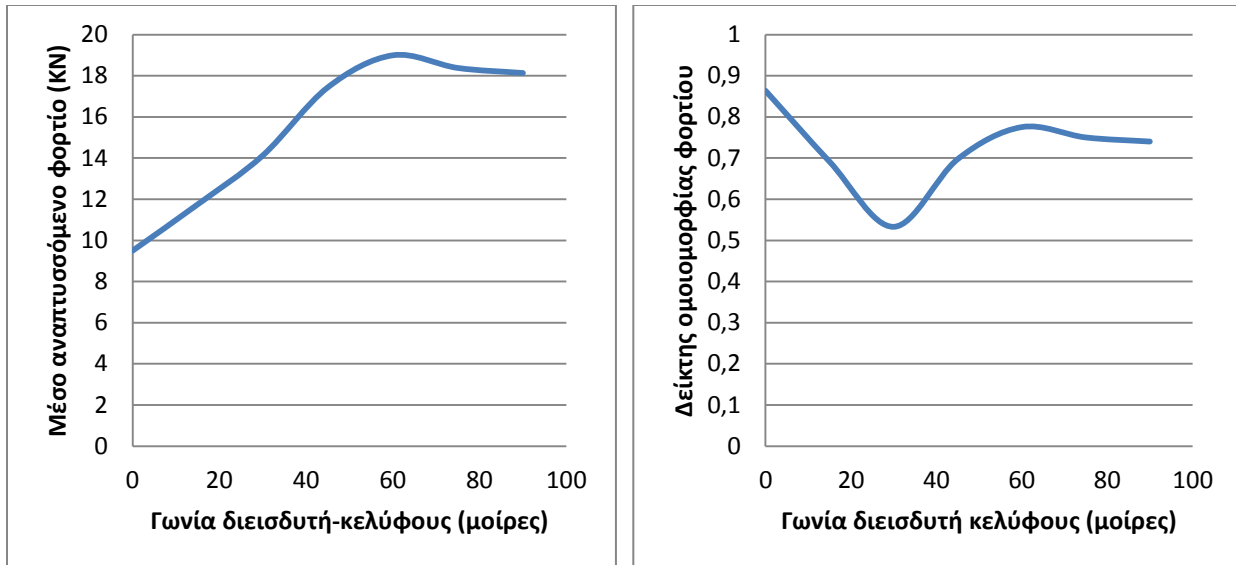
ενδιάμεσες γωνίες. Φυσικά δεν ήταν δυνατό να εκτελέσουμε πειράματα για όλα τα δοκίμια και για όλες τις παραπάνω γωνίες. Απ' την άλλη μεριά το δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας μας απέδειξε ότι ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA λειτουργεί σωστά στις περιπτώσεις πλευρικής γραμμικής φόρτισης μεταλλικών κελύφων, επομένως στο κεφάλαιο αυτό όπου ο τρόπος κατάρρευσης των κελυφών είναι όμοιος με το προηγούμενο μπορούμε εξ' αρχής αν τον εμπιστευτούμε.

3.1: Μοντελοποίηση με τη διαμόρφωση fully-integrated solid element formulation.

3.1.1: Ορθογωνικό κέλυφος διαστάσεων 50x30x2 κατά μήκος της μεγάλης πλευράς



Διάγραμμα 3.1: Επίδραση της γωνίας μεταξύ κελύφους και διεισδυτή στον τρόπο κατάρρευσης του ορθογωνικού κελύφους 50x30, με διείδυση κατά μήκος της μεγάλης πλευράς.

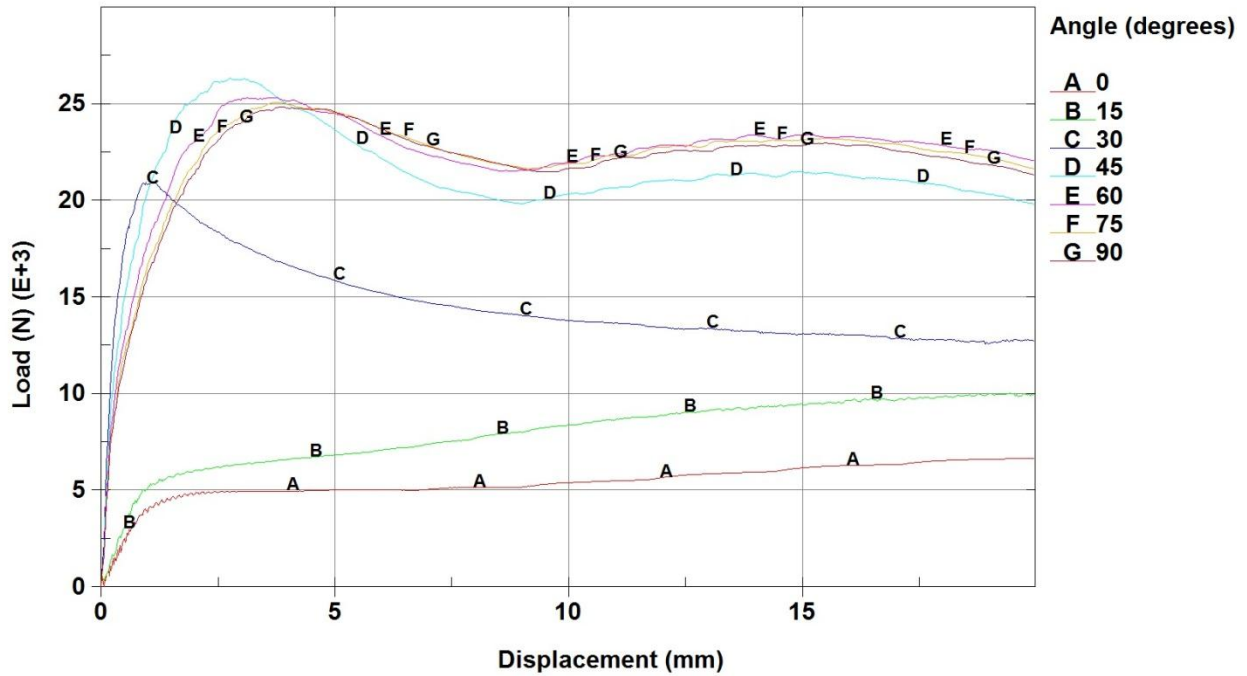


Διαγράμματα 3.2 & 3.3: Επίδραση της γωνίας διεισδυτή κελύφους στο μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο και στο δείκτη ομοιομορφίας φορτίου για το ορθογωνικό κέλυφος 50x30, με διείσδυση κατά μήκος της μεγάλης πλευράς.

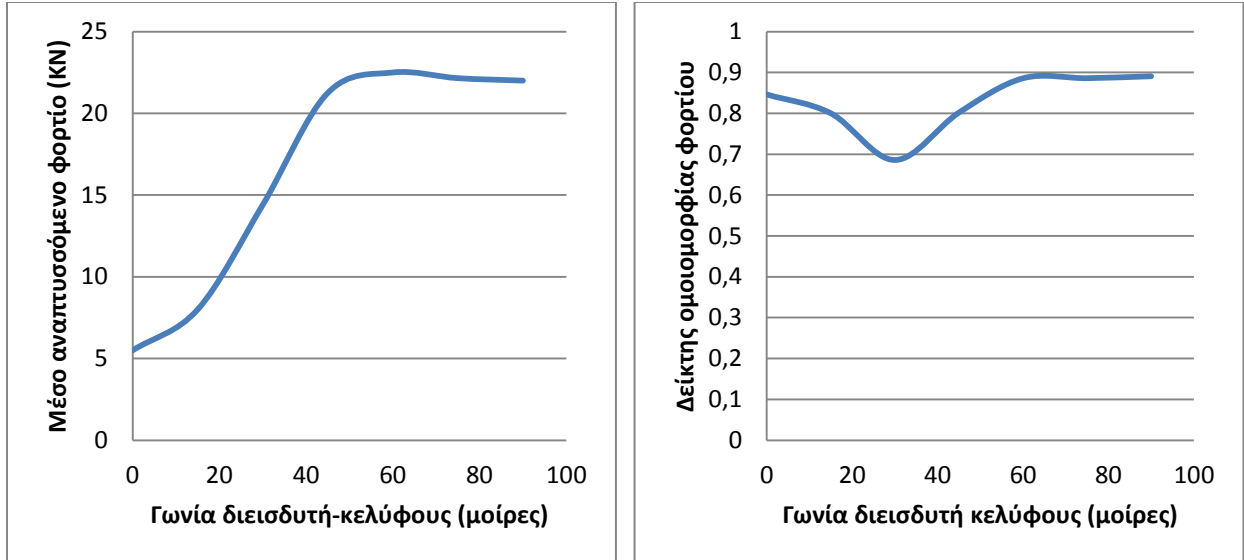
Αρχικά θα πρέπει να αναφερθεί ότι στις καμπύλες που παρουσιάζουν έντονη αύξηση του αναπτυσσόμενου φορτίου στο τέλος τους, που μεταφράζεται σε συμπίεση συμπαγούς υλικού, για τον υπολογισμό των παραπάνω μεγεθών χρησιμοποιήθηκε μόνο το τμήμα της καμπύλης που αντιστοιχεί στο διάστημα από την αρχή της διείσδυσης μέχρι την εμφάνιση του φαινομένου αυτού. Με τον τρόπο αυτό έγιναν οι υπολογισμοί και στα υπόλοιπα κελύφη που μελετήθηκαν.

Στο παρόν δοκίμιο τώρα, παρατηρούμε ότι το μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο παίρνει τη μέγιστη τιμή του για γωνίες διεισδυτή-κελύφους που κυμαίνονται στην περιοχή 55° - 60° , ενώ γενικότερα για γωνίες μεγαλύτερες από 50° έχει σταθερή τιμή αρκετά κοντά στη μέγιστη. Ο δε δείκτης ομοιομορφίας φορτίου είναι πολύ καλός για παράλληλη διείσδυση όπως είδαμε και στο πρώτο μέρος της εργασίας, μειώνεται απότομα για γωνίες κοντά στις 30° , ενώ για γωνίες από 55° και πάνω διατηρεί σχεδόν σταθερή τιμή και σχετικά κοντά στη μέγιστή του. Συνοψίζοντας η ιδανική γωνία διείσδυσης για το δοκίμιο αυτό βρίσκεται ανάμεσα στις 55° και 60° με όλες τις μεγαλύτερες από αυτό το εύρος γωνίες να δίνουν σχεδόν εξίσου καλά αποτελέσματα.

3.1.2: Ορθογωνικό κέλυφος διαστάσεων 30x50x2 κατά μήκος της μικρής πλευράς



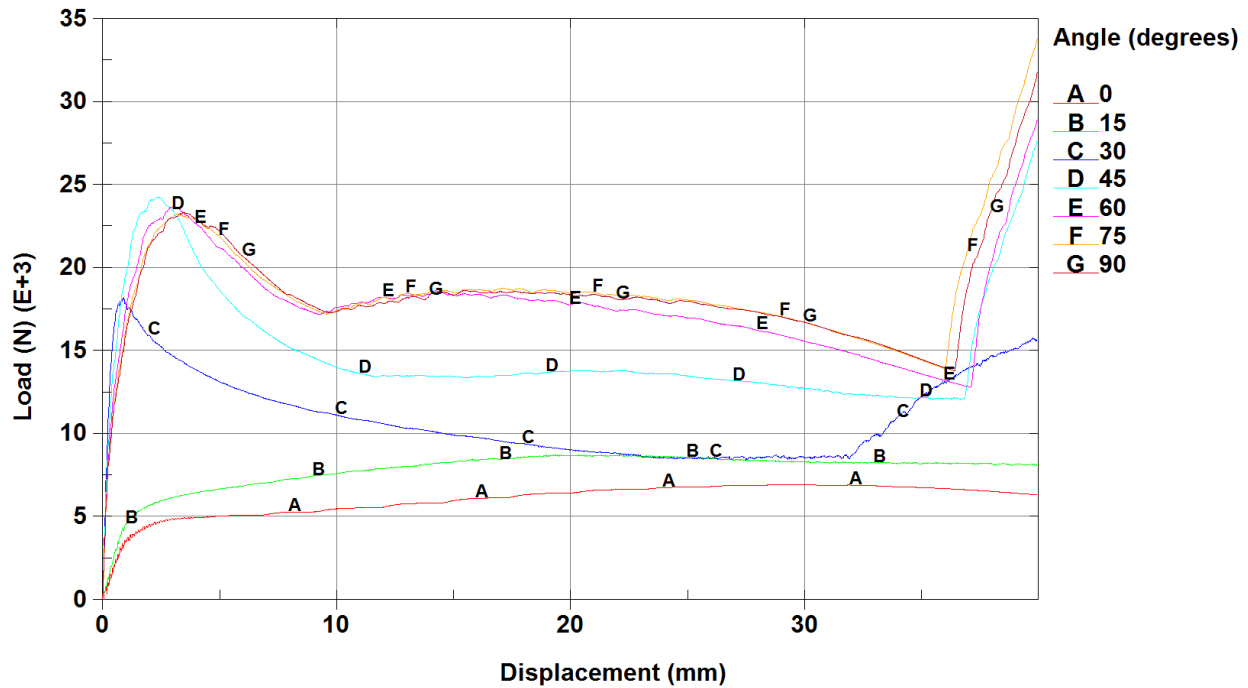
Διάγραμμα 3.4: Επίδραση της γωνίας μεταξύ κελύφους και διεισδυτή στον τρόπο κατάρρευσης του ορθογωνικού κελύφους 50x30, με διείσδυση κατά μήκος της μικρής πλευράς.



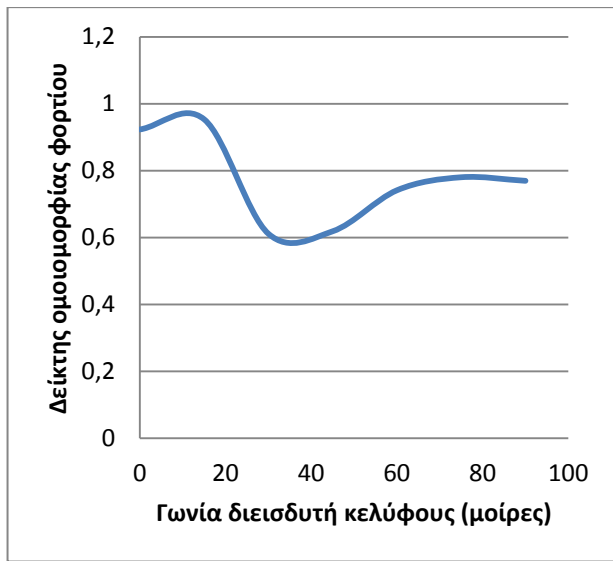
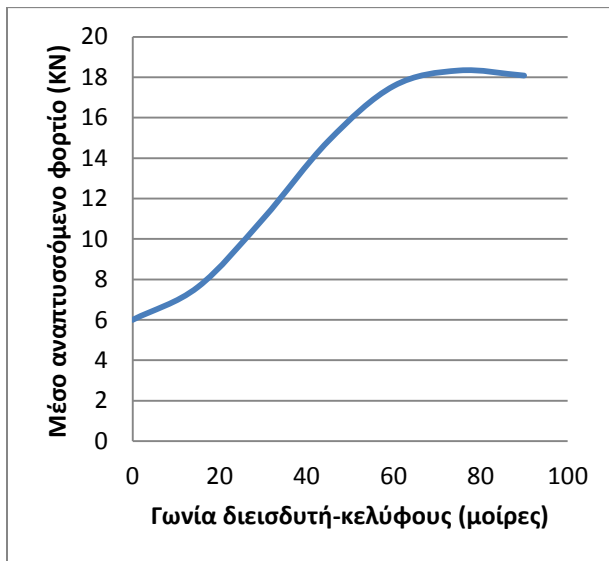
Διαγράμματα 3.5 & 3.6: Επίδραση της γωνίας διεισδυτή κελύφους στο μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο και στο δείκτη ομοιομορφίας φορτίου για το ορθογωνικό κέλυφος 50x30, με διείσδυση κατά μήκος της μικρής πλευράς.

Τα συμπεράσματα που βγάλαμε προηγουμένως για την κατάρρευση του ορθογωνικού κελύφους 50x30mm για διείσδυση κατά μήκος της μεγάλης πλευράς ισχύουν και στην περίπτωση που αυτή γίνεται κατά μήκος της μικρής πλευράς. Αναλυτικότερα το μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο είναι κοντά στη μέγιστη τιμή του για γωνίες μεγαλύτερες από 50° (με τη μέγιστη τιμή του να εμφανίζεται κοντά στις 60°), ενώ ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου για τιμές από 60° και άνω είναι σχεδόν σταθερός στη μέγιστη τιμή του. Επομένως η ιδανική γωνία κατάρρευσης για την περίπτωση αυτή είναι 60° , με όλες τις μεγαλύτερες απ' αυτή γωνίες να είναι πρακτικά εξίσου ιδανικές.

3.1.3: Τετραγωνικό κέλυφος διαστάσεων 50x50x2



Διάγραμμα 3.7: Επίδραση της γωνίας μεταξύ κελύφους και διεσδυτή στον τρόπο κατάρρευσης του τετραγωνικού κελύφους 50x50.

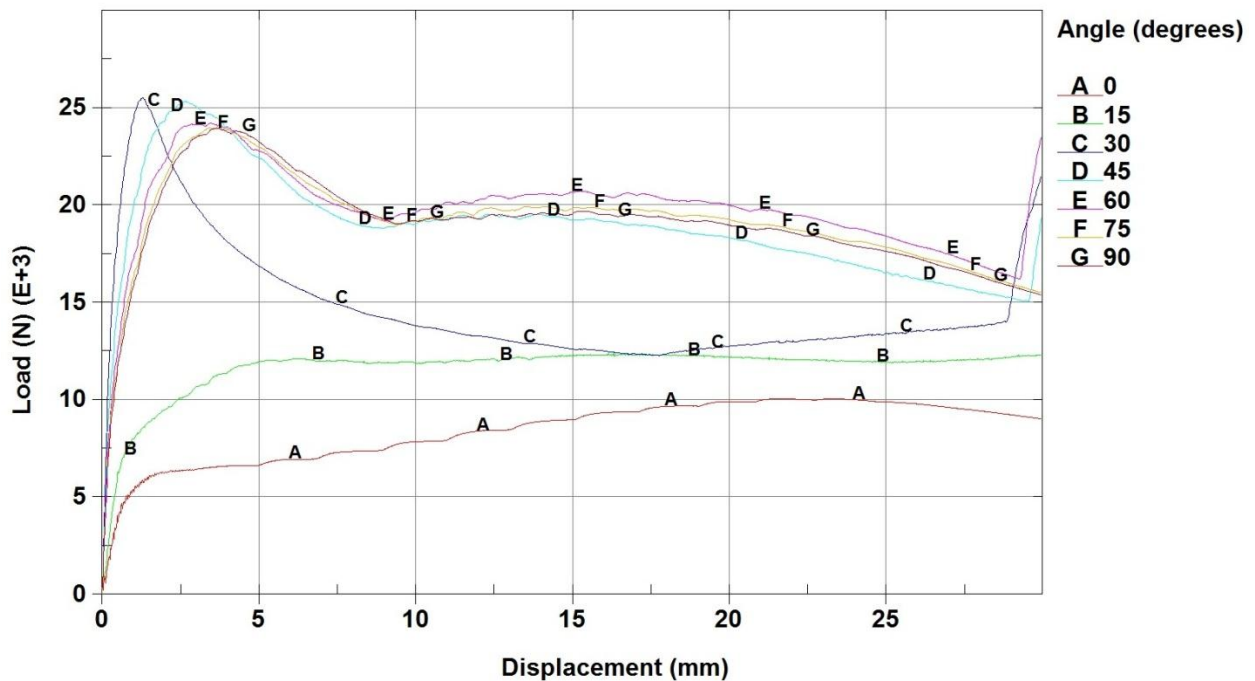


Διαγράμματα 3.8 & 3.9: Επίδραση της γωνίας διεσδυτή κελύφους στο μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο και στο δείκτη ομοιομορφίας φορτίου για το τετραγωνικό κέλυφος 50x50.

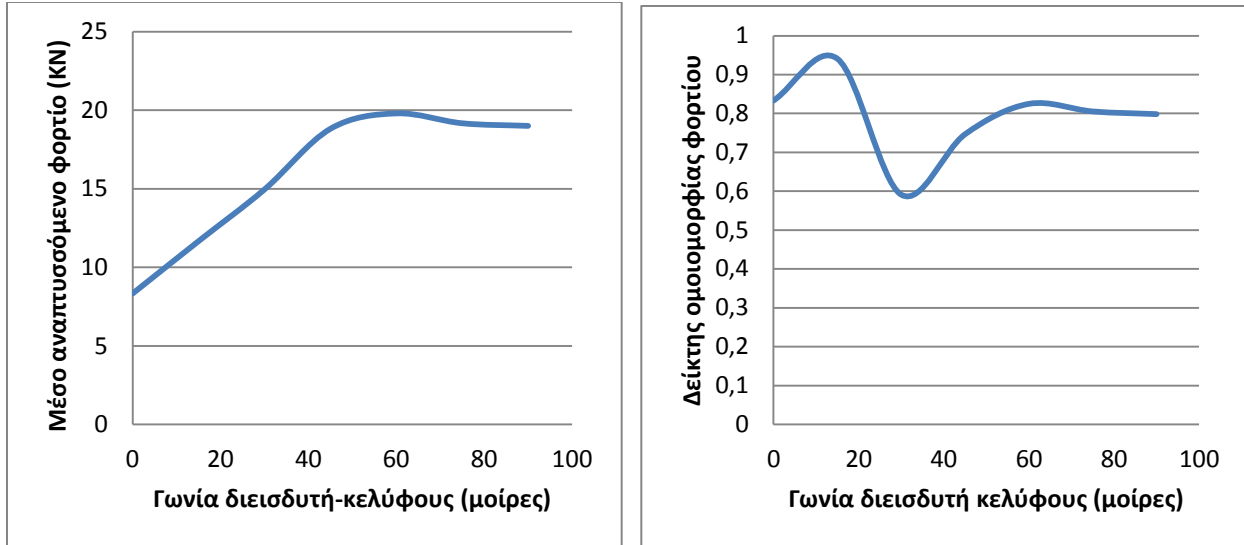
Για ακόμη μια φορά εξάγουμε όμοια συμπεράσματα ως προς τον τρόπο επίδρασης της γωνίας κελύφους και διεσδυτή στον τρόπο κατάρρευσης. Στην περίπτωση του

τετραγωνικού 50x50mm υπάρχει μία μικρή διαφορά σε σχέση με προηγουμένως με τη βέλτιστη γωνία να είναι ελάχιστα μεγαλύτερη και για την ακρίβεια στο διάστημα μεταξύ 75° και 80°. Κατά τ' άλλα οι καμπύλες του μέσου αναπτυσσόμενου φορτίου και του δείκτη ομοιομορφίας έχουν τη γνωστή μορφή, με την πρώτη να αυξάνεται σχεδόν γραμμικά μέχρι να φτάσει την τιμή των 65° περίπου και να σταθεροποιηθεί (η μέγιστη τιμή της αντιστοιχεί σε γωνία 75°) και τη δεύτερη να κάνει τη γνωστή “κοιλιά” στην περιοχή γύρω απ' τις 35°. Η ιδανική τιμή της γωνίας διείδυσης είναι στην περίπτωση αυτή 75°.

3.1.4: Τετραγωνικό κέλυφος διαστάσεων 40x40x2



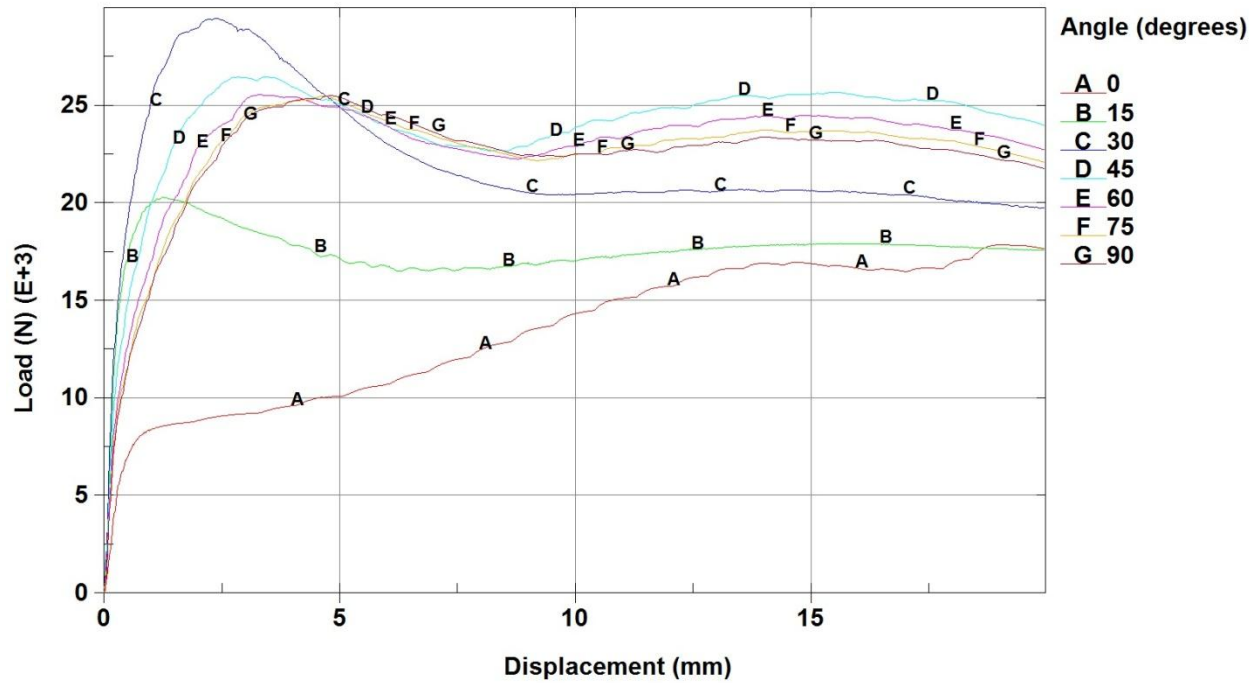
Διάγραμμα 3.10: Επίδραση της γωνίας μεταξύ κελύφους και διείδυτη στον τρόπο κατάρρευσης του τετραγωνικού κελύφους 40x40.



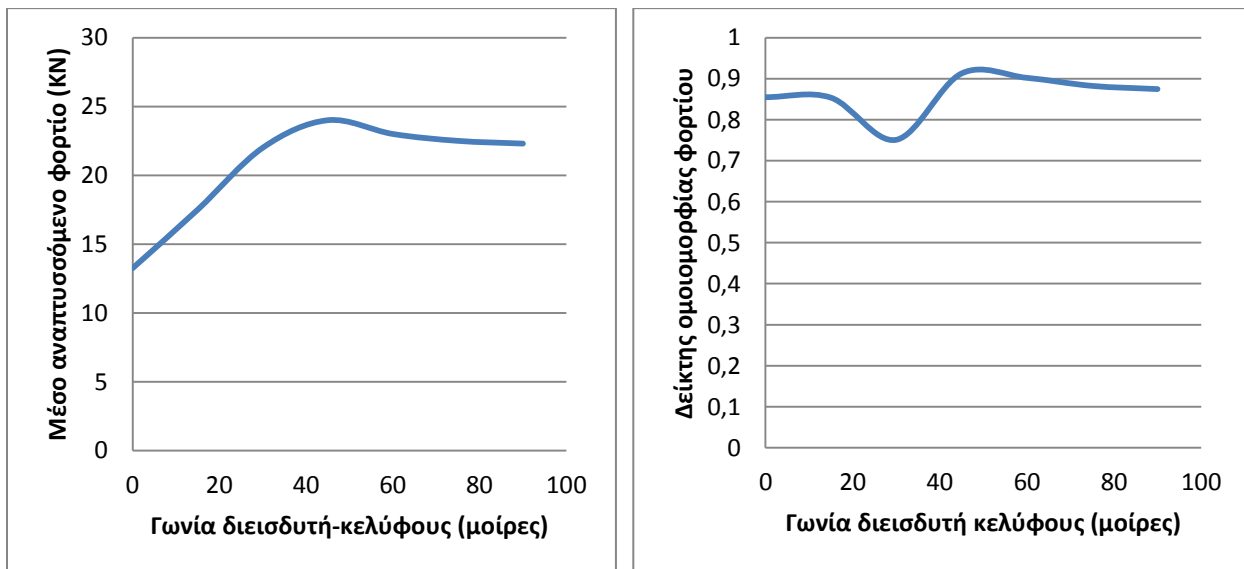
Διαγράμματα 3.11 & 3.12: Επίδραση της γωνίας διεισδυτή κελύφους στο μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο και στο δείκτη ομοιομορφίας φορτίου για το τετραγωνικό κέλυφος 40x40.

Και στην περίπτωση του τετραγωνικού κελύφους 40x40mm ο τρόπος που μεταβάλλεται το μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο και ο αντίστοιχος δείκτης ομοιομορφίας σε συνάρτηση με την γωνία διείσδυσης είναι εξαιρετικά όμοιος με τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν προηγουμένως. Η γωνία διείσδυσης που θα πρέπει να επιλέξουμε ώστε να επιτύχουμε βέλτιστο αποτέλεσμα βρίσκεται στην περιοχή γύρω από τις 60°, με την τιμή αυτή να μεγιστοποιεί και το μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο αλλά και το δείκτη ομοιομορφίας φορτίου.

3.1.5: Τετραγωνικό κέλυφος διαστάσεων 30x30x2



Διάγραμμα 3.13: Επίδραση της γωνίας μεταξύ κελύφους και διεισδυτή στον τρόπο κατάρρευσης του τετραγωνικού κελύφους 30x30.

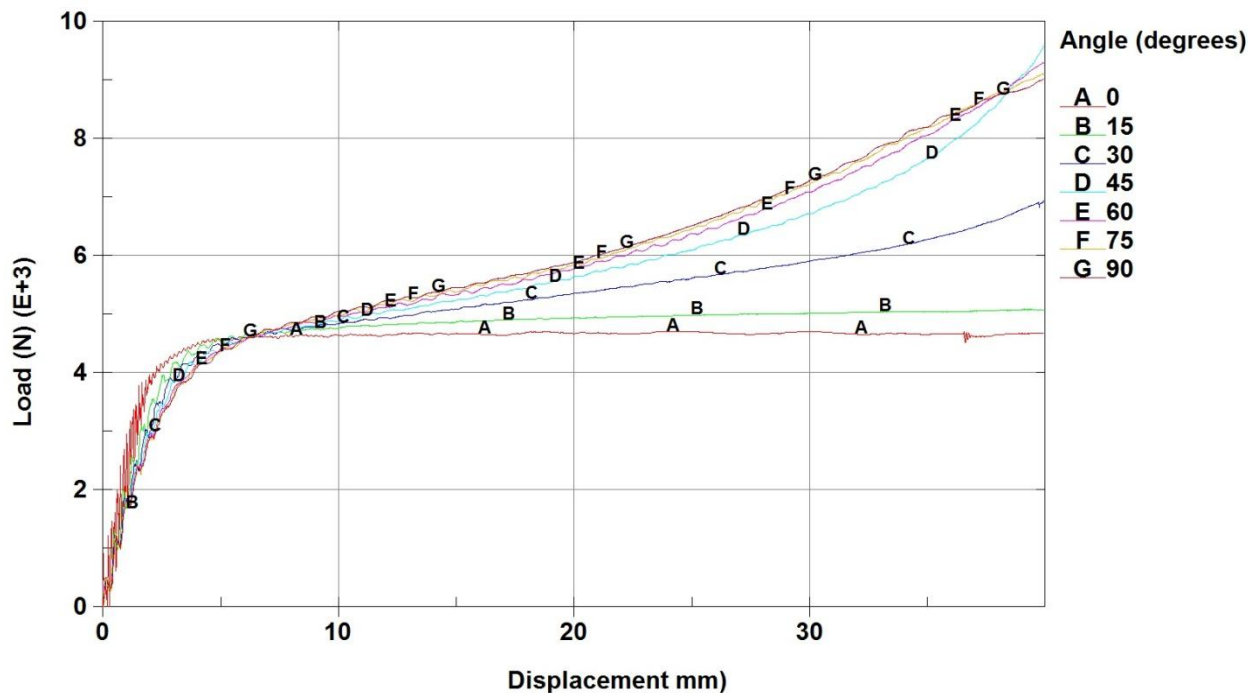


Διαγράμματα 3.14 & 3.15: Επίδραση της γωνίας διεισδυτή κελύφους στο μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο και στο δείκτη ομοιομορφίας φορτίου για το τετραγωνικό κέλυφος 30x30.

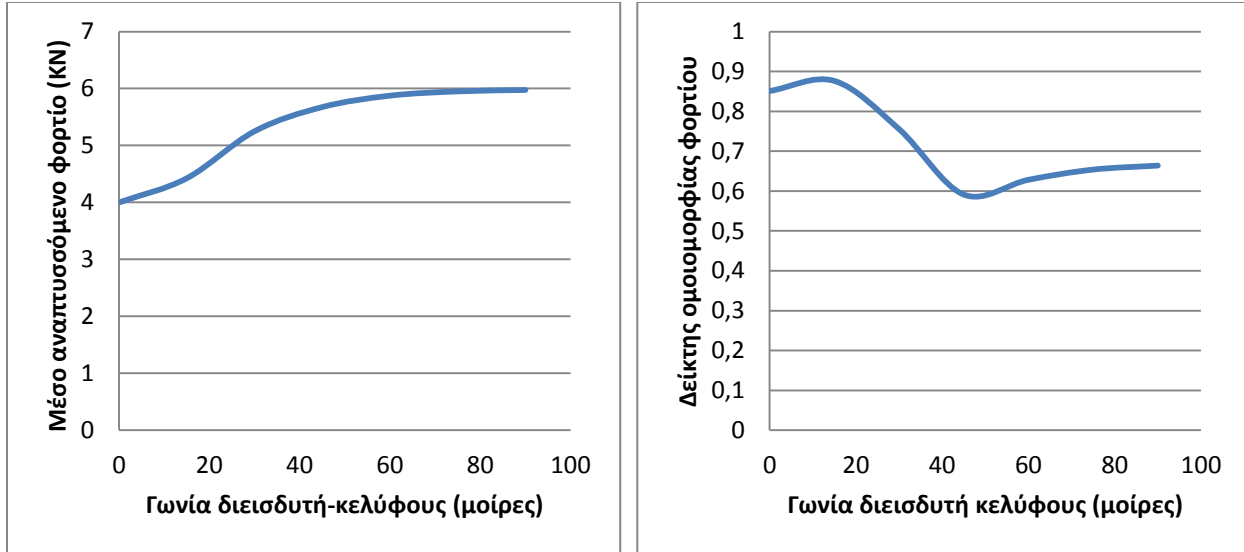
Στο τρίτο και τελευταίο τετραγωνικό κέλυφος που μελετήθηκε τα αποτελέσματα είναι όμοια με τα άλλα δύο τετραγωνικά κελύφη, όπως επίσης και με το ορθογωνικό. Για την

ακρίβεια οι καμπύλες είναι πάλι μεταξύ τους όμοιες με τη βέλτιστη γωνία διεισδυτή-κελύφους να βρίσκεται αυτή τη φορά στην περιοχή γύρω από τις 45° . Αξίζει εδώ να σημειώσουμε ότι στα τετραγωνικά δοκίμια που μελετήσαμε η βέλτιστη γωνία μεγαλώνει όσο μεγαλώνουν και οι διαστάσεις του δοκιμίου, καθώς υπολογίσαμε περίπου 75° για το $50 \times 50 \text{mm}$, 60° για το $40 \times 40 \text{mm}$ και 45° για το $30 \times 30 \text{mm}$. Το γεγονός αυτό είναι κάτι που έτσι κι αλλιώς περιμέναμε διότι με σταθερό το πάχος τοιχωμάτων του, όσο μικρότερο είναι σε διαστάσεις το δοκίμιο, τόσο πιο στιβαρό είναι, επιτρέποντάς μας να του ασκήσουμε πλάγια πλευρική φόρτιση με γωνίες που διαφέρουν αρκετά απ' τις 90° χωρίς να είναι ευαίσθητο σε σχηματισμό μεγάλων σε έκταση πλευρικών πλαστικών αρμών που οδηγούν σε στροφή της άνω έδρας του ως προς την σταθερή κάτω έδρα με αποτέλεσμα τη μείωση του φορτίου που μπορεί να παραλάβει, άρα και της αντίστοιχης απορροφητικής του ικανότητας.

3.1.6: Κυλινδρικό κέλυφος διαστάσεων $\Phi 50 \times 2$



Διάγραμμα 3.16: Επίδραση της γωνίας μεταξύ κελύφους και διεισδυτή στον τρόπο κατάρρευσης του κυλινδρικού κελύφους $\Phi 50$.



Διαγράμματα 3.17 & 3.18: Επίδραση της γωνίας διεισδυτή κελύφους στο μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο και στο δείκτη ομοιομορφίας φορτίου για το κυλινδρικό κέλυφος Φ50.

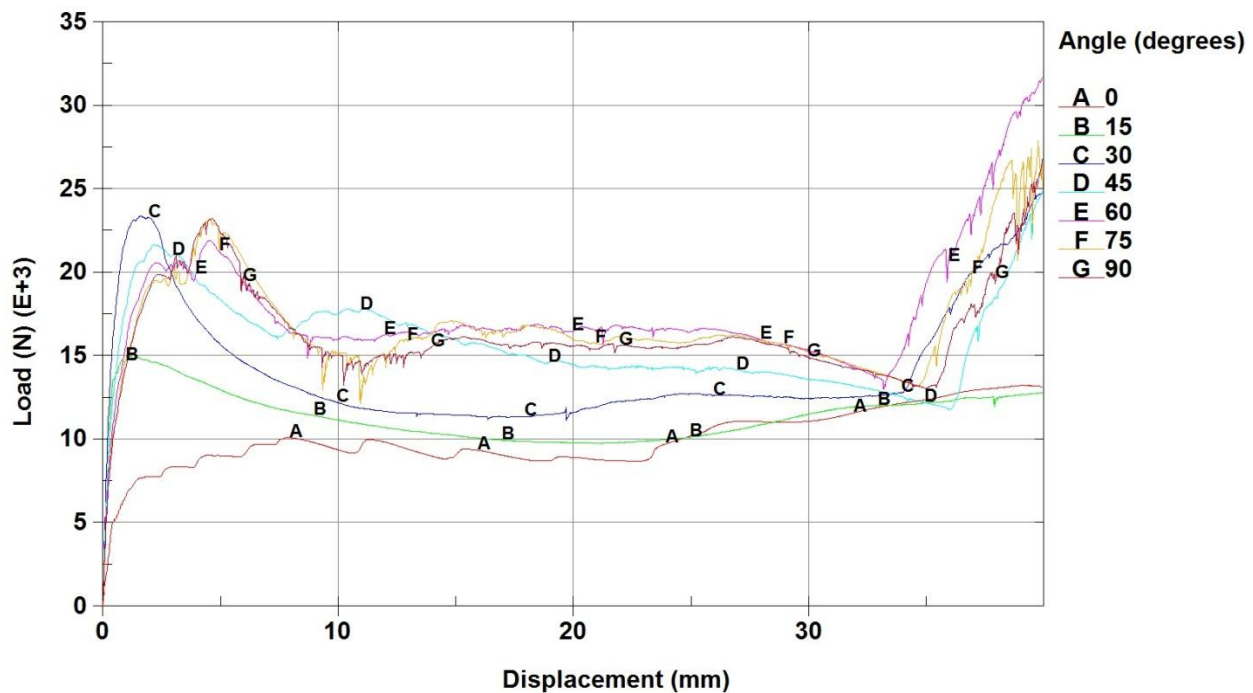
Παρατηρούμε ότι η περίπτωση του κυλινδρικού δοκιμίου είναι εντελώς διαφορετική απ' τις περιπτώσεις των τετραγωνικών και ορθογωνικών κελύφων που μελετήσαμε προηγουμένως. Στο κυλινδρικό κέλυφος το μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο, και κατ' επέκταση η απορροφητική του ικανότητα αυξάνεται συνεχώς όσο πλησιάζουμε στις 90°. Ο δε δείκτης ομοιομορφίας φορτίου στην περίπτωση αυτή είναι μεγάλος για μικρές γωνίες διείσδυσης και μειώνεται απότομα μέχρι τις 50° περίπου και αυξάνεται ελάχιστα και σταθερά μέχρι το κέλυφος και ο διεισδυτής να γίνουν κάθετα. Κοιτώντας και τα δύο διαγράμματα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η βέλτιστη γωνία από οικονομικής σκοπιάς (μεγαλύτερος λόγος στιβαρότητας προς χρησιμοποιούμενο υλικό) είναι αυτή των 90°, ενώ από τεχνολογικής σκοπιάς (μεγαλύτερος δείκτης ομοιομορφίας φορτίου) η ιδανική γωνία διείσδυσης βρίσκεται στο φάσμα 15°-20°.

3.2: Μοντελοποίηση με τη διαμόρφωση constant stress solid element formulation.

Όπως είδαμε στο πρώτο μέρος της παρούσας εργασίας η μοντελοποίηση των πειραμάτων με τη αρχιτεκτονική fully-integrated solid element formulation (element formulation 2) προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια την πραγματικότητα με μοναδικό ελάττωμα το γεγονός ότι κάνει τα θεωρητικά κελύφη πιο στιβαρά απ' ότι είναι στην πραγματικότητα.

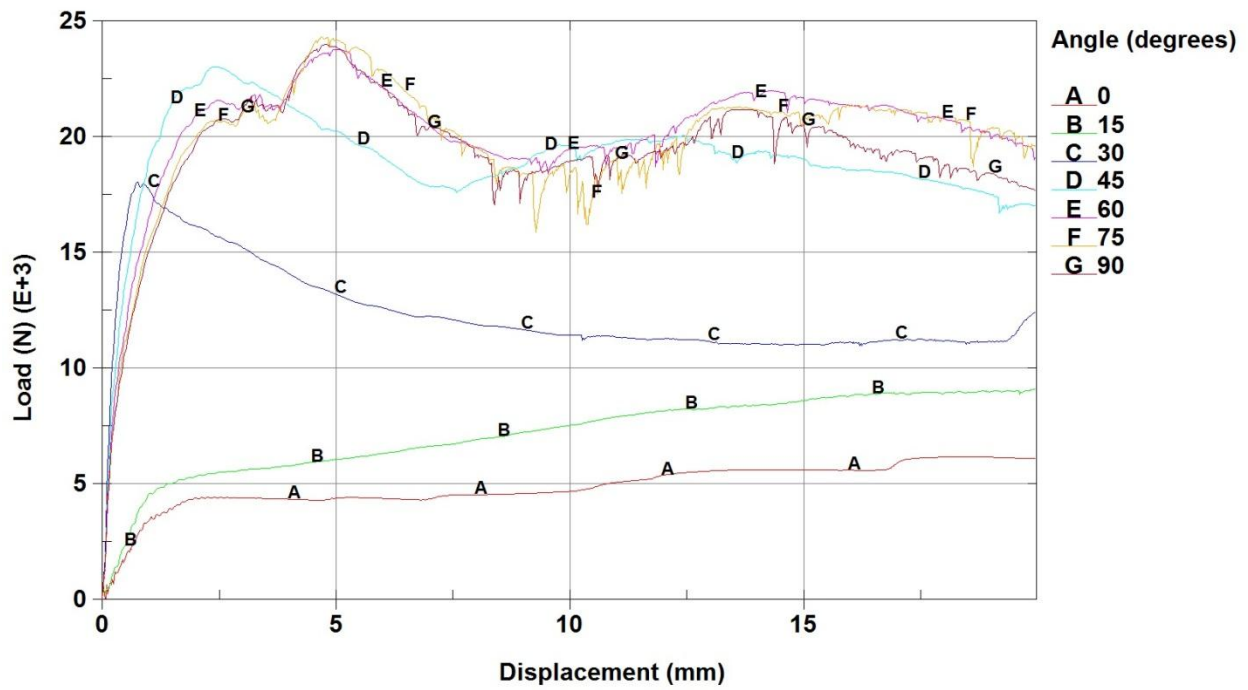
Με άλλα λόγια η διαμόρφωση αυτή δίνει αποτελέσματα που ποιοτικά είναι πολύ κοντά στα πειραματικά, αλλά ποσοτικά είναι κατά κανόνα μεγαλύτερα. Απ' την άλλη μεριά η διαμόρφωση constant stress solid element formulation (element formulation 1) οδηγεί σε έντονο σχηματισμό κλεψύδρων και κατ' επέκταση σε αφύσικη δομή των θεωρητικών κελυφών, αλλά τα αποτελέσματα που παίρνουμε απ' αυτή είναι ποσοτικά συνήθως πιο κοντά στα πειραματικά. Έτσι για λόγους πληρότητας παρακάτω παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα αναπτυσσόμενου φορτίου-βράχυνσης κελύφους για όλα τα κελύφη που μελετήθηκαν και με τη δεύτερη μέθοδο μοντελοποίησης. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να τονιστεί ότι τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου είναι αμφιβόλου αξιοπιστίας και θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη μόνο σε περίπτωση που μοιάζουν ποιοτικά με αυτά της προηγούμενης ενότητας (3.1), διότι σε διαφορετική περίπτωση το φαινόμενο σχηματισμού κλεψύδρων είναι τόσο έντονο που ίσως έχει αλλοιώσει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου και κατ' επέκταση και τη μορφή των ζητούμενων καμπυλών. Για το λόγο αυτό τα αποτελέσματα αυτά απλώς παραθέτονται χωρίς να επεξεργαστούν ή να σχολιαστούν.

3.2.1: Ορθογωνικό κέλυφος διαστάσεων 50x30 κατά μήκος της μεγάλης πλευράς



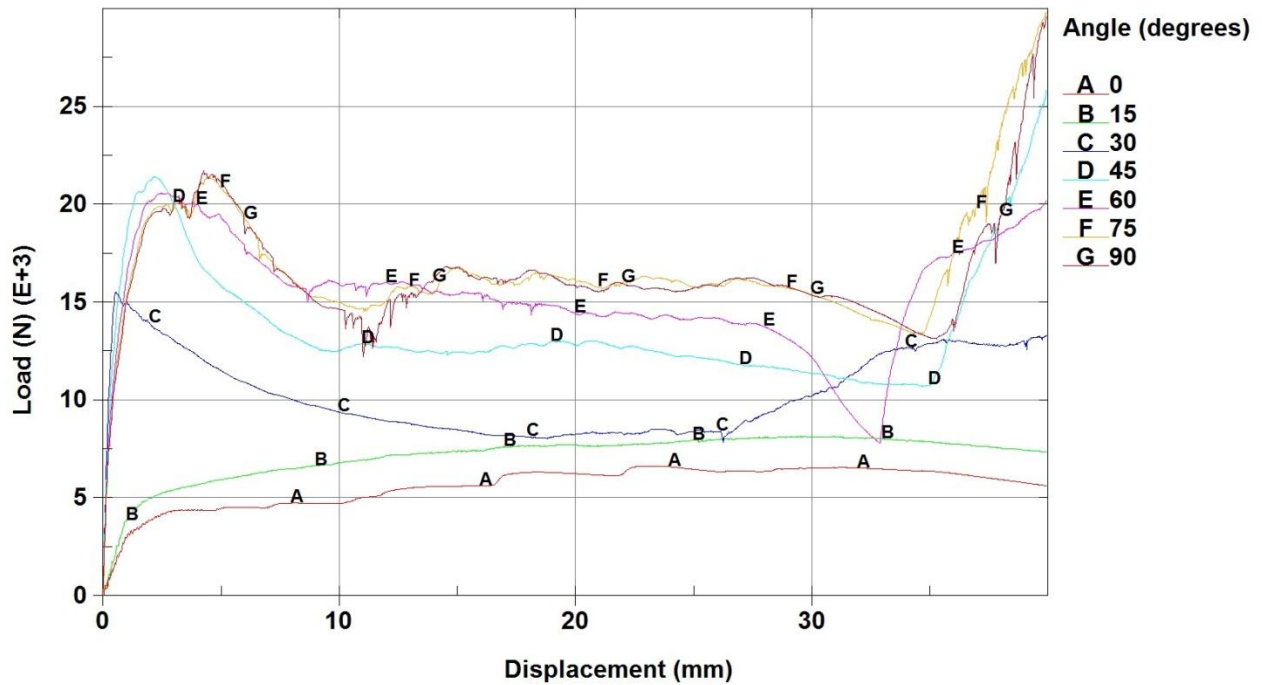
Διάγραμμα 3.19: Επίδραση της γωνίας μεταξύ κελύφους και διεσδυτή στον τρόπο κατάρρευσης του ορθογωνικού κελύφους 50x30, με διεσδυση κατά μήκος της μεγάλης πλευράς.

3.2.2: Ορθογωνικό κέλυφος διαστάσεων 50x30 κατά μήκος της μικρής πλευράς



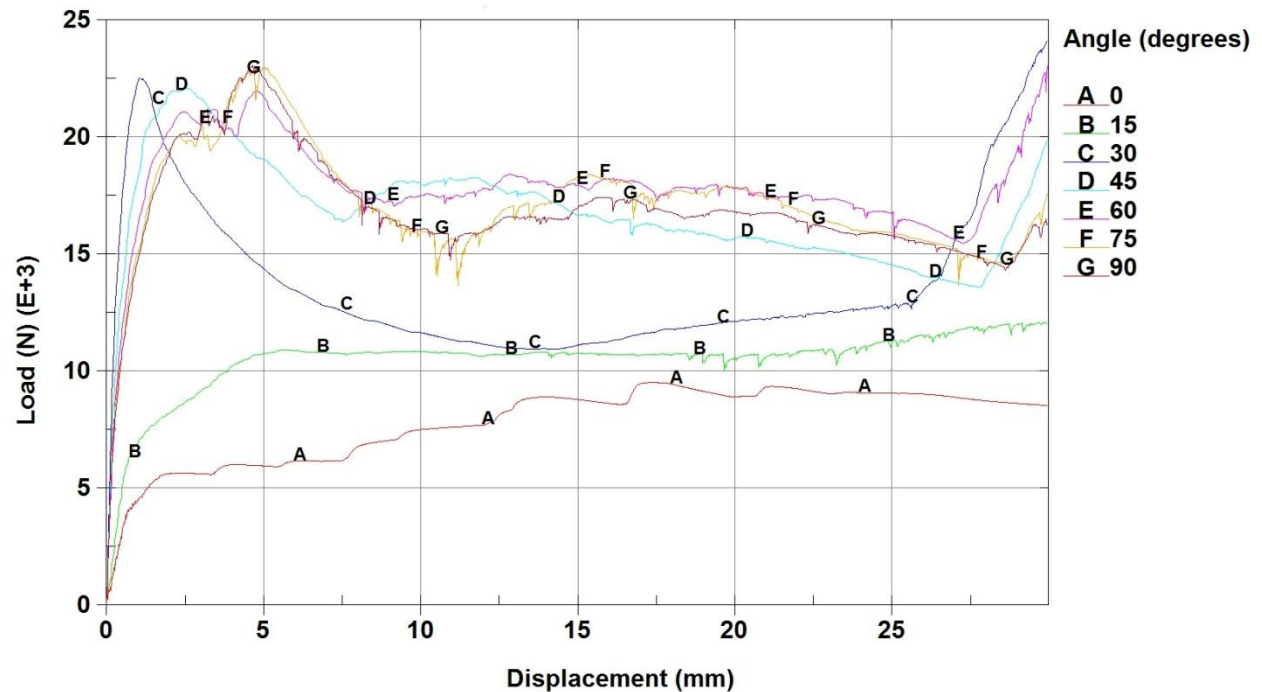
Διάγραμμα 3.20: Επίδραση της γωνίας μεταξύ κελύφους και διεσδυτή στον τρόπο κατάρρευσης του ορθογωνικού κελύφους 50x30, με διείδυση κατά μήκος της μικρής πλευράς.

3.2.3: Τετραγωνικό κέλυφος διαστάσεων 50x50



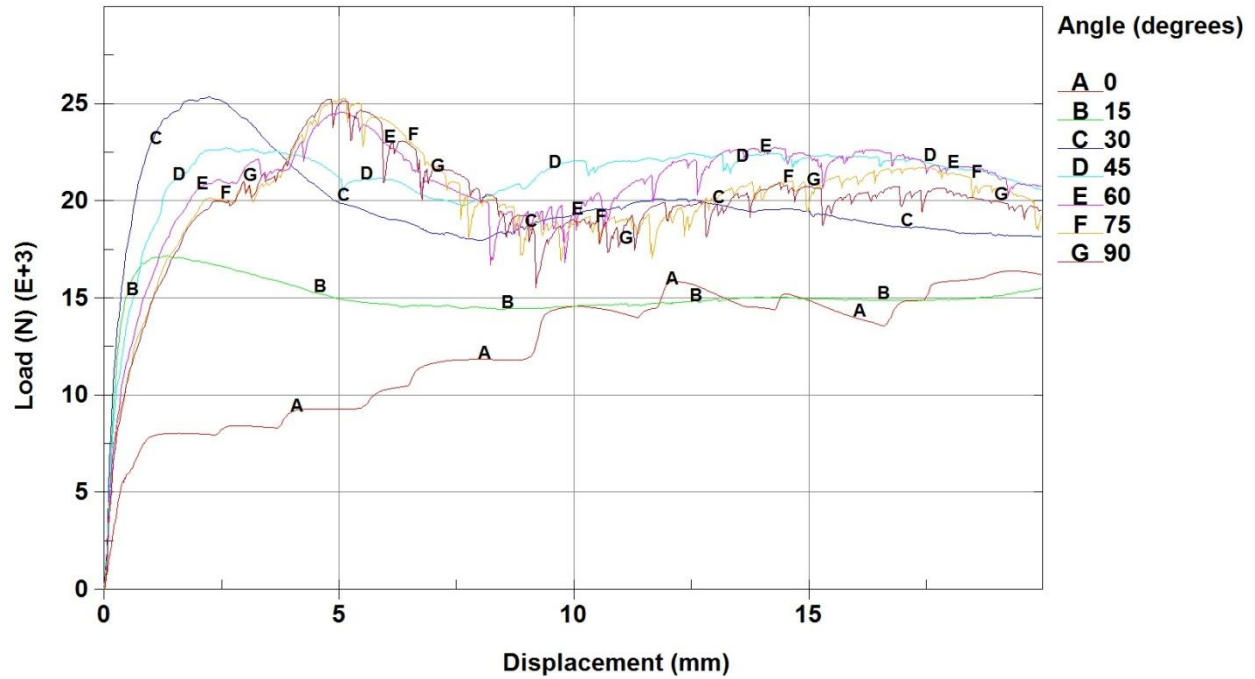
Διάγραμμα 3.21: Επίδραση της γωνίας μεταξύ κελύφους και διεσδυτή στον τρόπο κατάρρευσης του τετραγωνικού κελύφους 50x50.

3.2.4: Τετραγωνικό κέλυφος διαστάσεων 40x40



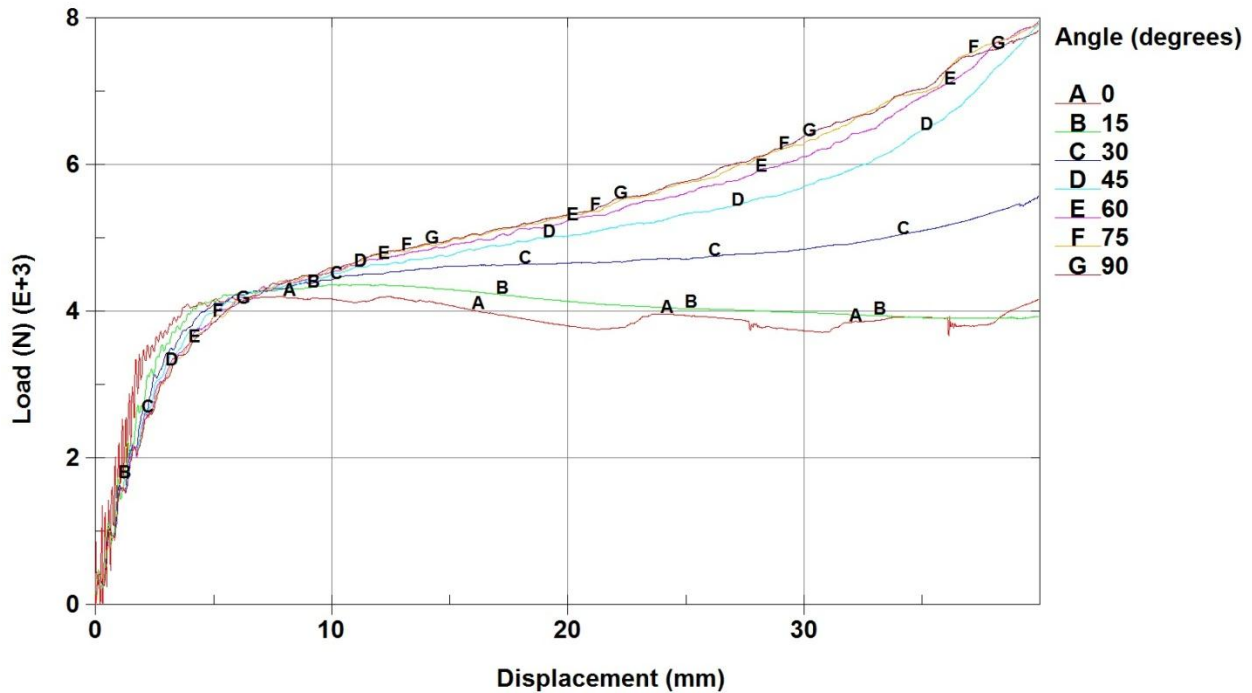
Διάγραμμα 3.22: Επίδραση της γωνίας μεταξύ κελύφους και διεισδυτή στον τρόπο κατάρρευσης του τετραγωνικού κελύφους 40x40.

3.2.5: Τετραγωνικό κέλυφος διαστάσεων 30x30



Διάγραμμα 3.23: Επίδραση της γωνίας μεταξύ κελύφους και διεισδυτή στον τρόπο κατάρρευσης του τετραγωνικού κελύφους 30x30.

3.2.6: Κυλινδρικό κέλυφος διαστάσεων Φ50



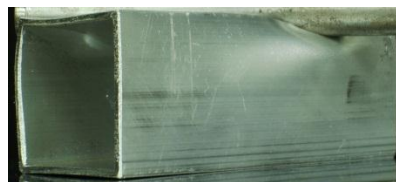
Διάγραμμα 3.24: Επίδραση της γωνίας μεταξύ κελύφους και διεσδυτή στον τρόπο κατάρρευσης του κυλινδρικού κελύφους Φ50.

3.3: Ενδεικτικά πειράματα κατάρρευσης για διείδυση με ενδιάμεσες γωνίες και σύγκριση με τις αντίστοιχες προσομοιώσεις που αναπτύχθηκαν.

3.3.1: Τετραγωνικό κέλυφος διαστάσεων 40x40x2 με γωνία διείδυσης 45°



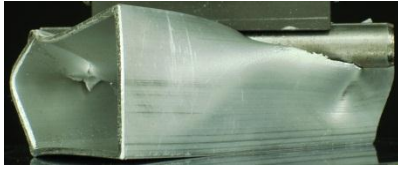
1(0mm)



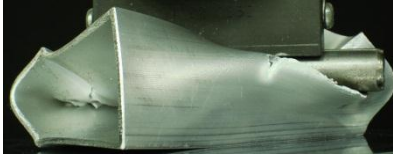
2(6.5mm)



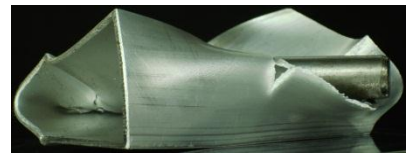
3(11mm)



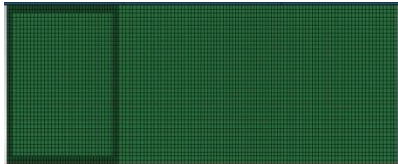
4(17.2mm)



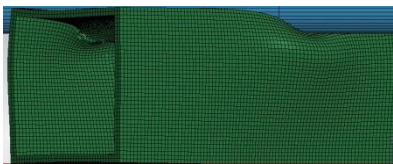
5(25.8mm)



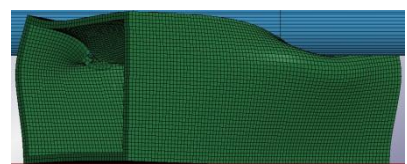
6(30mm)



1(0mm)



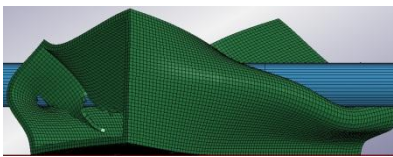
2(6.5mm)



3(11mm)



4(17.2mm)

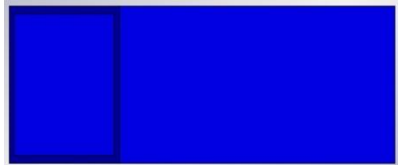


5(25.8mm)

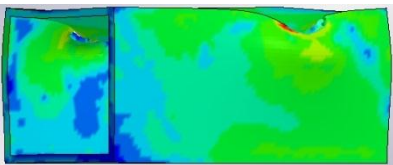


6(30mm)

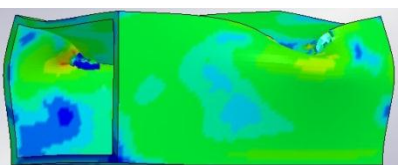
Von Mises stress



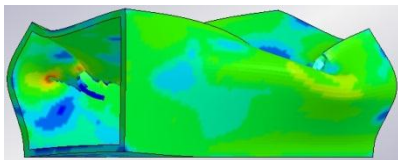
1(0mm)



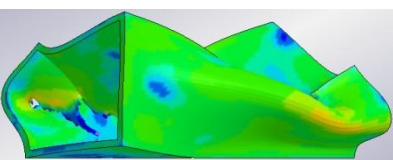
2(6.5mm)



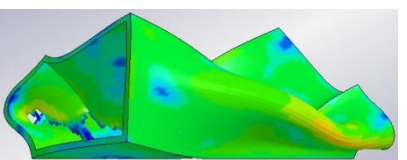
3(11mm)



4(17.2mm)



5(25.8mm)



6(30mm)

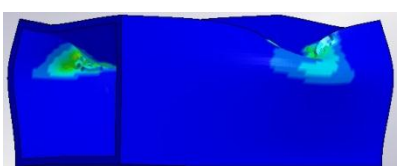
Plastic strain



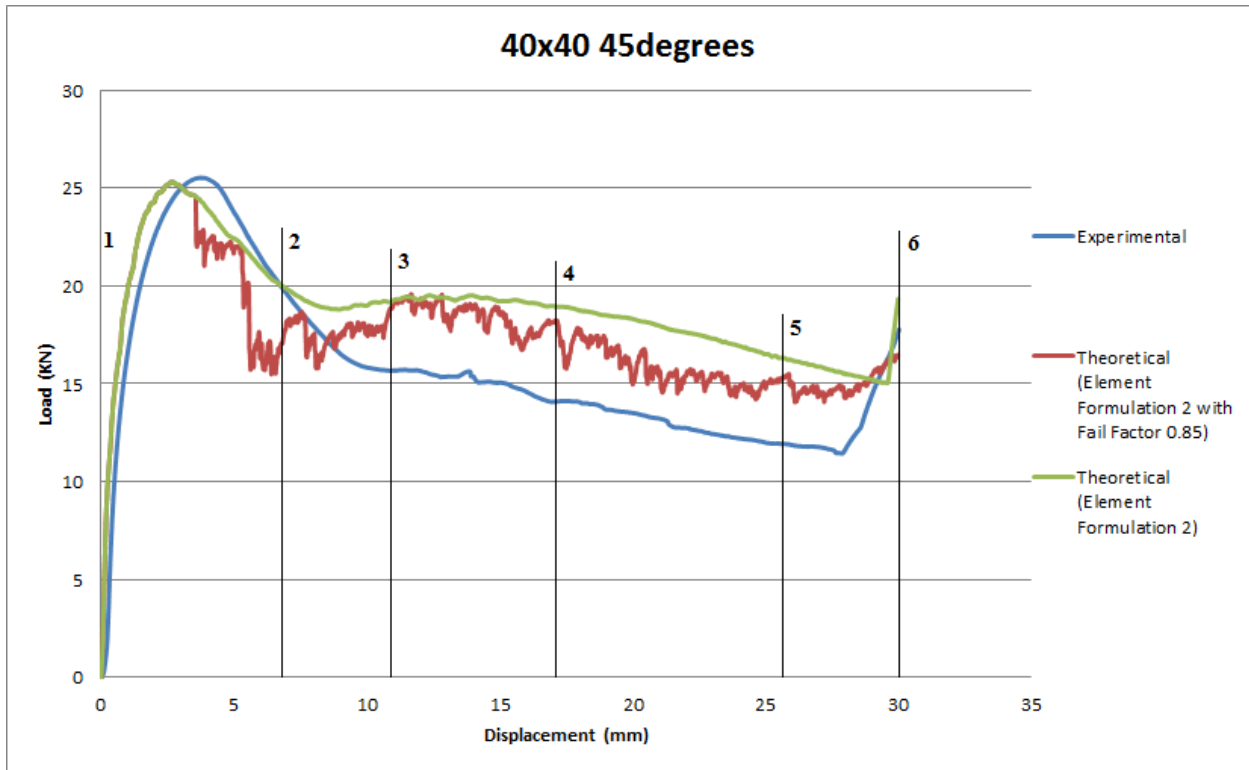
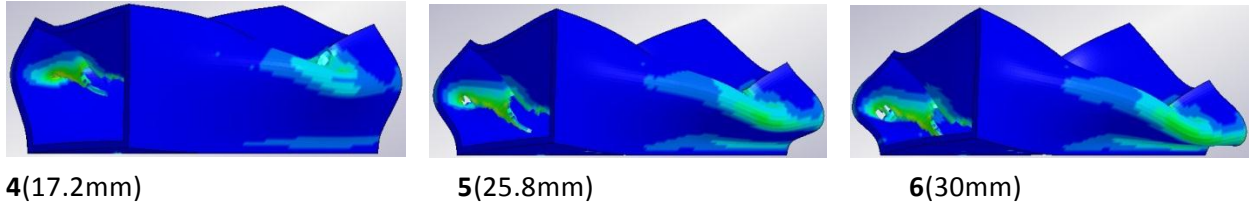
1(0mm)



2(6.5mm)



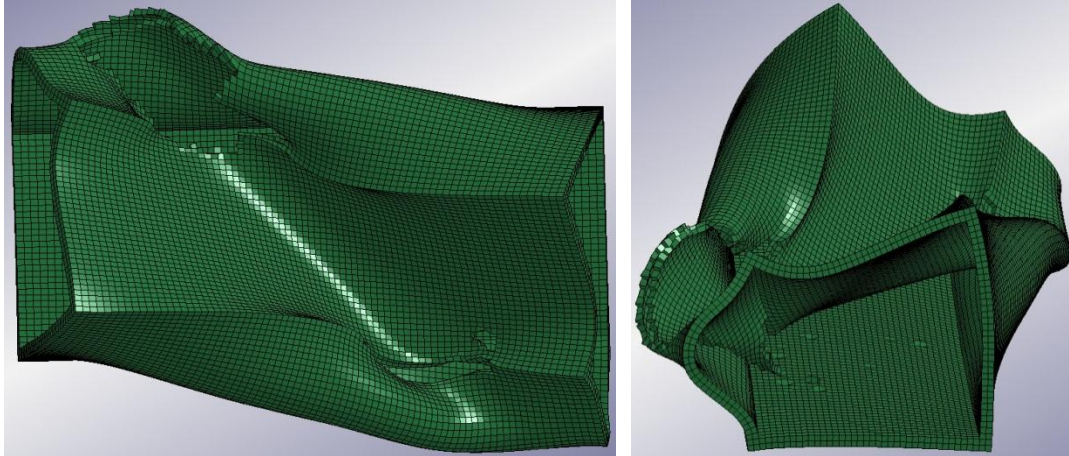
3(11mm)



Διάγραμμα 3.25: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για το τετραγωνικό δοκίμιο 40x40 και για γωνία διείδουσης 45°



Πειραματικό δοκίμιο μετά την ολοκλήρωση της κατάρρευσης

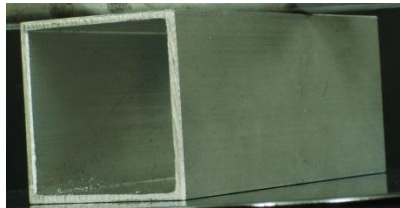


Θεωρητικό μοντέλο με συντελεστή θραύσης μετά την ολοκλήρωση της κατάρρευσης

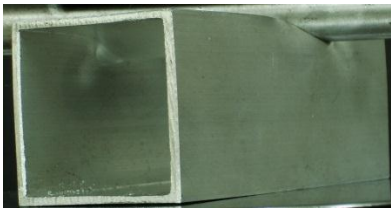
Το τετραγωνικό δοκίμιο 40x40mm από τα πρώτα στάδια της κατάρρευσής του παρουσίασε θραύση κοντά στις περιοχές επαφής του διεισδυτή με τις δύο πάνω ακμές του όπως φαίνεται και στις παραπάνω προοδευτικές εικόνες από την κατάρρευση. Τον τρόπο θραύσης μας βοηθούν καλύτερα να τον κατανοήσουμε οι προοδευτικές εικόνες κατάρρευσης που παρουσιάζουν τη συνολική κατά Von Mises τάση και την πλαστική παραμόρφωση αντίστοιχα. Για την προσομοίωση του πειράματος αυτού σχεδιάστηκαν δύο διαφορετικά μοντέλα και τα δύο με την αρχιτεκτονική πλήρους ολοκλήρωσης, το ένα χωρίς να εξετάζει το ενδεχόμενο θραύσης και το άλλο με κατάλληλο συντελεστή θραύσης που συμπληρώθηκε στην αντίστοιχη καρτέλα ιδιοτήτων του υλικού του κελύφους (οι εικόνες που παρουσιάστηκαν προηγουμένως αντιστοιχούν στο μοντέλο αυτό). Μετά από αρκετούς υπολογισμούς και αρκετές διορθώσεις της προηγούμενης τιμής (μέθοδος trial and error) επιλέχθηκε ο συντελεστής θραύσης fail factor = 0.85, έτσι ώστε η διαδικασία θραύσης του θεωρητικού δοκιμίου να είναι όσο το δυνατό πιο όμοια με την πραγματική. Όπως περιμέναμε οι δύο θεωρητικές καμπύλες είναι πιο ψηλά απ' την αντίστοιχη πειραματική λόγω της χρήσης της αρχιτεκτονικής fully-integrated solid element formulation. Άξιο αναφοράς είναι το γεγονός ότι η θεωρητική καμπύλη που αντιστοιχεί σε μοντέλο με θραύση είναι πολύ κοντά σε αυτή που αντιστοιχεί σε μοντέλο χωρίς θραύση, με αρκετό παραπάνω θόρυβο βέβαια εξ' αιτίας της συχνής διαγραφής πεπερασμένων στοιχείων. Αυτό αποδεικνύει, κάτι που αναφέραμε και σε προηγούμενο σημείο της εργασίας, ότι δηλαδή η θραύση του κελύφους (εκτός της περίπτωσης που αυτό είναι παράλληλο με το διεισδυτή) δεν οδηγεί σε ολική αστοχία του σαν ενεργειακό απορροφητή, αλλά σε μία μικρή μείωση της απορροφητικής του ικανότητας. Τέλος θα πρέπει να ανεφέρουμε ότι κατά τη διαδικασία του πειράματος παρατηρήθηκε μικρή στροφή του διεισδυτή ως προς

τον άξονα κίνησης της πρέσας (μικρότερη των 5°), επομένως η πραγματική πειραματική γωνία διείδυσης ενδεχομένως να είναι λίγο μικρότερη από 45° .

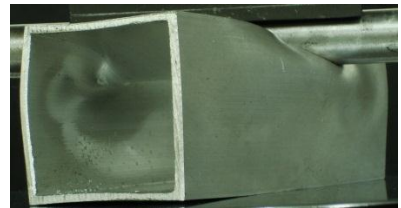
3.3.2: Τετραγωνικό κέλυφος διαστάσεων 40x40x2 με γωνία διείδυσης 60°



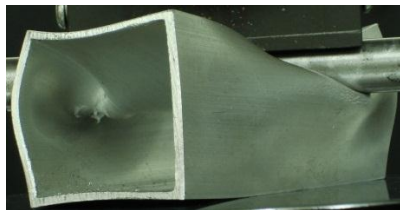
1(0mm)



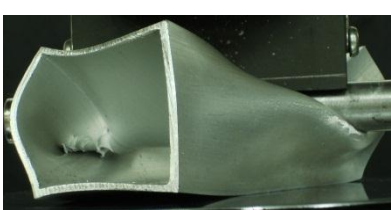
2(6.4mm)



3(11.1mm)



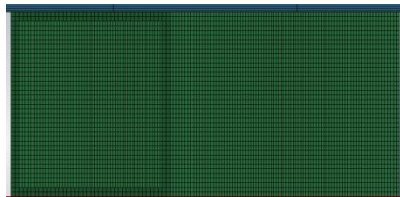
4(18.4mm)



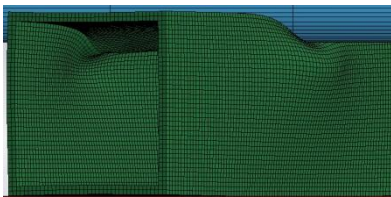
5(22.8mm)



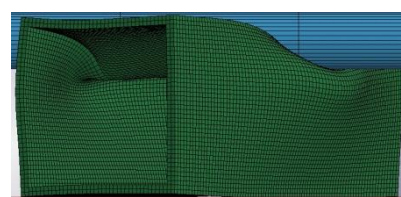
6(30mm)



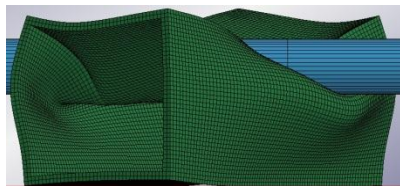
1(0mm)



2(6.4mm)



3(11.1mm)



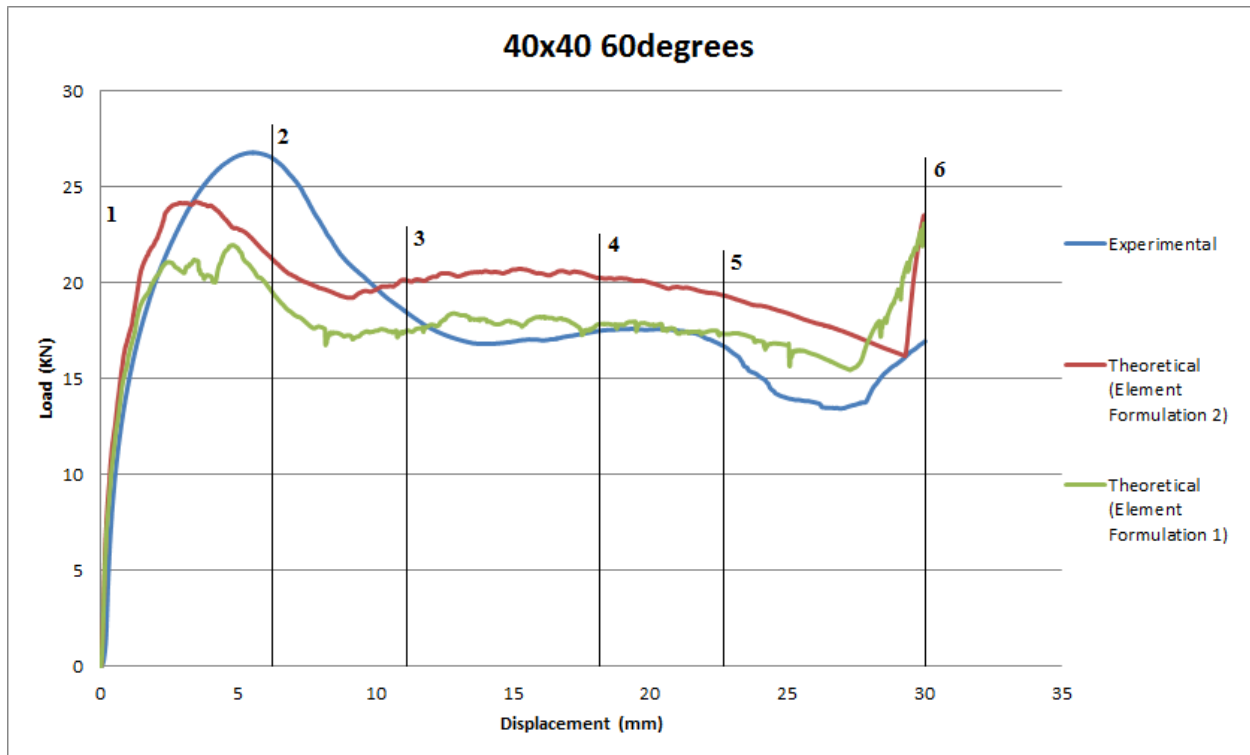
4(18.4mm)



5(22.8mm)

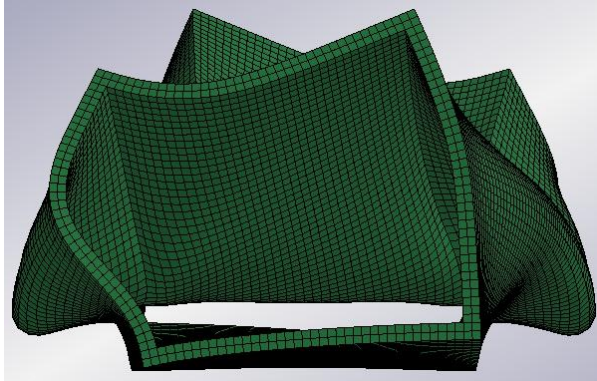


6(30mm)

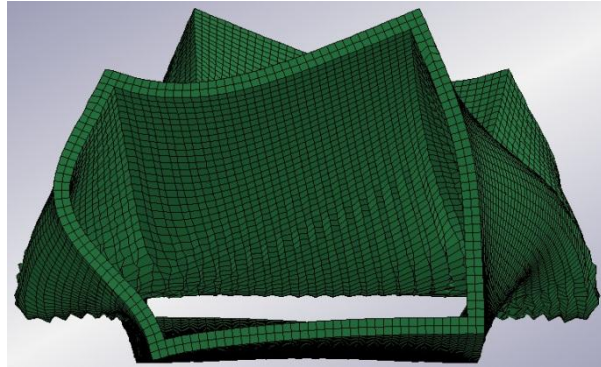


Διάγραμμα 3.26: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για το τετραγωνικό δοκίμιο 40x40 και για γωνία διείδυσης 60°

Και στην περίπτωση του ορθογωνικού κελύφους 40x40 υπό γωνία διείδυσης 60° οι θεωρητικές καμπύλες είναι αρκετά κοντά με τις πραγματικές με την κόκκινη καμπύλη να βρίσκεται πάντα λίγο ψηλότερα. Η πτώση του αναπτυσσόμενου φορτίου που παρατηρούμε περίπου στα 25mm της διείδυσης στην πειραματική καμπύλη οφείλεται σε θραύση του δοκιμίου που δεν έχει ληφθεί υπ' όψη κατά τη διαμόρφωση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων. Οι λόγοι που μας οδήγησαν στην απόφαση να μη συμπεριλάβουμε την πιθανότητα θραύσης είναι αφ' ενός τα αμφιβόλου αξιοπιστίας αποτελέσματα που μας δίνει ο κώδικας προσθέτοντας συντελεστή ενδεχόμενης θραύσης (fail factor στην καρτέλα materials του LS-DYNA) με τη μέθοδο trial and error και αφ' ετέρου το γεγονός ότι σε περίπτωση μη παράλληλης διείδυσης μια πιθανή θραύση του δοκιμίου δεν οδηγεί σε γενικότερη αστοχία του δοκιμίου, αλλά σε μείωση (συνήθως μικρή) της απορροφητικής του ικανότητας. Και σε αυτή την περίπτωση παρατηρήθηκε μια μικρή στροφή του διειδυτή ως προς τον κατακόρυφο άξονα κίνησής του (μικρότερη και από αυτή της προηγούμενης περίπτωσης), που δεν επηρεάζει σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα.

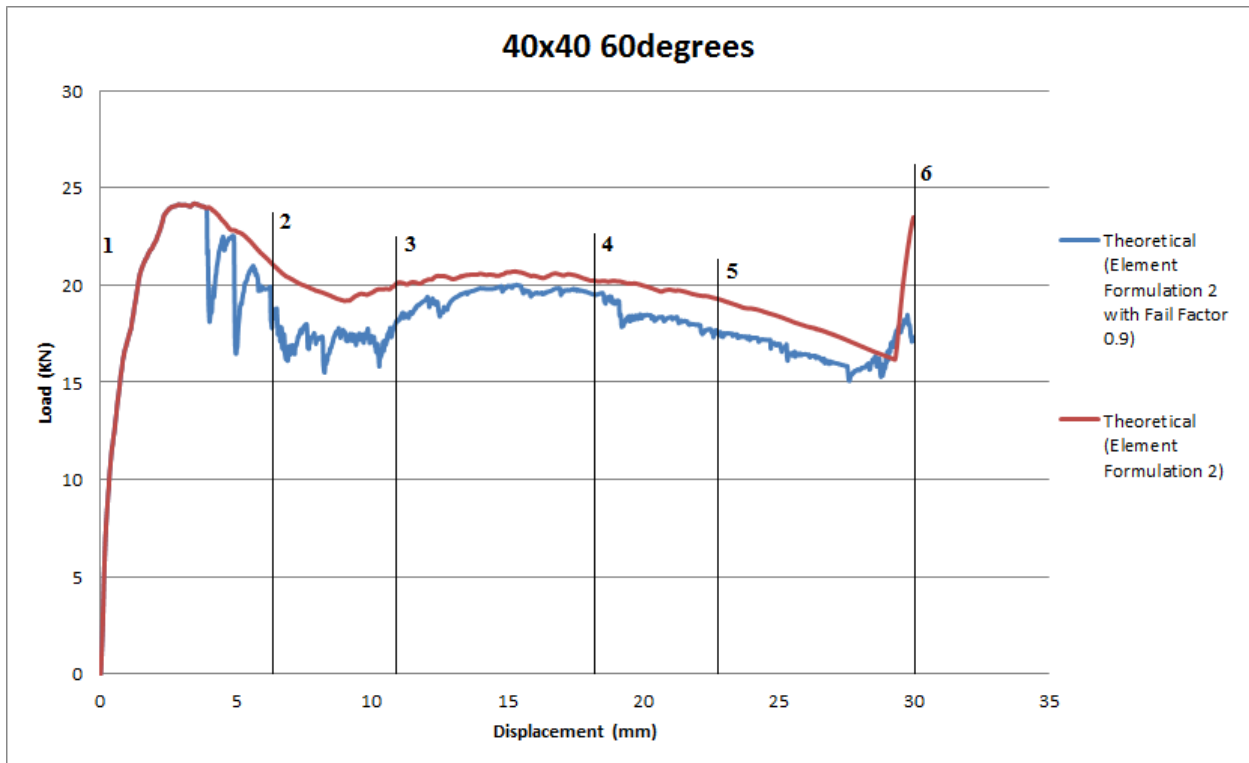


Element Formulation 2

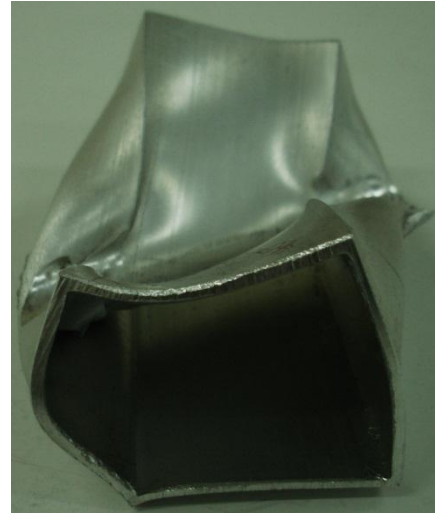


Element Formulation 1

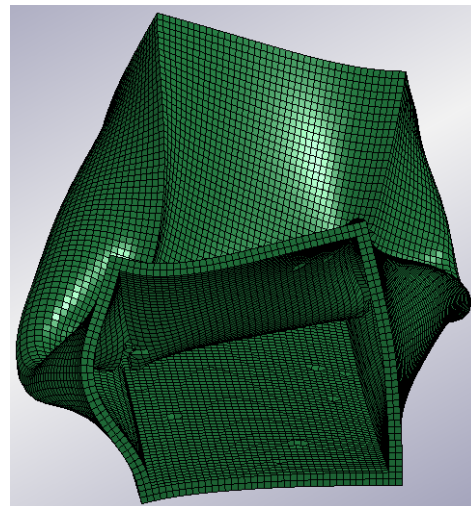
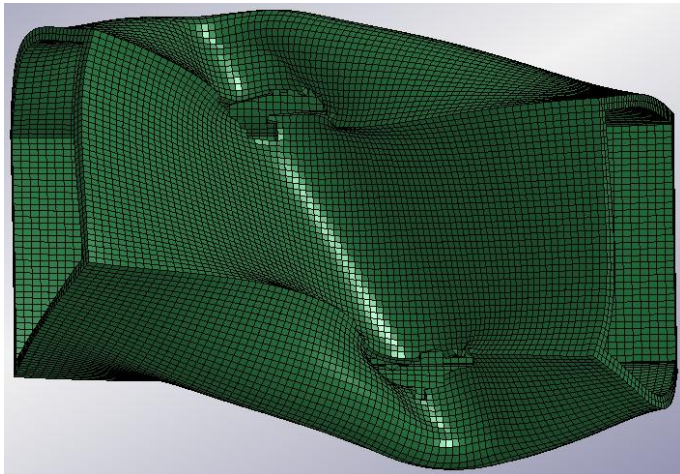
Στη συνέχεια για λόγους πληρότητας της μελέτης σχεδιάσαμε άλλο ένα μοντέλο, αλλά αυτή τη φορά εξετάσαμε την πιθανότητα θραύσης. Ύστερα από αρκετές επαναλήψεις με τη μέθοδο trial and error καταλήξαμε στην τιμή fail factor =0.9. Οι διαφορές της προσομοίωσης αυτής με την προηγούμενη στην οποία δεν εξετάζεται το ενδεχόμενο θραύσης φαίνονται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Διάγραμμα 3.27: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για το τετραγωνικό δοκίμιο 40x40 και για γωνία διείδυσης 60°



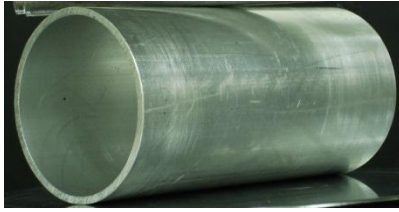
Πειραματικό δοκίμιο μετά την ολοκλήρωση της κατάρρευσης



Θεωρητικό μοντέλο με συντελεστή θραύσης μετά την ολοκλήρωση της κατάρρευσης

Παρατηρούμε ότι οι δύο θεωρητικές καμπύλες (με προσομοίωση θραύσης και χωρίς), βρίσκονται πολύ κοντά η μία στην άλλη ενώ μέχρι τα 3mm της κατάρρευσης όπου δεν έχει εμφανιστεί ακόμα θραύση συμπίπτουν. Η βασική τους διαφορά έγκειται στο μεγάλο θόρυβο που παρουσιάζει η πρώτη εξαιτίας της συνεχούς διαγραφής πεπερασμένων στοιχείων, που οδηγεί σε ακαθόριστη και απότομη ανανέωση των επαφών. Επίσης πρέπει να τονιστεί ότι το θεωρητικό μοντέλο παρουσίασε διαφορετικής φύσεως θραύση από το πειραματικό δοκίμιο όπως φαίνεται και στις εικόνες που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Παρ' όλα αυτά η καμπύλη της προσομοίωσης με θραύση είναι η θεωρητική καμπύλη με το μεγαλύτερο βαθμό ομοιότητας σε σχέση με την πειραματική όπως προκύπτει απ' τα διαγράμματα 3.26 και 3.27.

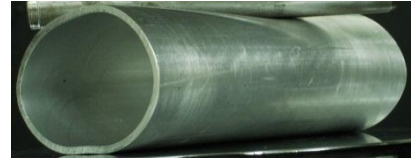
3.3.3: Κυλινδρικό κέλυφος διαστάσεων $\Phi 50 \times 2$ με γωνία διείδυσης 45°



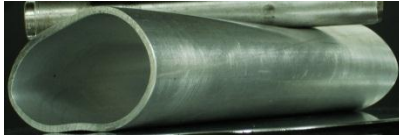
1(0mm)



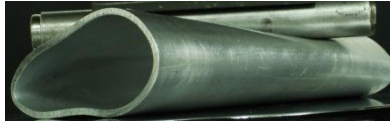
2(5.5mm)



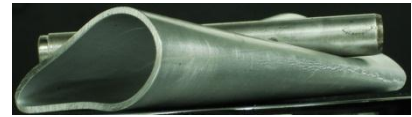
3(15.1mm)



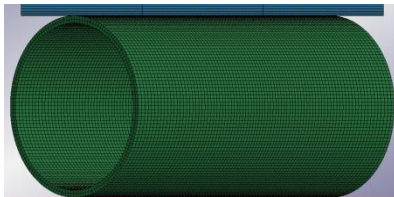
4(23.5mm)



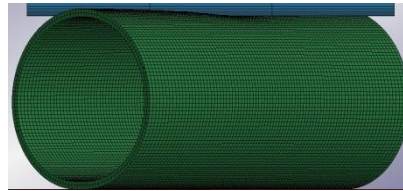
5(31mm)



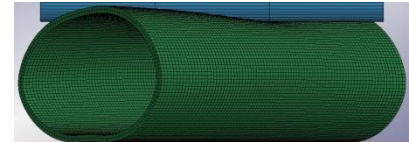
6(40mm)



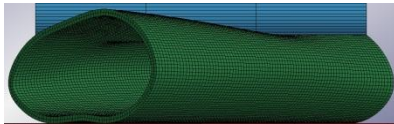
1(0mm)



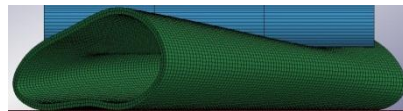
2(5.5mm)



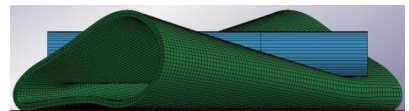
3(15.1mm)



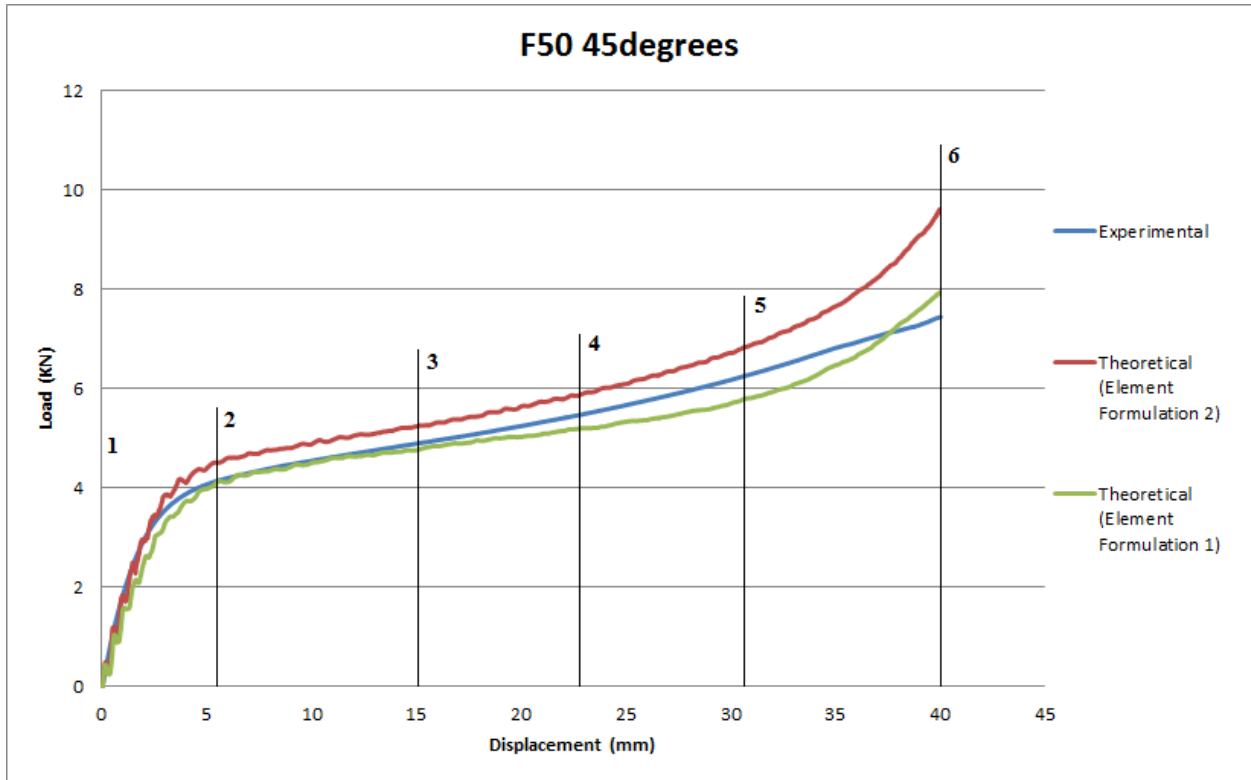
4(23.5mm)



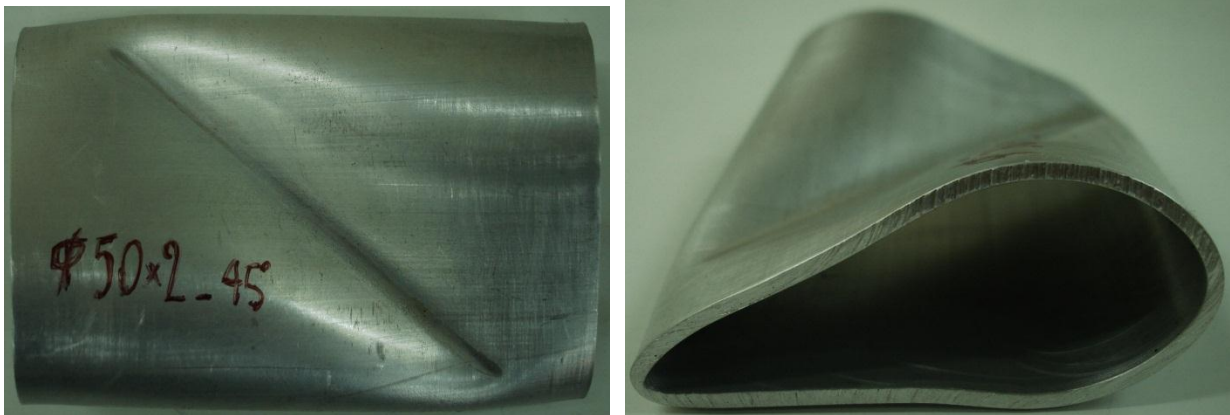
5(31mm)



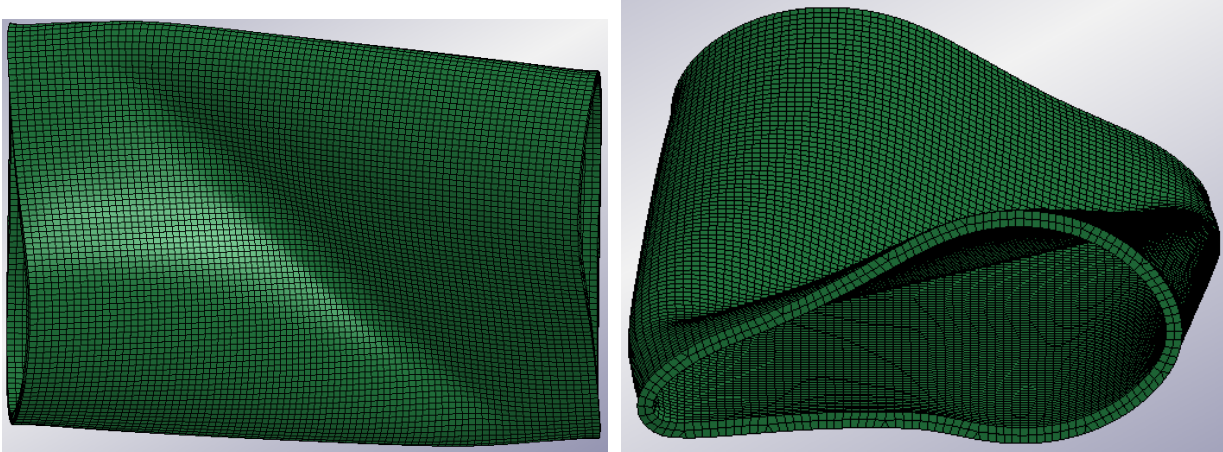
6(40mm)



Διάγραμμα 3.28: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για το κυλινδρικό δοκίμιο Φ50 και για γωνία διείδυσης 45°

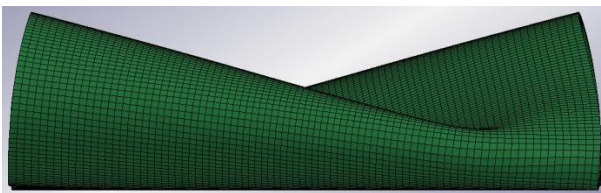


Πειραματικό δοκίμιο μετά την ολοκλήρωση της κατάρρευσης

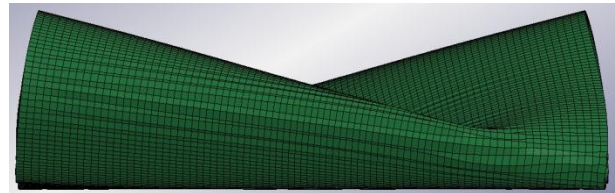


Θεωρητικό μοντέλο μετά την ολοκλήρωση της κατάρρευσης

Όπως ήταν άλλωστε αναμενόμενο και σε αυτή την περίπτωση που η διείδυση γίνεται με ενδιάμεσες γωνίες υπάρχει μεγάλη ομοιότητα μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων, ενώ ισχύουν φυσικά και όλες οι παρατηρήσεις που κάναμε μέχρι το σημείο αυτό όπως για παράδειγμα ότι η μέθοδος μοντελοποίησης που χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να εξαλειφθεί το φαινόμενο σχηματισμού κλεψύδρων κάνει το κέλυφος λίγο πιο στιβαρό απ' ότι είναι στην πραγματικότητα. Στο παρόν κέλυφος βέβαια όπως και στα υπόλοιπα κυλινδρικά κελύφη, το φαινόμενο αυτό είναι σχετικά περιορισμένο (σε σύγκριση με τα ορθογωνικά και τετραγωνικά), κάτι που φαίνεται και στις εικόνες που ακολουθούν:



Element Formulation 2

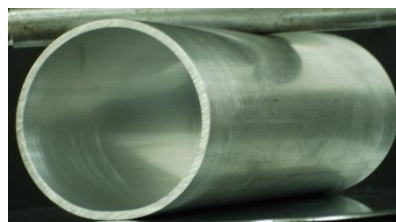


Element Formulation 1

3.3.4: Κυλινδρικό κέλυφος διαστάσεων $\Phi 50 \times 2$ με γωνία διείδυσης 60°



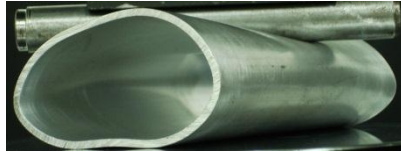
1(0mm)



2(7mm)



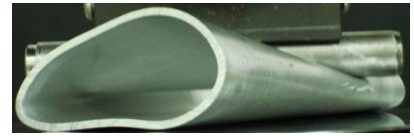
3(15mm)



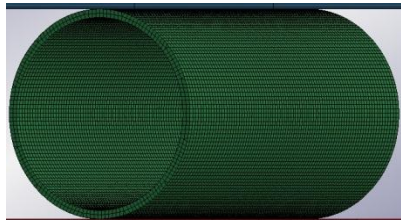
4(24.8mm)



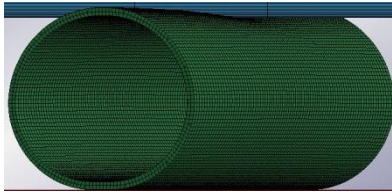
5(34.8mm)



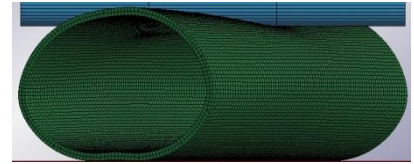
6(40mm)



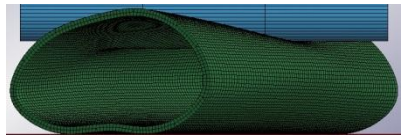
1(0mm)



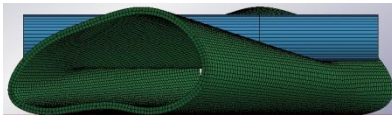
2(7mm)



3(15mm)



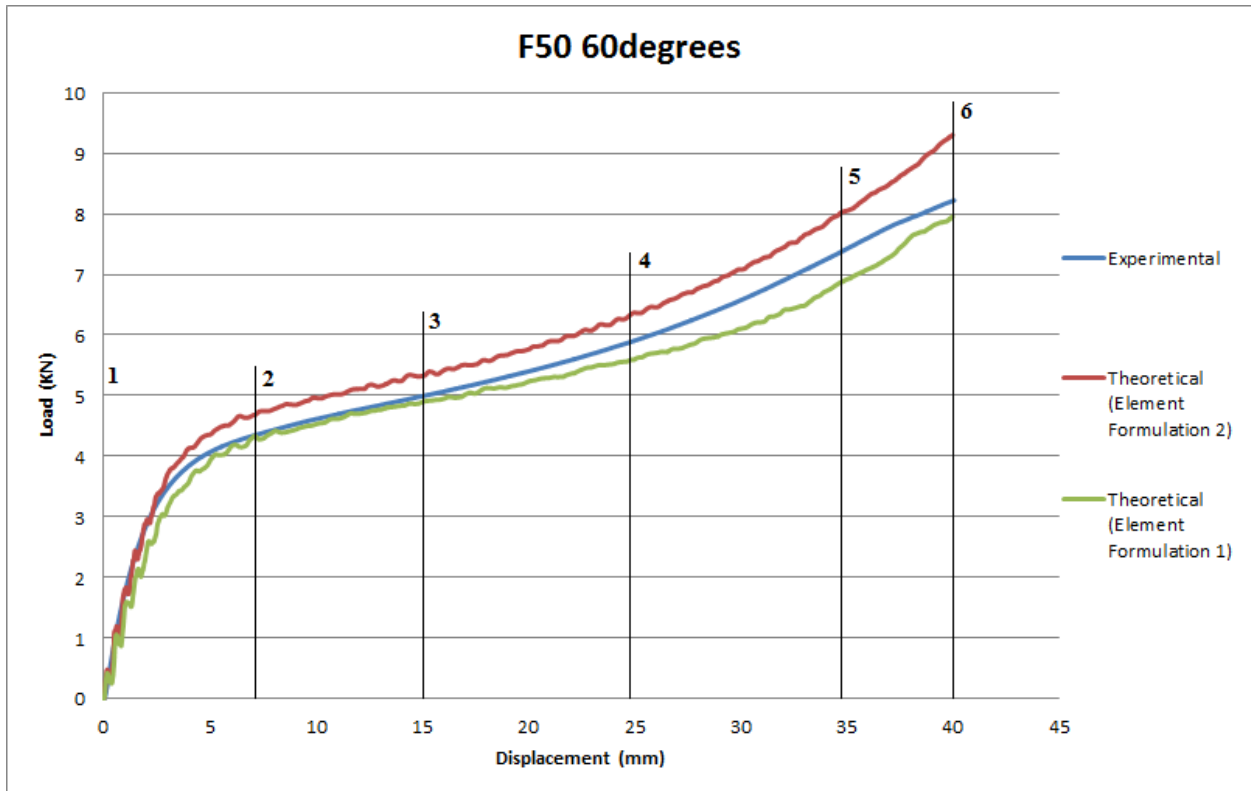
4(24.8mm)



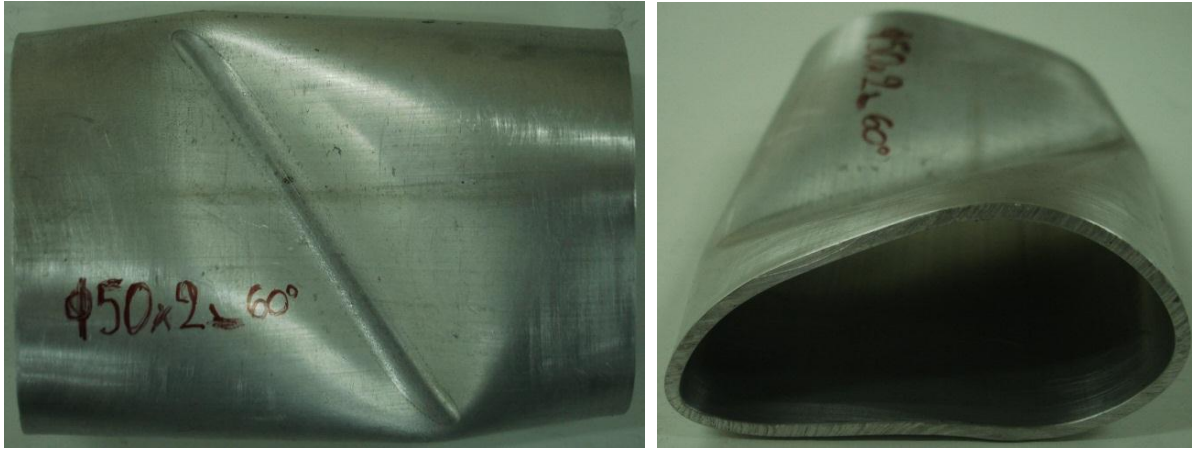
5(34.8mm)



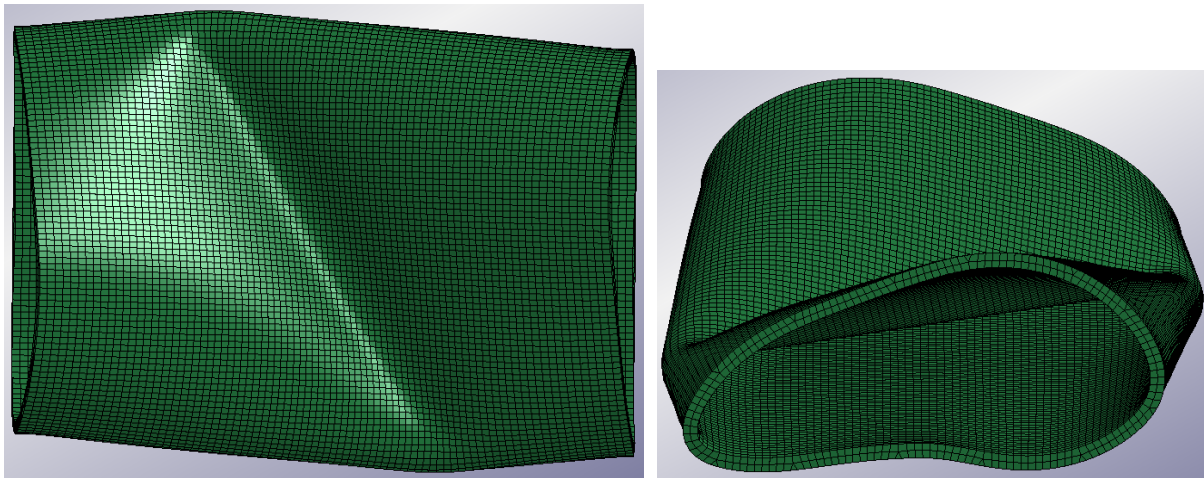
6(40mm)



Διάγραμμα 3.29: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για το κυλινδρικό δοκίμιο Φ50 και για γωνία διεύθυνσης 60°

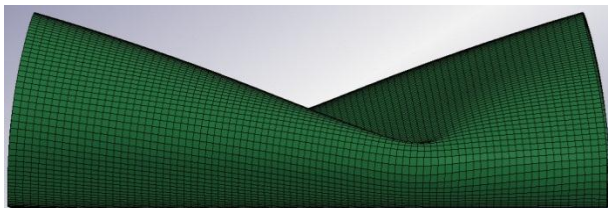


Πειραματικό δοκίμιο μετά την ολοκλήρωση της κατάρρευσης

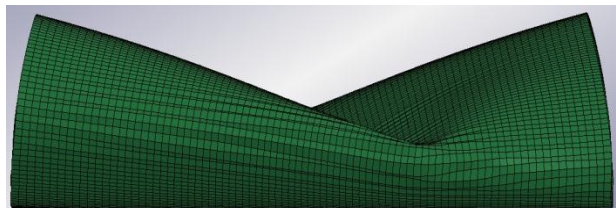


Θεωρητικό μοντέλο μετά την ολοκλήρωση της κατάρρευσης

Η περίπτωση αυτή που στο κυλινδρικό δοκίμιο $\Phi 50$ γίνεται διείσδυση υπό γωνία 60° είναι πανομοιότυπη με αυτή που περιγράψαμε προηγουμένως όπου η γωνία μεταξύ διείσδυτή και κελύφους ήταν 45° . Επομένως ισχύουν όσα είπαμε στην ενότητα 3.3.3 και δεν υπάρχει λόγος για περαιτέρω σχολιασμό.



Element Formulation 2



Element Formulation 1

3.4: Συγκέντρωση αποτελεσμάτων και σχολιασμός.

Τα αποτελέσματα των τεσσάρων πειραμάτων κατάρρευσης που παρουσιάστηκαν παραθέτονται στους πίνακες που ακολουθούν.

Γωνία μεταξύ διεισδυτή και κελύφους	Διαστάσεις δοκιμίου	Πειραματική καμπύλη	Θεωρητική καμπύλη (fully-integrated)	Θεωρητική καμπύλη (constant stress)
45°	40x40	25.53	25.33 (25.33)*	22.06
	Φ50	7.43	9.6	7.92
60°	40x40	26.75	24.19	23.06
	Φ50	8.22	9.3	7.95

Πίνακας 3.1: Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο σε KN

Γωνία μεταξύ διεισδυτή και κελύφους	Διαστάσεις δοκιμίου	Πειραματική καμπύλη	Θεωρητική καμπύλη (fully-integrated)	Θεωρητική καμπύλη (constant stress)
45°	40x40	15.8	18.83 (17.52)*	16.77
	Φ50	5.24	5.75	5.02
60°	40x40	18.23	19.75	18.87
	Φ50	5.49	5.9	5.21

Πίνακας 3.2: Μέσο αναπτυσσόμενο φορτίο σε KN

Γωνία μεταξύ διεισδυτή και κελύφους	Διαστάσεις δοκιμίου	Πειραματική καμπύλη	Θεωρητική καμπύλη (fully-integrated)	Θεωρητική καμπύλη (constant stress)
45°	40x40	0.619	0.744 (0.692)*	0.76
	Φ50	0.705	0.6	0.634
60°	40x40	0.681	0.816	0.775
	Φ50	0.667	0.635	0.656

Πίνακας 3.3: Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου

Γωνία μεταξύ διεισδυτή και	Διαστάσεις δοκιμίου	Πειραματική καμπύλη	Θεωρητική καμπύλη (fully-	Θεωρητική καμπύλη
			καμπύλη	

κελύφους			integrated)	(constant stress)
45°	40x40	473.9	565 (525.65)*	503.04
	Φ50	209.5	229.85	200.82
60°	40x40	546.9	592.56	536.21
	Φ50	219.4	236.11	208.56

Πίνακας 3.4: Απορροφηθείσα ενέργεια παραμόρφωσης σε J.

*Οι τιμές που βρίσκονται μέσα στις παρενθέσεις αντιστοιχούν σε προσομοίωση που περιλαμβάνει και μοντελοποίηση της θραύσης μέσω ενός κατάλληλου συντελεστή (fail factor) που συμπληρώνεται στις ιδιότητες του υλικού του δοκιμίου. Στην παραπάνω περίπτωση αυτό έχει τιμή 0,85.

Από όσα προηγήθηκαν στο τρίτο κεφάλαιο, σχετικά με την επίδραση της γωνίας διείδυσης στον τρόπο κατάρρευσης το κελυφών, καταλήγουμε στα παρακάτω συμπεράσματα:

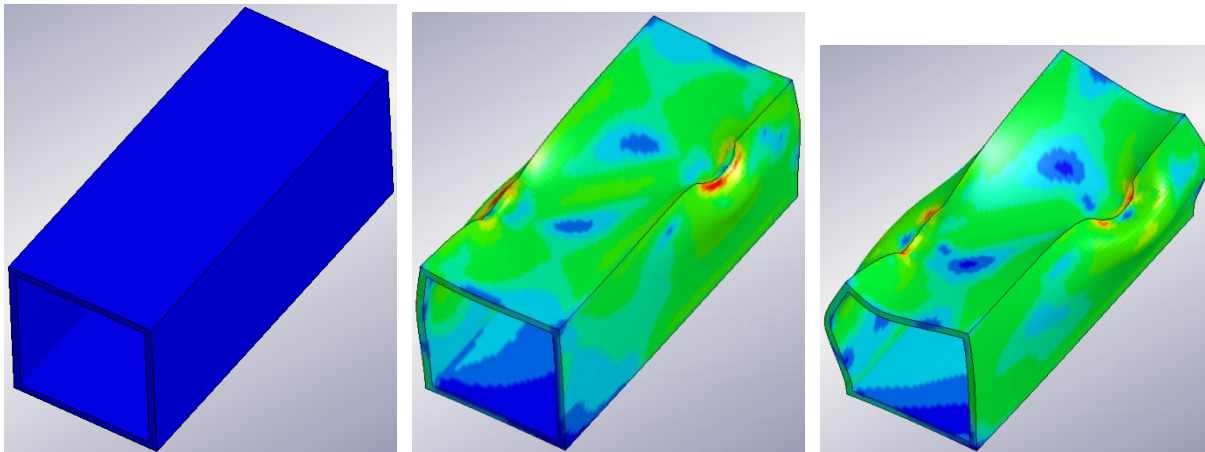
- Η ιδανική γωνία μεταξύ διείδυτη και κελύφους στα ορθογωνικά και τετραγωνικά δοκίμια βρίσκεται μεταξύ 50°-75° ανάλογα με τις ακριβείς διαστάσεις του δοκιμίου ενώ όλες οι γωνίες που είναι μεγαλύτερες από τις εκάστοτε ιδανικές, δίνουν και αυτές αποτελέσματα πολύ κοντά στα βέλτιστα.
- Στα κυλινδρικά δοκίμια παρατηρούμε ότι όσο μεγαλώνει η παραπάνω γωνία τόσο πιο στιβαρό είναι το δοκίμιο και επιπλέον για μεγάλες γωνίες (μεγαλύτερες από 50°, η αύξηση της γωνίας οδηγεί και σε αύξηση του συντελεστή ομοιομορφίας φορτίου (οι βέλτιστες τιμές του οποίου όμως βρίσκονται στο φάσμα 15°-20°). Με βάση τα παραπάνω καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι στην περίπτωση των κυλινδρικών κελυφών για βέλτιστο αποτέλεσμα από τεχνολογικής και οικονομικής σκοπιάς επιλέγουμε ο διείδυτης να είναι κάθετος ως προς το κέλυφος, ενώ για ιδανικό αποτέλεσμα από καθαρά τεχνολογικής σκοπιάς επιλέγουμε γωνία διείδυσης στο εύρος 15°-20° και οδηγούμαστε σε βέλτιστο (πολύ κοντά στη μονάδα) δείκτη ομοιομορφίας φορτίου.
- Σε όλα τα δοκίμια παρατηρούμε μια απότομη πτώση του συντελεστή ομοιομορφίας φορτίου περίπου στην περιοχή μεταξύ 30°-45° (εξαρτάται από το εκάστοτε δοκίμιο). Συνεπώς η διείδυση υπό αυτές τις γωνίες θα πρέπει να αποφεύγεται διότι εκτός των άλλων αυξάνει τις πιθανότητες να εμφανιστεί θραύση στο κέλυφος, κάτι που συνέβει σε μεγάλη έκταση στο πείραμα της ενότητας 3.3.1 που η γωνία

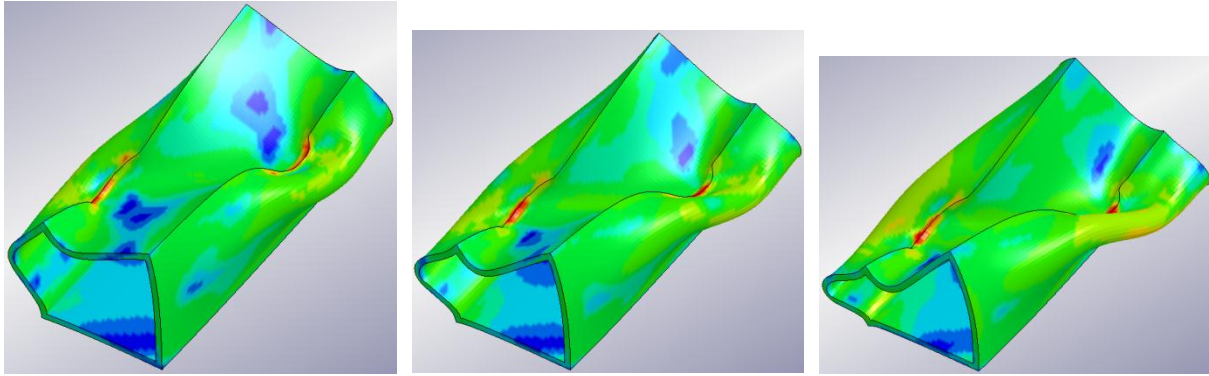
κελύφους διεισδυτή είναι 45° αλλά σαφώς πιο περιορισμένα στην περίπτωση της ενότητας 3.3.2 που η γωνία ήταν 60° .

- Όσα σχολιάσαμε στο δεύτερο κεφάλαιο για τις διαφορές που υπάρχουν ανάμεσα στις δύο θεωρητικές καμπύλες, την ομοιότητά τους με την πειραματική αλλά και το φαινόμενο σχηματισμού κλεψύδρων ισχύουν και στην περίπτωση διείσδυσης με ενδιάμεση γωνία. Για το λόγο αυτό δεν έχει νόημα να σχολιαστούν για άλλη μια φορά.
- Όπως διαπιστώσαμε και στα παραδείγματα των ενοτήτων 3.3.1 και 3.3.2 η θραύση του κελύφους (ακόμα και αν είναι έντονη) δεν οδηγεί σε αχρήστευσή του αλλά μειώνει (και συνήθως λίγο) την ικανότητά του να απορροφά κινητική ενέργεια.
- Ο τρόπος ανάπτυξης τάσεων στο κέλυφος κατά τη φόρτίσή του με ενδιάμεσες γωνίες καθώς και η πλαστική παραμόρφωση που εμφανίζεται σ' αυτό, η οποία καθορίζει και τον τρόπο κατάρρευσής του παρουσιάζεται στις εικόνες που ακολουθούν. Για λόγους συντομίας και χωρίς βλάβη της γενικότητας επιλέξαμε να μελετήσουμε το τετραγωνικό δοκίμιο 40x40 (καθώς όλα τα τετραγωνικά και ορθογωνικά δοκίμια παρουσιάζουν ομοιότητα στον τρόπο κατάρρευσης) και το κυλινδρικό δοκίμιο $\Phi 50$, αμφότερα για γωνία διείσδυσης 45° .

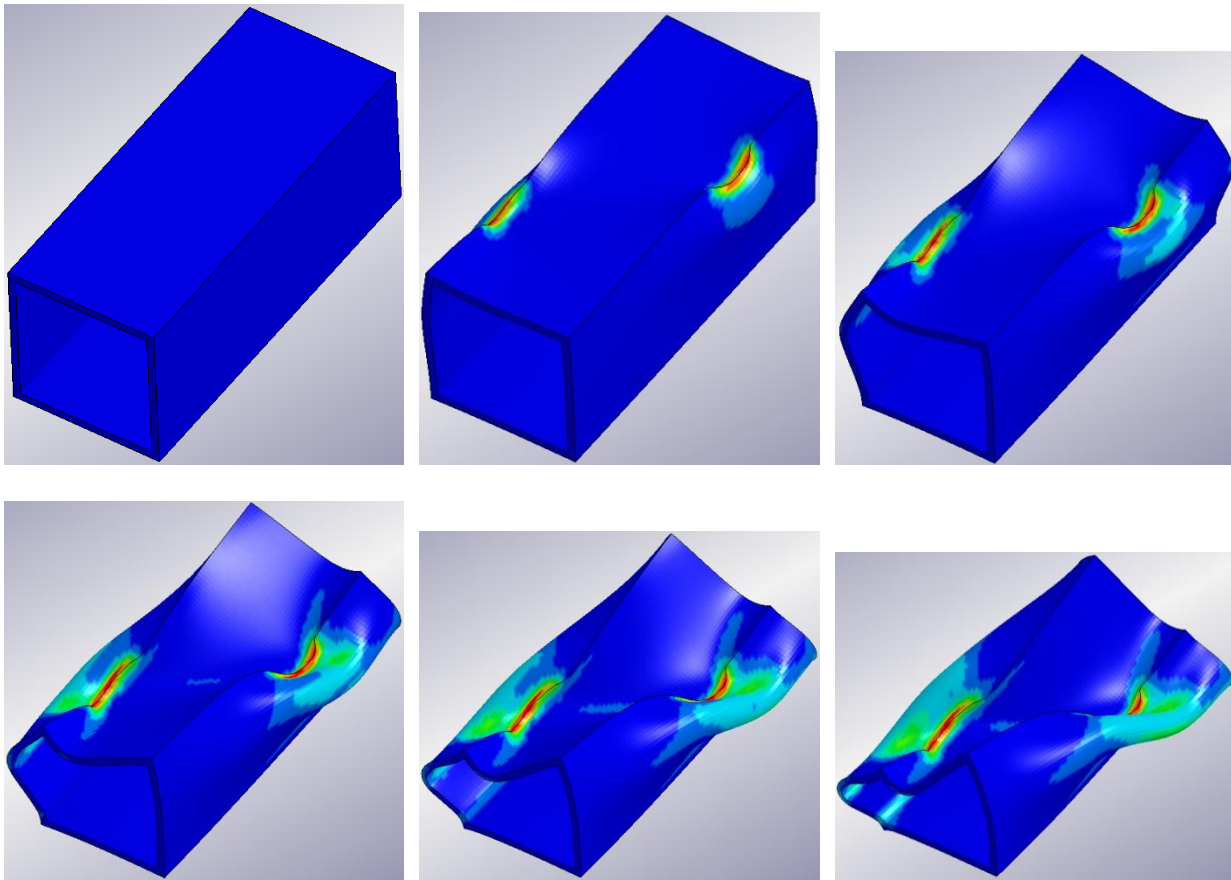
Τετραγωνικό 40x40 με γωνία διείσδυσης 45°

Von Mises stress



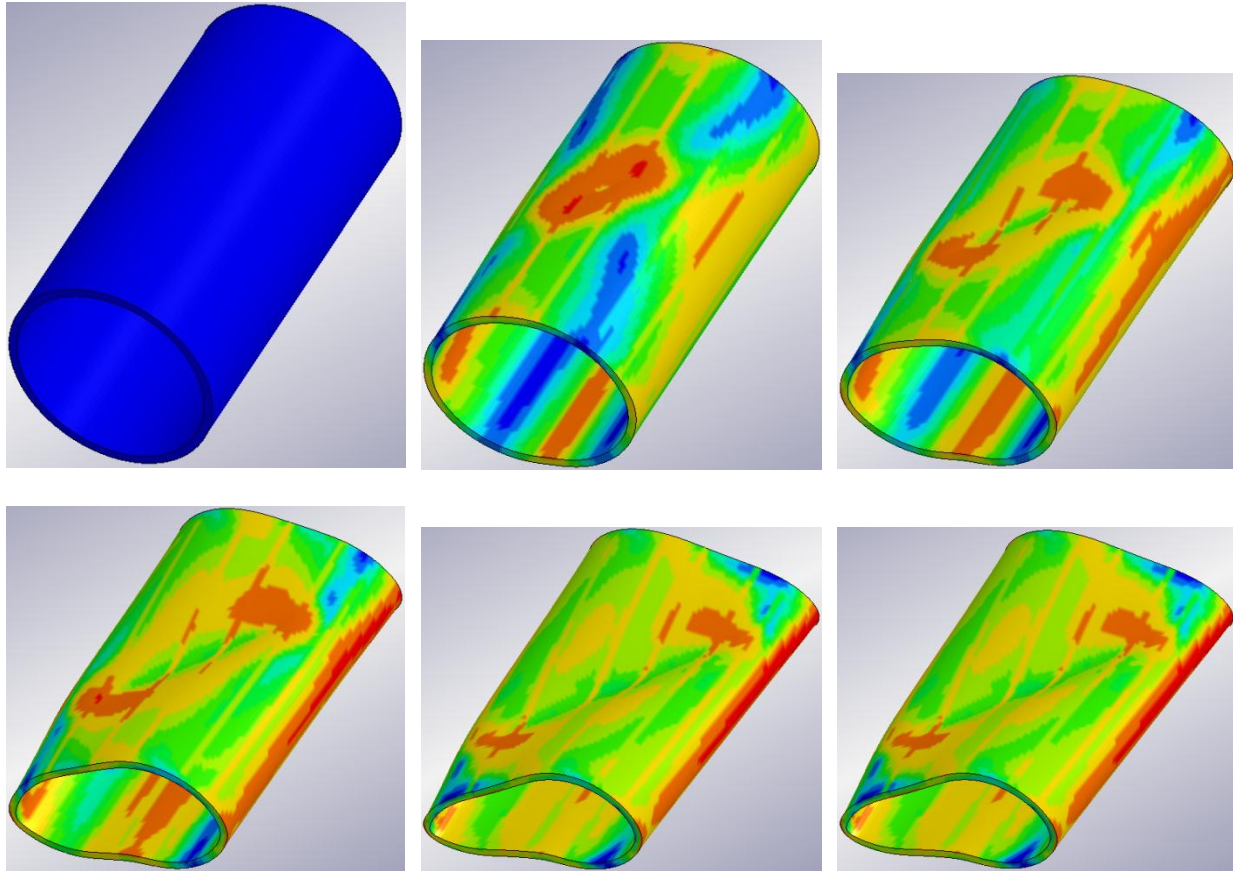


Plastic strain

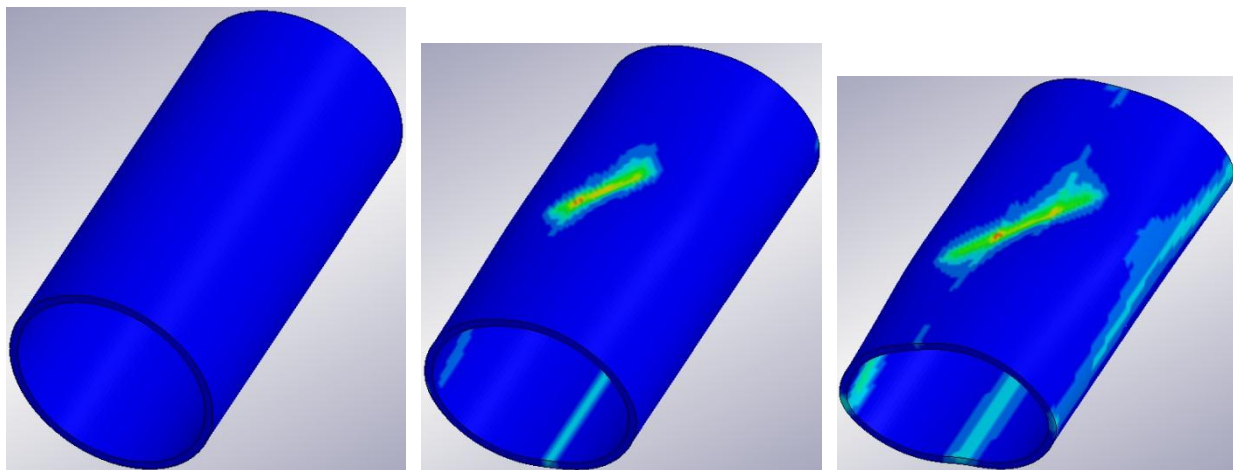


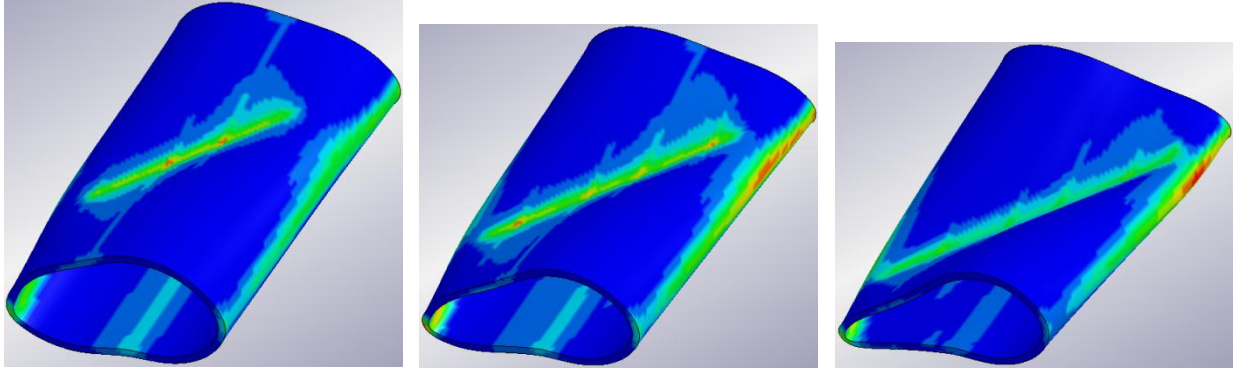
Κυλινδρικό Φ50 με γωνία διείδουσης 45°

Von Mises stress



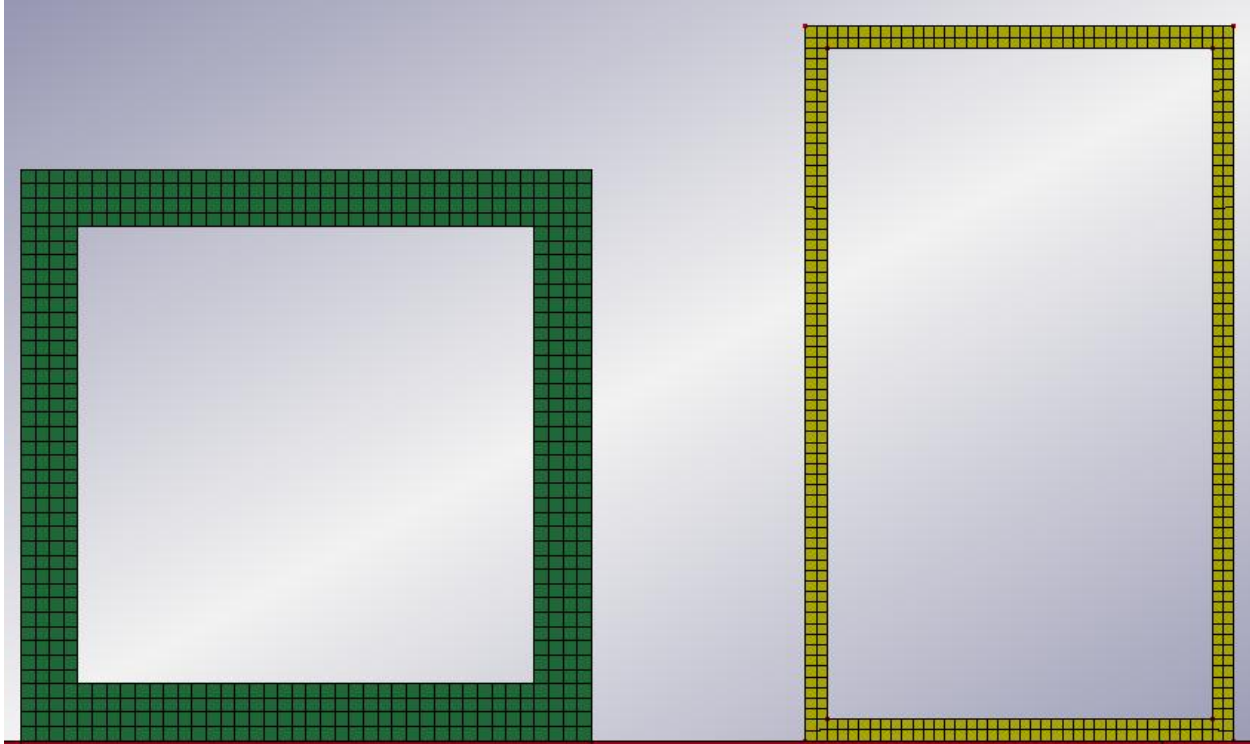
Plastic strain





ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΣΤΟΝ ΤΡΟΠΟ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ.

Σε όλα τα πειράματα και όλα τα υπολογιστικά μοντέλα που μας αποσχόλησαν μέχρι στιγμής, το πάχος των τοιχωμάτων των δοκιμίων ήταν πάντα σταθερό στα 2mm. Σε αυτό το κεφάλαιο μελετάται ο τρόπος που η μεταβολή αυτού επηρεάζει τη διαδικασία κατάρρευσης του δοκιμίου. Προφανώς και με την αύξηση του πάχους αυξάνεται και το μέσο φορτίο, οπότε και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του δοκιμίου. Απ' την άλλη μεριά η εμφάνιση φορτίων είναι κάτι που προσπαθούμε να αποφύγουμε σε έναν ενεργειακό απορροφητή. Στόχος είναι να αναπτύσσονται μικρές και σταθερές δυνάμεις με ταυτόχρονη μεγάλη απορρόφηση ενέργειας, άρα βασικό ζητούμενο είναι ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου να είναι όσο το δυνατό πιο κοντά στη μονάδα. Επομένως στο κεφάλαιο αυτό δε θα αναζητήσουμε κάποια βέλτιστη λύση αλλά θα παραθέσουμε και θα σχολιάσουμε ορισμένες καμπύλες φορτίου-βράχυνσης που αντιστοιχούν σε κελύφη με διαφορετικό πάχος τοιχωμάτων, ώστε να καταλήξουμε σε κάποια συμπεράσματα σχετικά με τον τρόπο επίδρασης του πάχους των τοιχωμάτων του κελύφους στην κατάρρευσή του. Όλες οι μοντελοποιήσεις που παρουσιάζονται έγιναν με τη διαμόρφωση fully-integrated solid element formulation, διότι σε αντίθετη περίπτωση ο σχηματισμός κλεψύδρων ήταν τόσο έντονος (λόγω της αύξησης πάχους άρα και συγκέντρωσης τάσεων) που το κέλυφος παραμορφωνόταν τόσο έντονα και αφύσικα ώστε τα αποτελέσματα που παίρναμε ήταν αμφιβόλου αξιοπιστίας. Επίσης διατηρήθηκε το μέγιστο μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων του 1mm που είχαμε ορίσει απ' την αρχή της εργασίας, ενώ σε ακόμα και στα πολύ λεπτότοιχα μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν δύο τουλάχιστο elements κατά το πάχος των τοιχωμάτων όπως φαίνεται και στην εικόνα που ακολουθεί. Απ' τον κανόνα αυτόν εξαιρούνται τα κελύφη με μεγάλο πάχος τοιχωμάτων στα οποία μπορεί να έχουμε elements λίγο μεγαλύτερα από 1mm, καθώς η περαιτέρω αύξηση της πυκνότητας της διακριτοποίησης παρατηρήθηκε ότι δεν επηρεάζει καθόλου το τελικό αποτέλεσμα παρά μόνο αυξάνει την (ήδη μεγάλη για τα μοντέλα κελυφών με μεγάλο πάχος τοιχωμάτων) απαιτούμενη επεξεργαστική ισχύ.



Εικόνα 4.1: Απεικόνιση της διακριτοποίησης των τομών του τετραγωνικού κελύφους 40x40 με πάχος τοιχωμάτων 4mm (αριστερά) και του ορθογωνικού 50x30 με πάχος 1.5mm (δεξιά). Η εικόνα πάρθηκε από το περιβάλλον του προεπεξεργαστή LS-PrePost.

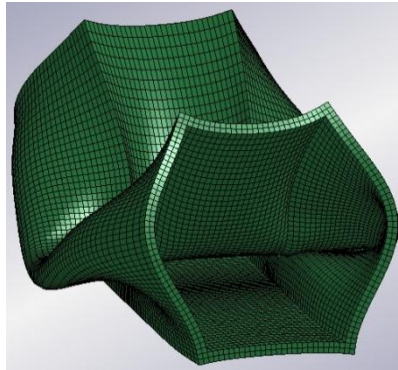
Τέλος σε όλα τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν ο διεισδυτής και το δοκίμιο ήταν κάθετα μεταξύ τους (επομένως και η αντίστοιχη διακριτοποίηση είναι πιο πυκνή κοντά στην περιοχή της επαφής τους). Η επιλογή αυτής της γωνίας έγινε αφ' ενός με σκοπό και στα ορθογωνικά και τετραγωνικά αλλά και στο κυλινδρικό κέλυφος να έχουμε επιθυμητά αποτελέσματα τόσο ως προς τη στιβαρότητα όσο και ως προς την ομοιομορφία φόρτισης και αφ' εταίρου για να υπάρχει η ανάγκη η διακριτοποίηση να είναι πυκνή μόνο σε μια μικρή περιοχή του κελύφους που συνεπάγεται μοντέλα που απαιτούν μικρότερους υπολογιστικούς πόρους για την επίλυσή τους.

4.1: Παρουσίαση αποτελεσμάτων

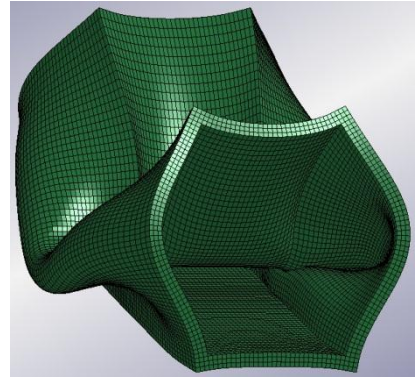
4.1.1: Ορθογωνικό κέλυφος διαστάσεων 50x30 κατά μήκος της μεγάλης πλευράς



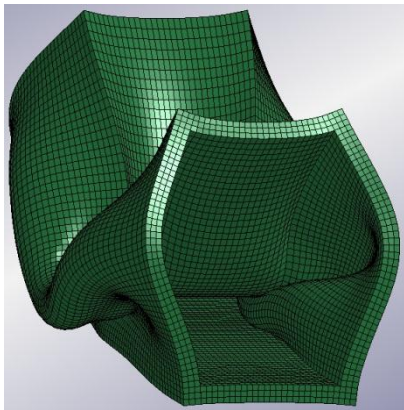
1.5mm



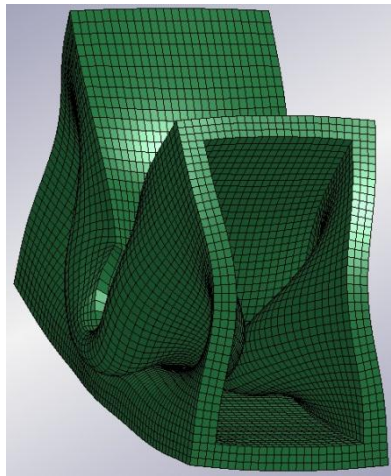
2mm



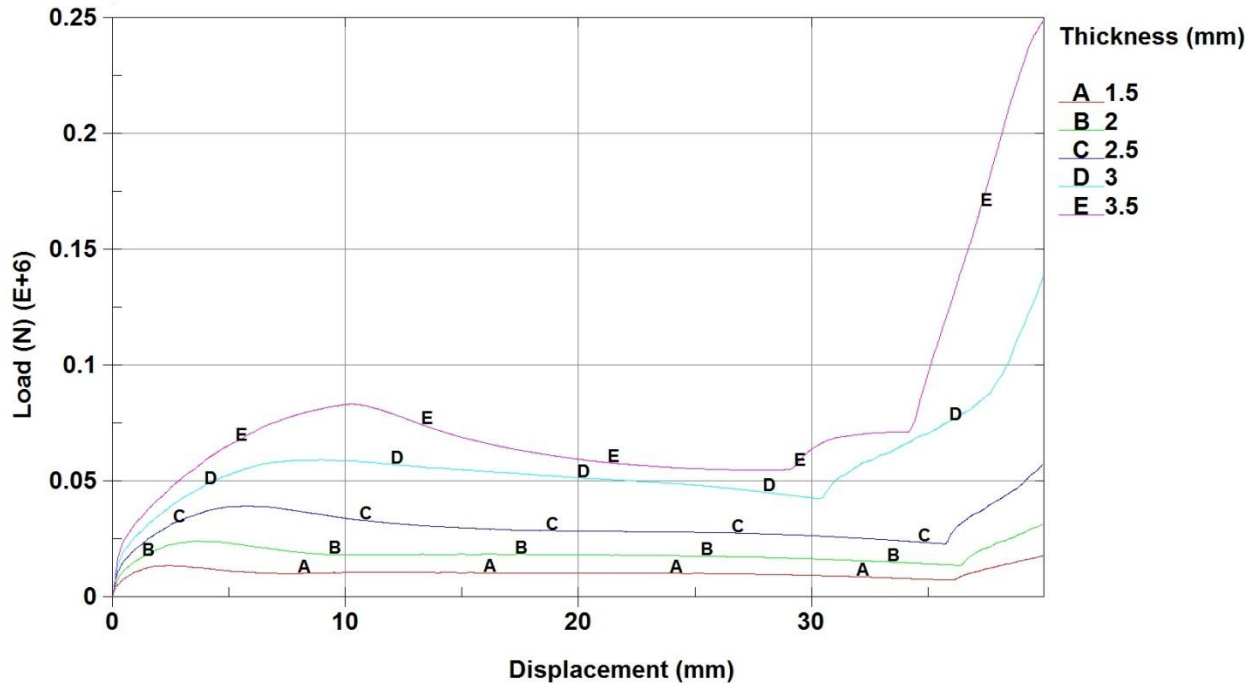
2.5mm



3mm



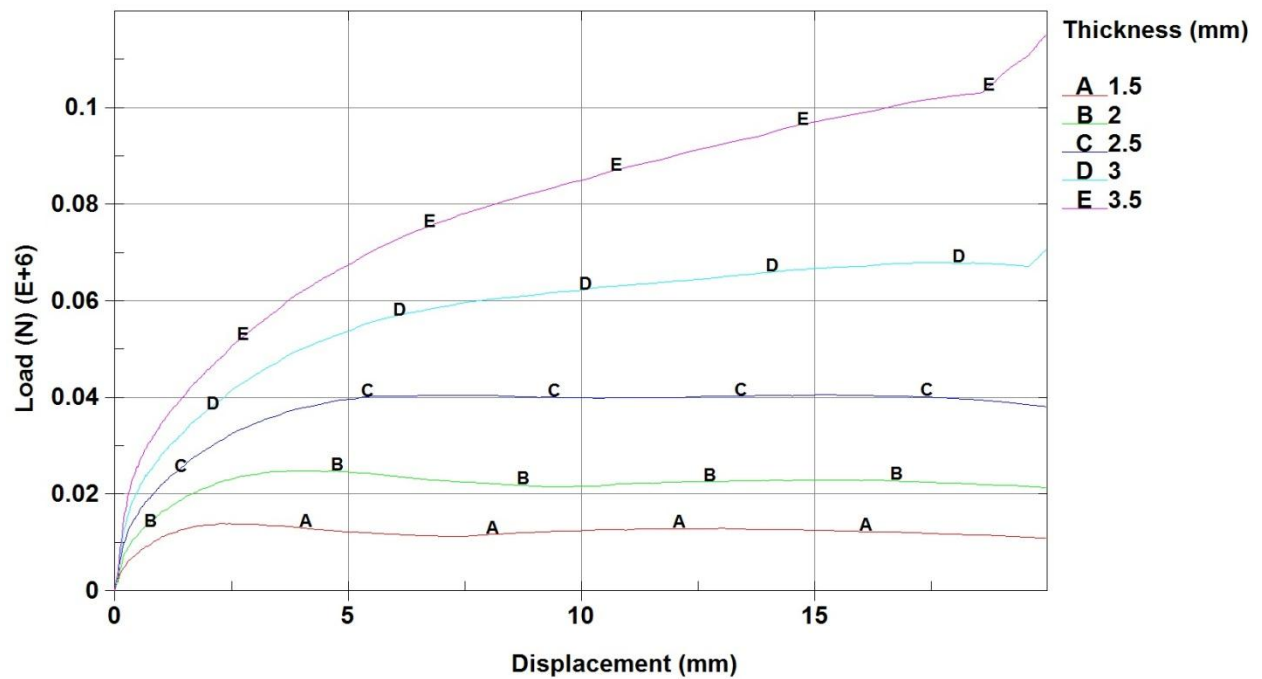
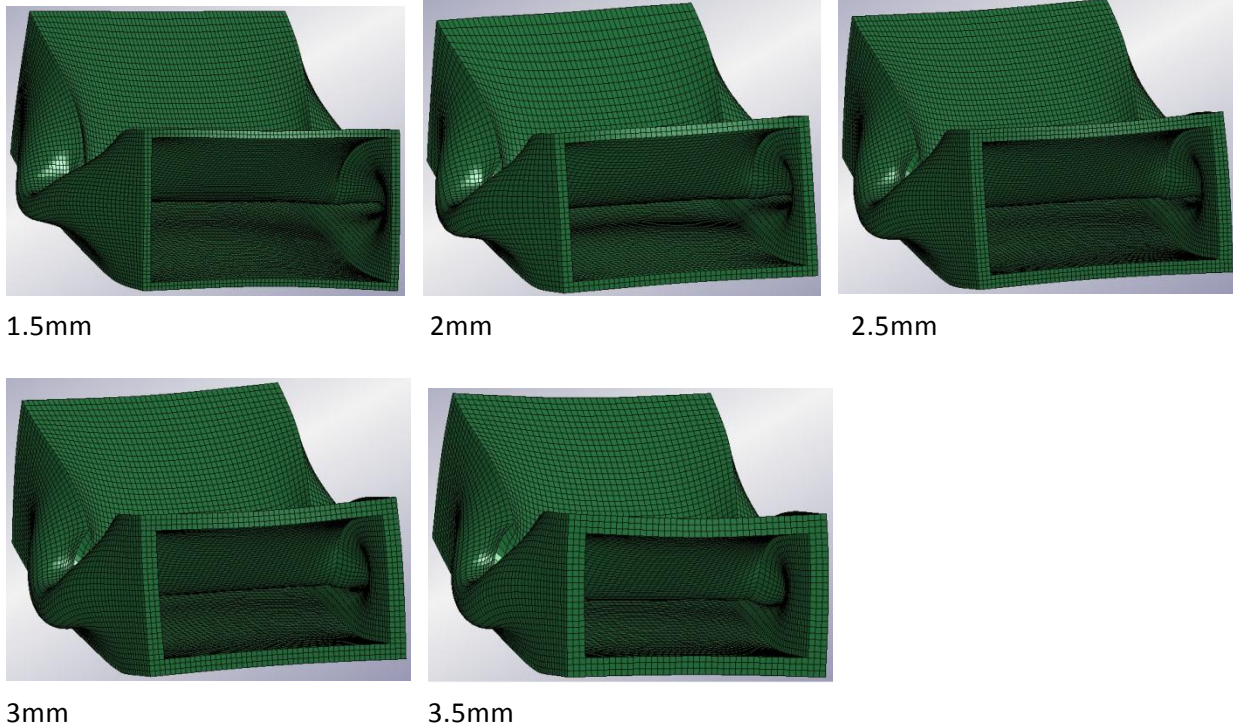
3.5mm



Διάγραμμα 4.1: Επίδραση του πάχους των τοιχωμάτων του ορθογωνικού κελύφους 50x30 στον τρόπο κατάρρευσής του, για διείσδυση κατά μήκος της μεγάλης πλευράς

Από τις παραπάνω εικόνες παρατηρούμε ότι ο τρόπος κατάρρευσης αλλάζει ριζικά με την αύξηση του πάχους του κελύφους. Τα λεπτότοιχα κελύφη όπως είδαμε και προηγουμένως καταρρέουν σχηματίζοντας προοδευτικά πλαστικούς αρμούς προς την εξωτερική πλευρά του κελύφους, σε αντίθεση με αυτά με μεγάλο πάχος που οι πλαστικοί αρμοί τους τείνουν να κινούνται και προς την εσωτερική μεριά του κελύφους. Τη στιγμή που αυτοί ακουμπήσουν μεταξύ τους έχει περιοριστεί ο διαθέσιμος χώρος για επιπλέον κατάρρευση και το έμβολο συμπιέζει πλέον συμπαγές υλικό, κάτι που φαίνεται και από την απότομη αύξηση που υπάρχει στις καμπύλες D και E (3mm και 3.5mm πάχος τοιχωμάτων αντίστοιχα).

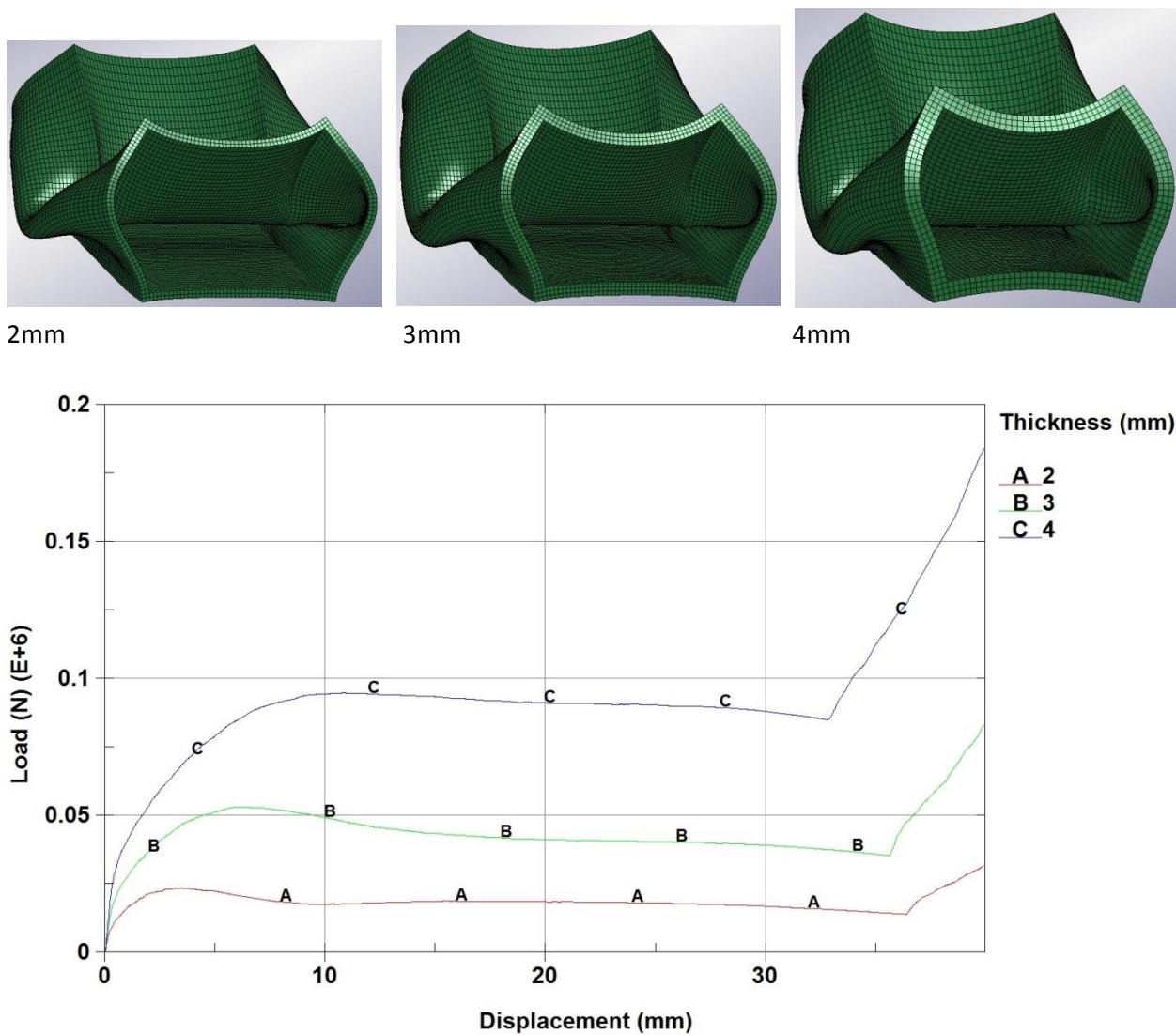
4.1.2: Ορθογωνικό κέλυφος διαστάσεων 50x30 κατά μήκος της μικρής πλευράς



Διάγραμμα 4.2: Επίδραση του πάχους των τοιχωμάτων του ορθογωνικού κελύφους 50x30 στον τρόπο κατάρρευσής του, για διείδυση κατά μήκος της μικρής πλευράς

Σε αυτή την περίπτωση όπου το ορθογωνικό κέλυφος 50x30 καταρρέει κατά μήκος της μικρής του πλευράς παρατηρούμε ότι όσο και να αυξήσουμε το πάχος, ο τρόπος κατάρρευσής του παραμένει ίδιος. Επίσης από το διάγραμμα 4.2 βλέπουμε ξεκάθαρα πως για πάχος τοιχωμάτων μεγαλύτερο από 2.5mm ο συντελεστής ομοιομορφίας φορτίου μειώνεται απότομα καθώς οι συναρτήσεις φορτίου βράχυνσης γίνονται πλέον γνησίως αύξουσες και χάνουν το γνωστό σχήμα που έχουμε παρατηρήσει σε όλα τα λεπτότοιχα ορθογωνικά και τετραγωνικά κελύφη μέχρι στιγμής.

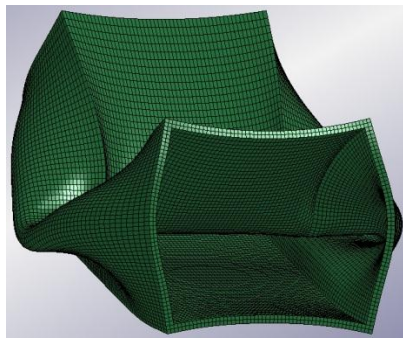
4.1.3: Τετραγωνικό κέλυφος διαστάσεων 50x50



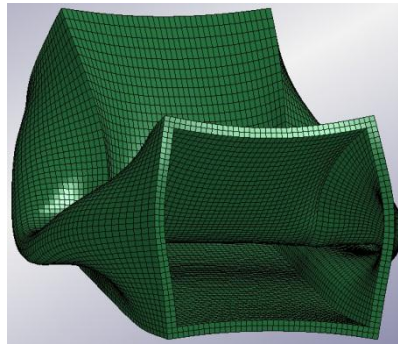
Διάγραμμα 4.3: Επίδραση του πάχους των τοιχωμάτων του τετραγωνικού κελύφους 50x50 στον τρόπο κατάρρευσής του

Ο τρόπος κατάρρευσης είναι όμοιος και στα τρία θεωρητικά δοκίμια που μελετήθηκαν, με μοναδική διαφορά την τάση των λεπτότοιχων τοιχωμάτων να καταρρέουν δημιουργώντας μεγαλύτερους, σε σχέση με τα κελύφη με μεγάλο πάχος τοιχώματος, σε έκταση πλαστικούς αρμούς και κατ' επέκταση τελικό δοκίμιο (μετά την κατάρρευση) με μεγαλύτερο πλάτος.

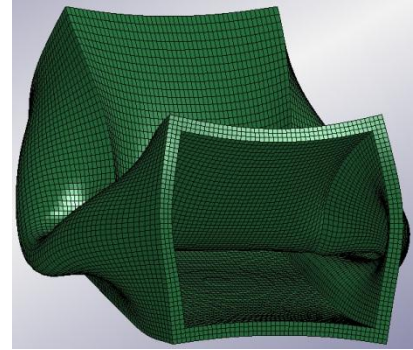
4.1.4: Τετραγωνικό κέλυφος διαστάσεων 40x40



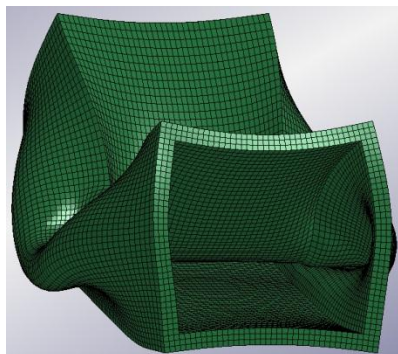
1.5mm



2mm



2.5mm



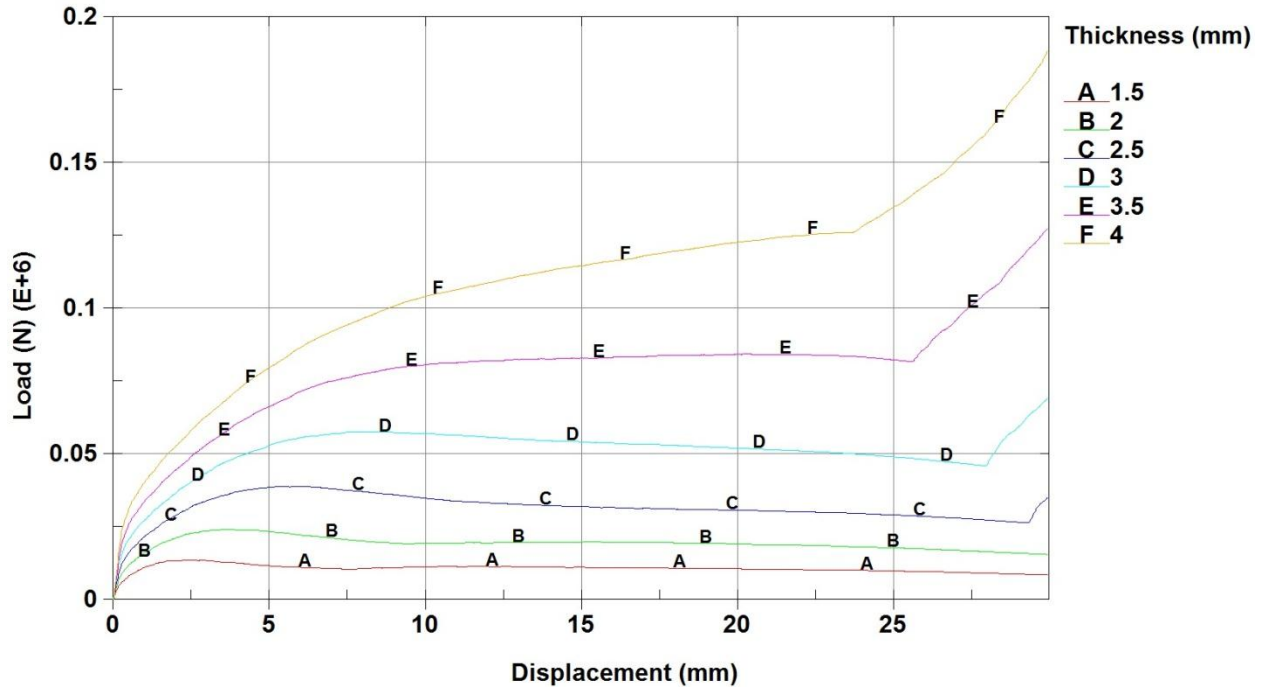
3mm



3.5mm



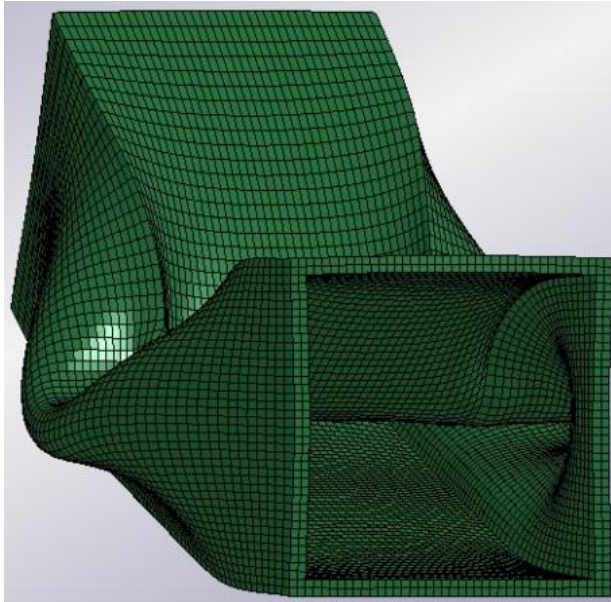
4mm



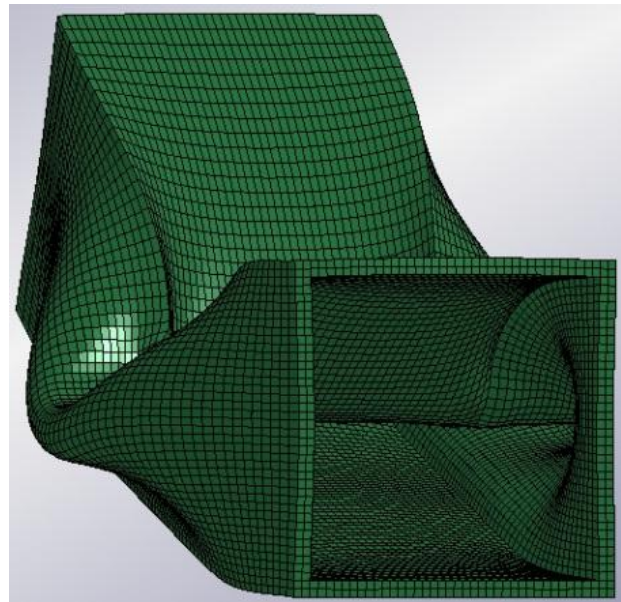
Διάγραμμα 4.4: Επίδραση του πάχους των τοιχωμάτων του τετραγωνικού κελύφους 40x40 στον τρόπο κατάρρευσής του

Το τετραγωνικό κέλυφος 40x40 ήταν το δοκίμιο με ενδιάμεσες διαστάσεις σε σχέση με τα άλλα δύο τετραγωνικά που μελετήθηκαν (50x50 και 30x30) και για το λόγο αυτό το επιλέξαμε για να κάνουμε μια πολύ εκτενή μελέτη της επίδρασης του πάχους των τοιχωμάτων του στον τρόπο κατάρρευσής του, κάνοντας προσομοιώσεις για έξι διαφορετικές τιμές αυτού απ' το υπερβολικά λεπτότοιχο πάχους 1.5mm έως το αρκετά στιβαρό με πάχος 4mm. Ο τρόπος κατάρρευσης δεν αλλάζει ιδιαίτερα με την αύξηση του πάχους με εξαίρεση την παρατήρηση που κάναμε και προηγουμένως σχετικά με το πλάτος των πλαστικών αρμών που σχηματίζονται. Επίσης όπως φαίνεται και από τις παραπάνω τελικές εικόνες, όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος των τοιχωμάτων του κελύφους, τόσο πιο νωρίς παρουσιάζεται η απότομη αύξηση του αναπτυσσόμενου φορτίου που μεταφράζεται σε συμπίεση συμπαγούς υλικού (29, 27.5, 26 και 23.5mm για πάχος τοιχωμάτων 2.5, 3, 3.5 και 4mm αντίστοιχα).

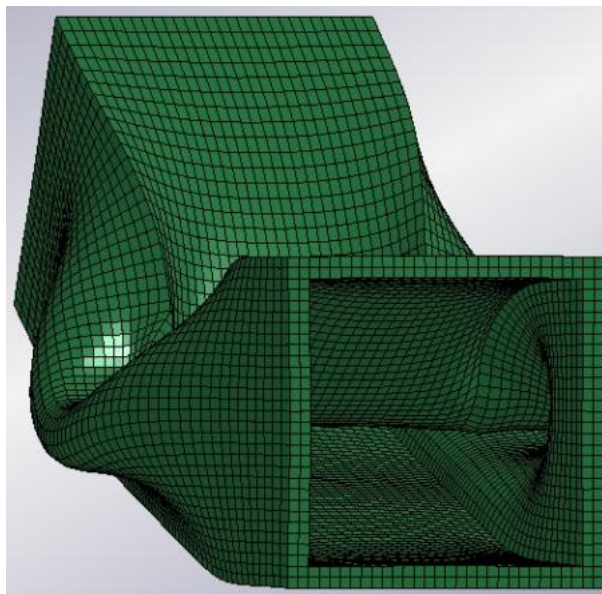
4.1.5: Τετραγωνικό κέλυφος διαστάσεων 30x30



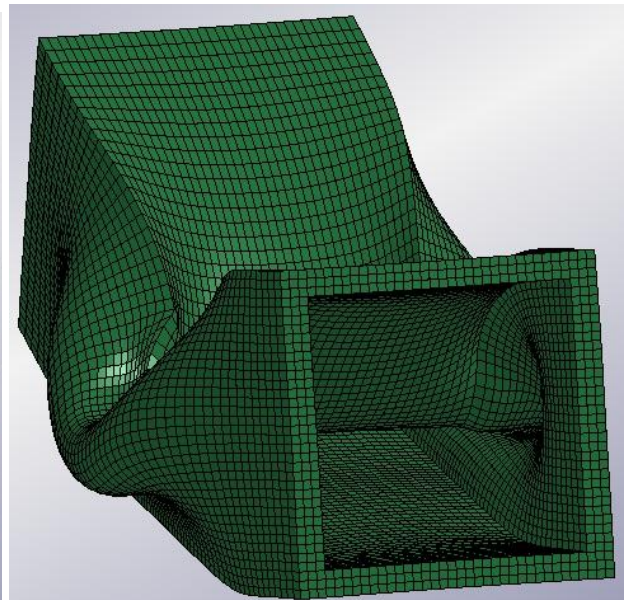
1mm



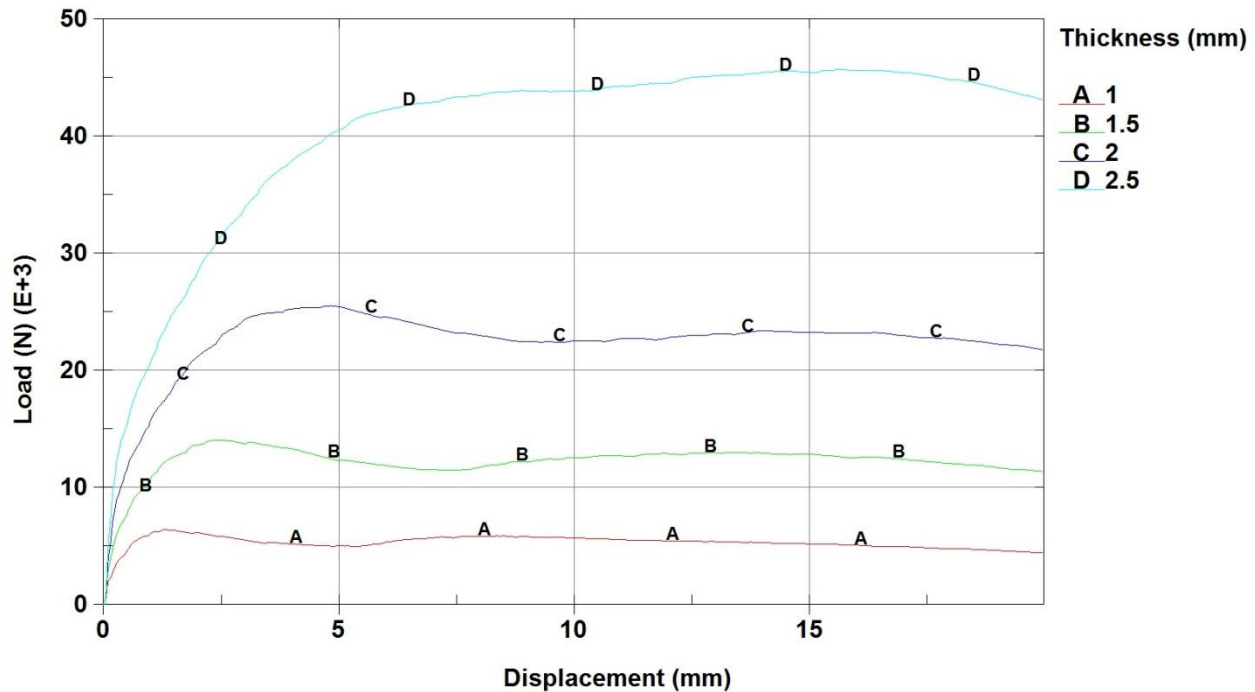
1.5mm



2mm



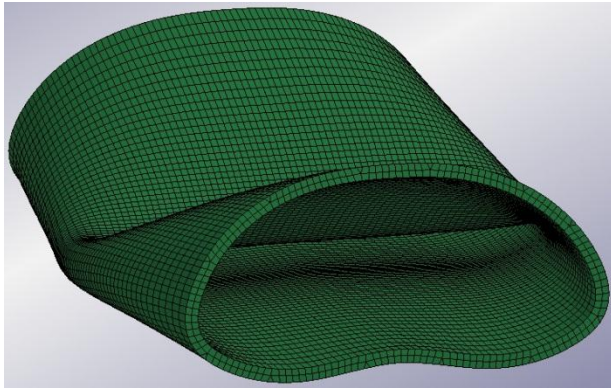
2.5mm



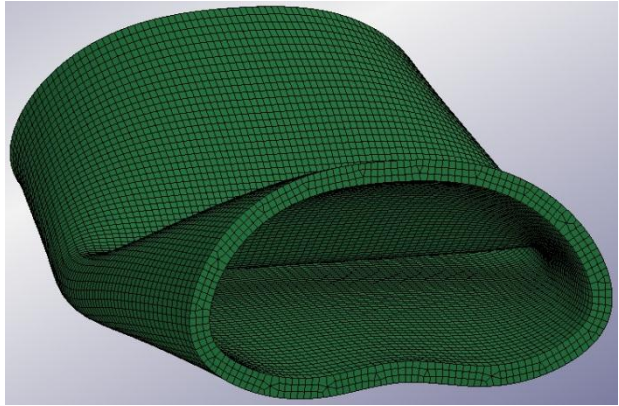
Διάγραμμα 4.5: Επίδραση του πάχους των τοιχωμάτων του τετραγωνικού κελύφους 30x30 στον τρόπο κατάρρευσής του

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν απ' τις εικόνες που προηγήθηκαν και τις καμπύλες του διαγράμματος 4.5 είναι τα ίδια με αυτά που σχολιάσαμε στα δύο τετραγωνικά κελύφη που μελετήθηκαν ήδη (50x50 και 40x40). Οι κατάρρευση είναι σχεδόν ίδια σε όλες τις περιπτώσεις ενώ οι μεταβολές που εντοπίζονται στις καμπύλες είναι ανάλογες με την αύξηση του πάχους. Μια ιδιαίτερη αναφορά αξίζει να γίνει για τις περιπτώσεις των λεπτότοιχων κελυφών πάχους 1 και 1.5mm, οι καμπύλες φορτίου-βράχυνσης των οποίων (και κυρίως αυτού με πάχος 1mm) είναι σχεδόν επίπεδες οδηγώντας σε ενεργειακό απορροφητή με ιδιαίτερα μεγάλο δείκτη ομοιομορφίας φορτίου.

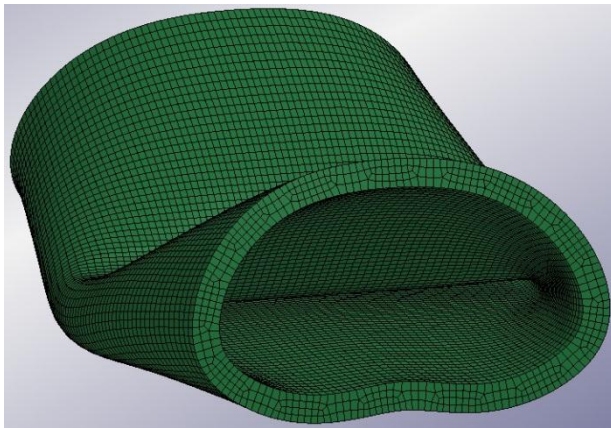
4.1.6: Κυλινδρικό κέλυφος διαστάσεων $\Phi 50$



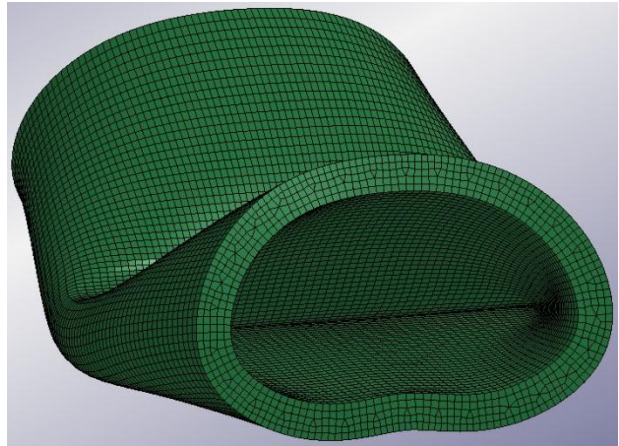
2mm



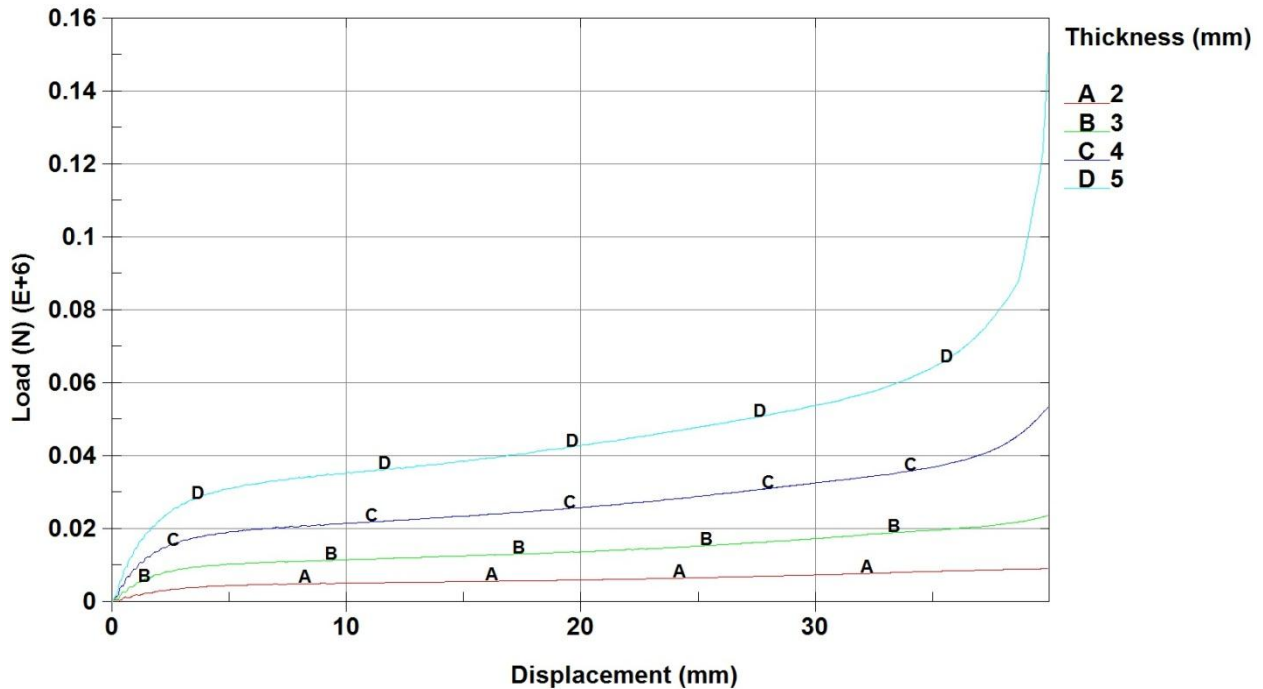
3mm



4mm



5mm



Διάγραμμα 4.6: Επίδραση του πάχους των τοιχωμάτων του κυλινδρικού κελύφους Φ50 στον τρόπο κατάρρευσής του

Ο τρόπος κατάρρευσης είναι ίδιος σε όλες τις περιπτώσεις κάτι που εξάλλου περιμέναμε εξαιτίας της γεωμετρίας των κυλινδρικών κελυφών που σε σχέση με τα ορθογωνικά και τετραγωνικά δεν έχουν σημεία με έντονη συγκέντρωση τάσης, επομένως οι πλαστικοί αρμοί που δημιουργούνται σε αυτά είναι πάντα συγκεκριμένοι και επεκτείνονται προοδευτικά σε όλο το εύρος του κελύφους. Παράλληλα αυτός είναι και ο λόγος που όλες οι καμπύλες αναπτυσσόμενου φορτίου-βράχυνσης του διαγράμματος 4.6 έχουν γενικά τη μορφή ευθείας, με τις ευθείες αυτές μάλιστα να μοιάζουν να τέμνονται περίπου σε κοινό σημείο.

4.2: Σχολιασμός

- Σε όλα τα δοκίμια που εξετάστηκαν εύκολα παρατηρούμε ότι η αύξηση του πάχους των τοιχωμάτων οδηγεί σε ολοένα και μεγαλύτερη μείωση του δείκτη ομοιομορφίας φορτίου, καθώς το αναπτυσσόμενο φορτίο αργεί να φτάσει σε επίπεδα κοντά στη μέγιστη τιμή του, ενώ η διαδικασία περιορίζεται σε όλο και λιγότερο μήκος, καθώς μειώνεται ο χώρος για περαιτέρω κατάρρευση και οδηγούμαστε σε συμπίεση συμπαγούς υλικού. Συνεπώς τα λεπτότοιχα κελύφη είναι ποιοτικά πολύ καλύτεροι ενεργειακοί απορροφητές, καθώς διατηρούν σχεδόν σε όλη τη διάρκεια της κατάρρευσης σταθερό το σχετικά μικρό φορτίο που

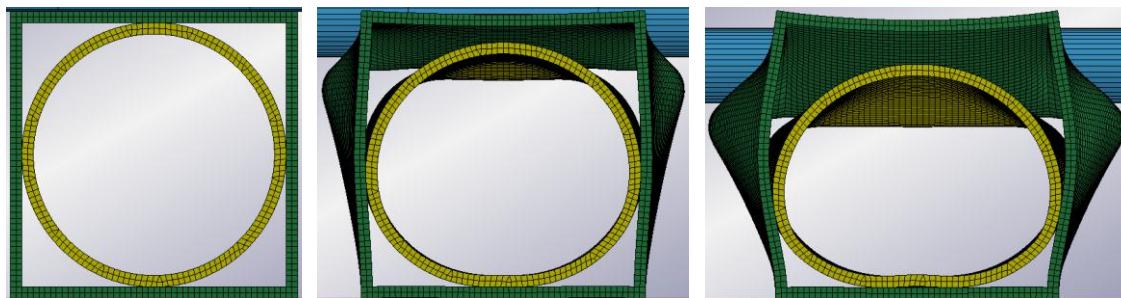
αναπτύσσεται σ' αυτούς, απορροφώντας έτσι αρκετή κινητική ενέργεια χωρίς να μεταφέρουν μεγάλες και ενδεχομένως δυσμενείς για το επίπεδο ασφάλειας της ευρύτερης κατασκευής δυνάμεις.

- Απ' την άλλη μεριά παρατηρούμε ότι μια πολύ μικρή αύξηση στο πάχος των τοιχωμάτων οδηγεί σε πολύ μεγαλύτερη αύξηση της στιβαρότητας του κελύφους. Επομένως χωρίς να αυξηθεί σχεδόν καθόλου το κόστος του ενεργειακού απορροφητή υπάρχει μεγάλη αύξηση στην ικανότητά του να απορροφά ενέργεια (μεταφέροντας βέβαια και μεγαλύτερες δυνάμεις). Με απλά λόγια η αύξηση του πάχους των τοιχωμάτων του οδηγεί σε σχεδιασμό πιο οικονομικών κελυφών αλλά δυστυχώς συνήθως και ποιοτικά κατώτερων.
- Η χρησή τομή ανάμεσα στις δύο παραπάνω παρατηρήσεις δε μπορεί να υπολογιστεί με βάση κάποια θεωρητικά στοιχεία, και εξαρτάται μόνο από τις εκάστοτε οικονομικές και ποιοτικές απαιτήσεις της κατασκευής.
- Πέρα από τον οικονομικό παράγοντα, ένα ακόμη πλεονέκτημα των κελυφών με τοιχώματα μεγάλου πάχους που θα πρέπει να αναφέρουμε, είναι το γεγονός ότι παρουσιάζουν περιορισμένο το ενδεχόμενο εμφάνισης θραύσης που συνεπάγεται μικρή συνήθως (αλλά και μεγαλύτερη σε ορισμένες περιπτώσεις) μείωση της απορροφητικής τους ικανότητας.
- Όλα τα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν σε αυτό το κεφάλαιο εμπεριέχουν σφάλματα λόγω διαφορετικής διακριτοποίησης των κελυφών για κάθε διαφορετικό πάχος. Η αύξηση της διακριτοποίησης από ένα σημείο και μετά όπως είδαμε οδηγεί κυρίως σε μικρότερο θόρυβο και καλύτερη ποιότητα καμπύλης, αλλά κάνει και το δοκίμιο (άλλοτε ελάχιστα και άλλοτε αισθητά) πιο στιβαρό. Είναι φανερό ότι λόγω της αύξησης του πάχους με βήμα 0.5 δε μπορεί να έχουμε ένα κοινό μέγεθος πεπερασμένων στοιχείων εκτός και αν χρησιμοποιούσαμε το ίδιο το βήμα. Αυτό όμως θα οδηγούσε σε κώδικες που χρειάζονται πολύ μεγάλη επεξεργαστική ισχύ και χρόνο για την επίλυσή τους. Σε κάθε περίπτωση το μέγεθος των elements κυμαίνεται από 0.5mm για κάποια λεπτότοιχα κελύφη έως 1.33mm για κελύφη με πολύ μεγάλο πάχος τοιχωμάτων.

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

- Μελέτη της κατάρρευσης κελυφών υπό την επίδραση κρουστικής πλευρικής καταπόνησης.
- Σχεδιασμός ενός συστήματος απορρόφησης ενέργειας που να βρίσκει κάποια βιομηχανική εφαρμογή με βάση τη μελέτη που έχει γίνει γύρω απ' το θέμα στην παρούσα εργασία.
- Μελέτη της επίδρασης του πυρήνα πολυμερούς ή μεταλλικού αφρού στην πλευρική κατάρρευση κελυφών υπό επίδραση γραμμικής φόρτισης. Σχετική μελέτη έχει προηγηθεί [16] αλλά αφορά στην κατάρρευση κελυφών υπό την επίδραση επίπεδης φόρτισης.
- Μοντελοποίηση της αστοχίας πιο αναλυτική από αυτή που παρουσιάζεται στην εργασία αυτή.
- Μελέτη του τρόπου πλευρικής κατάρρευσης κελυφών κατασκευασμένα από διαφορετικής φύσεως υλικά (πλαστικά, σύνθετα, κτλ).
- Συνδιασμός των γεωμετριών που έχουν μελετηθεί στην παρούσα εργασία με σκοπό την κατασκευή ενός πιο αποδοτικού ενεργειακού απορροφητή. Για παράδειγμα θα μπορούσαμε να τοποθετήσουμε δύο διαφορετικής γεωμετρίας κελύφη το ένα μέσα στο άλλο για να επιτύχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα ή να περιορίσουμε το διαθέσιμο χώρο πλευρικά του κελύφους για κατάρρευση.

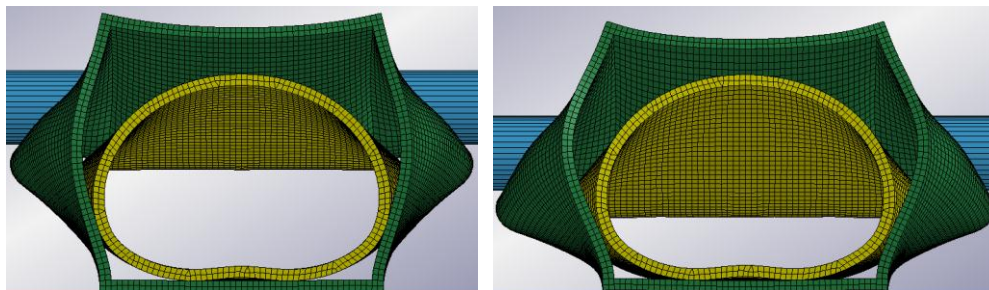
Στο τυχαίο παράδειγμα που ακολουθεί τοποθετήσαμε στο εσωτερικό του τετραγωνικού κελύφους 50x50x2 που όπως είδαμε στο διάγραμμα 2.3 το αναπτυσσόμενο φορτίο μειώνεται μετά από το peak που παρουσιάζεται στην αρχή της κατάρρευσης, ένα κυλινδρικό κέλυφος Φ46x2 η καμπύλη φορτίου-βράχυνσης του οποίου είναι σίγουρα όμοια με αυτή του ήδη μελετημένου Φ50x2 που αυξάνει συνεχώς όπως φαίνεται στο διάγραμμα 2.6. Τα αποτελέσματα της κατάρρευσης του σύνθετου αυτού κελύφους παρουσιάζονται στη συνέχεια:



1(0mm)

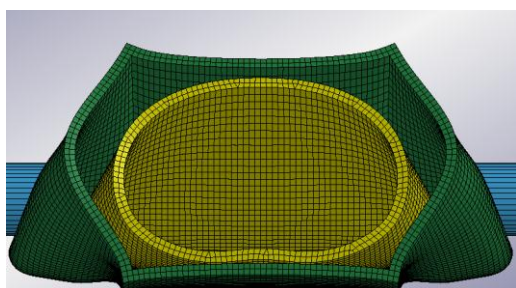
2(8mm)

3(16mm)

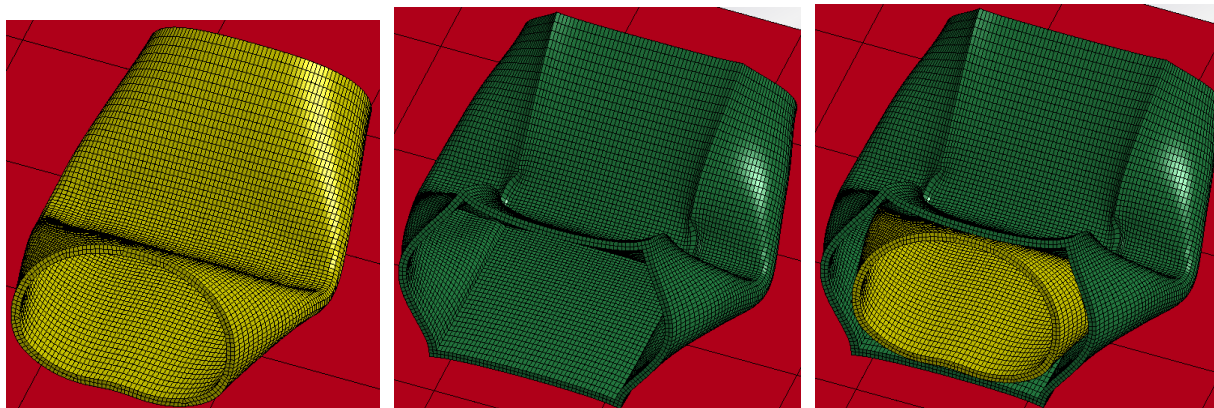


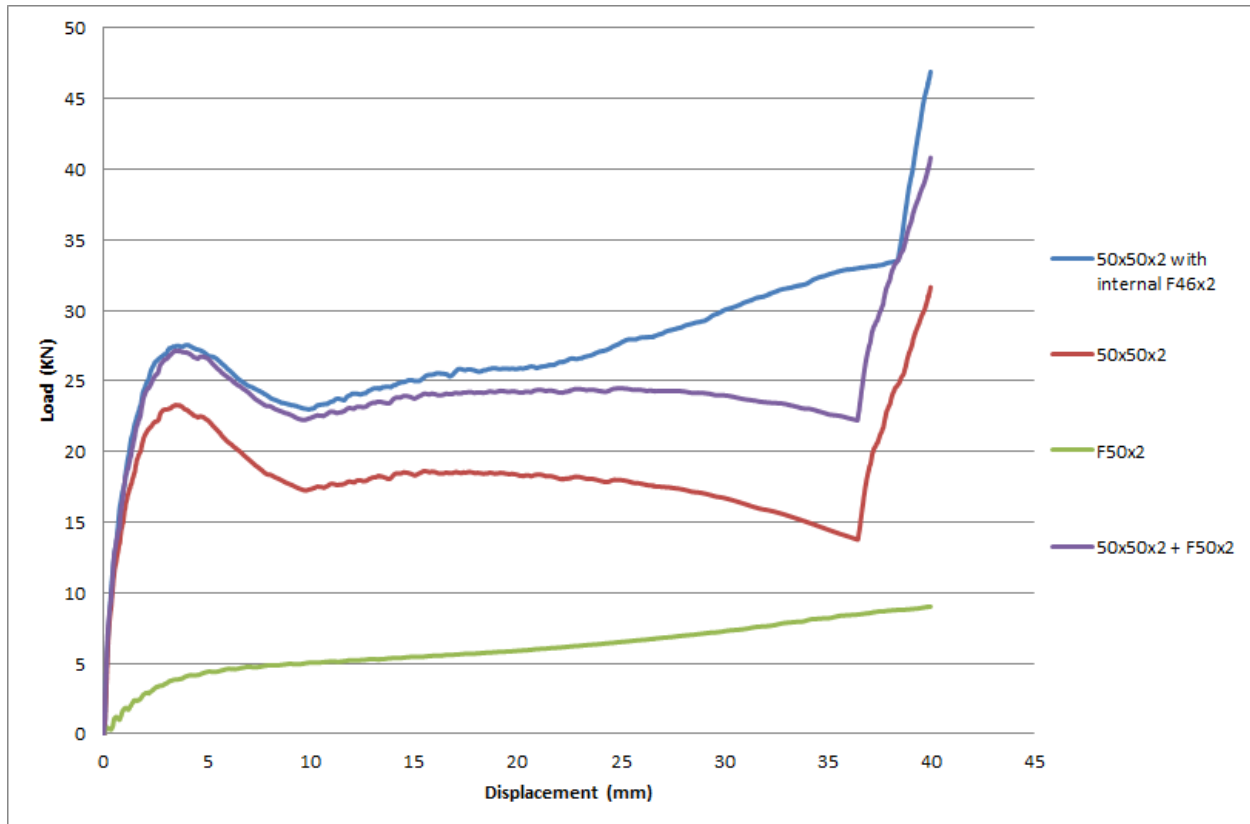
4(24mm)

5(32mm)



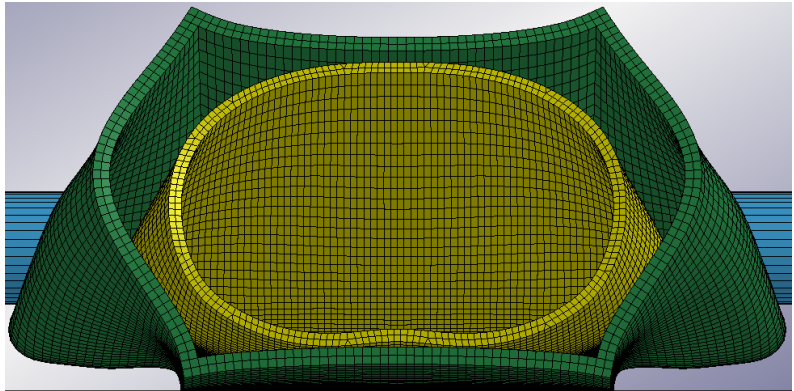
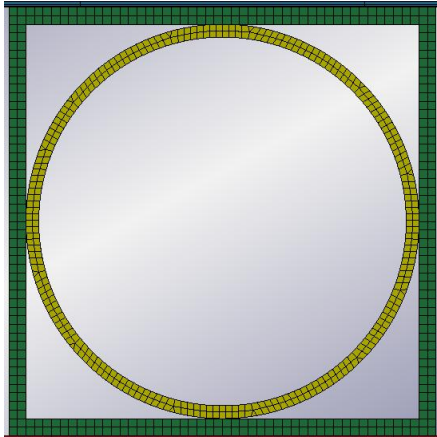
6(30mm)



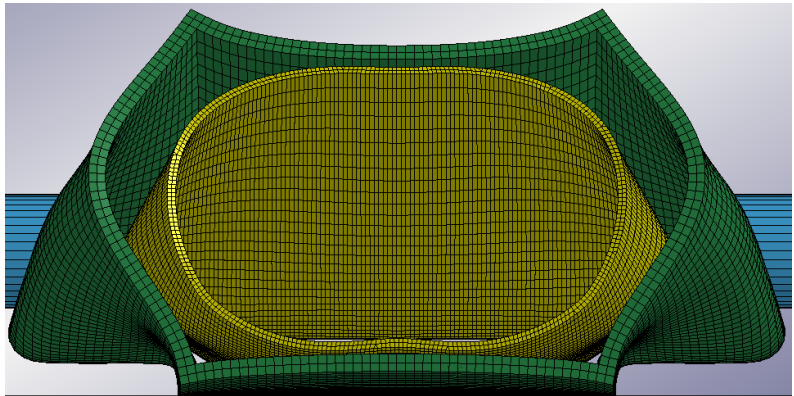
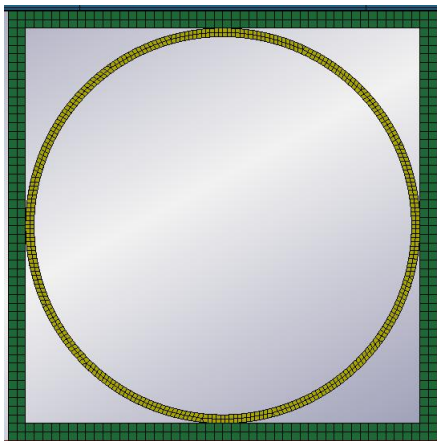


Διάγραμμα 5.1: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης του σύνθετου κελύφους (Φ46 εσωτερικά του 50x50), των δύο συνιστωσών του και του αλγεβρικού τους αθροίσματος

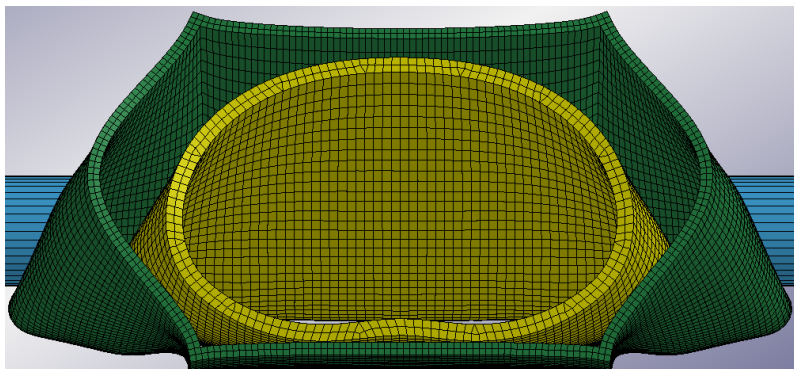
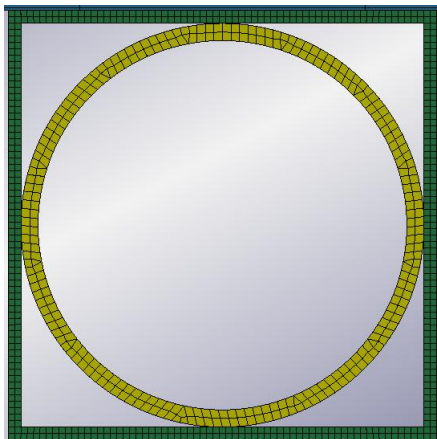
Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζονται από κοινού οι καμπύλες του τετραγωνικού 50x50x2 (ενότητα 2.3.1), του κυλινδρικού Φ50x2 (ενότητα 2.3.6) που θεωρούμε ότι είναι όμοιο με αυτό του Φ46x2 που χρησιμοποιήσαμε, του αλγεβρικού αθροίσματος των προηγούμενων και τέλος του σύνθετου κελύφους που μελετήσαμε στο οποίο τοποθετήσαμε ένα κυλινδρικό Φ46x2 στο εσωτερικό του 50x50x2. Παρατηρούμε ότι στα πρώτα 10mm της κατάρρευσης κατά τα οποία η κατάρρευση του ενός κελύφους δεν επηρεάζει την κατάρρευση του άλλου, η καμπύλη φορτίου-βράχυνσης του σύνθετου φορέα είναι ίση με το άθροισμα των δύο επιμέρους κελυφών που συμμετέχουν σ' αυτόν. Απ' το σημείο αυτό και έπειτα το ένα κέλυφος διαταράσσει την κατάρρευση του άλλου με συνέπεια το αναπτυσσόμενο φορτίο να αυξάνεται περετέρω. Στη συνέχεια μπορούμε να πειραματιστούμε με τα πάχη των δύο επιμέρους σωλήνων που αποτελούν το σύνθετο κέλυφος προκειμένου να αναζητήσουμε κάποιο καλύτερο αποτέλεσμα. Δοκιμάζοντας τρεις επιπλέον συνδιασμούς κελυφών καταλήγουμε στα παρακάτω αποτελέσματα:



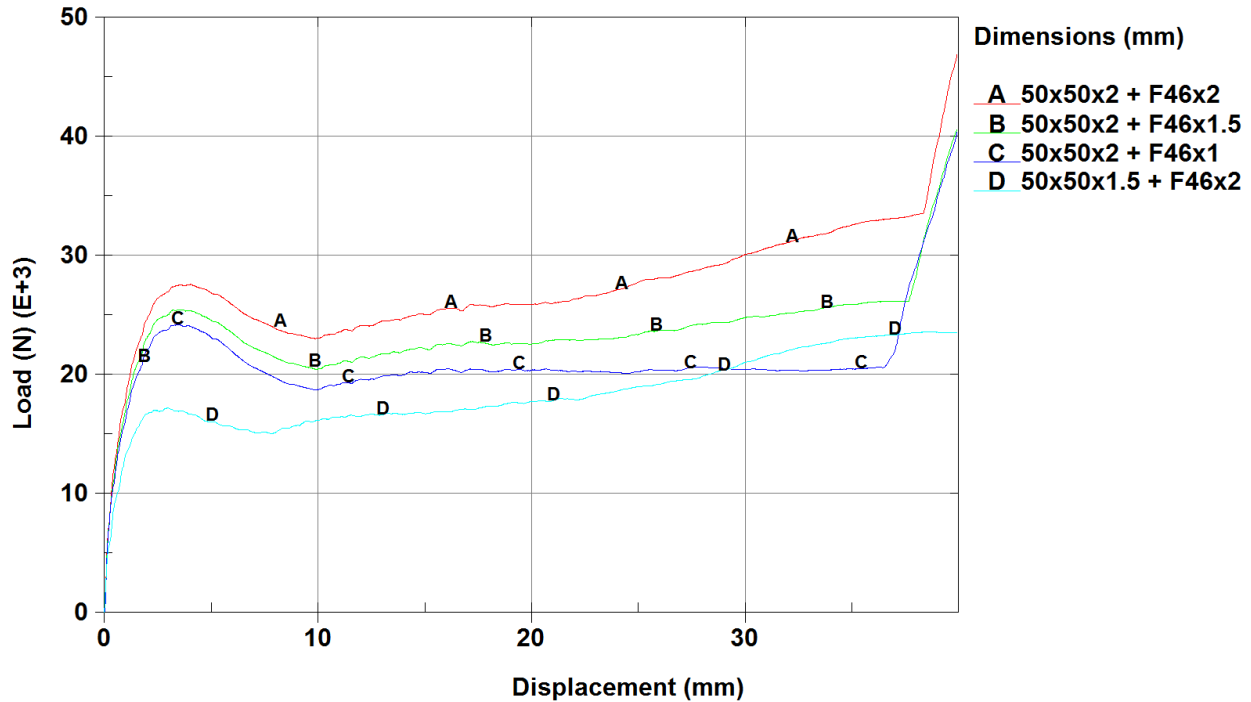
Τετραγωνικό 50x50x2 και κυλινδρικό $\Phi 46 \times 1.5$



Τετραγωνικό 50x50x2 και κυλινδρικό $\Phi 46 \times 1$



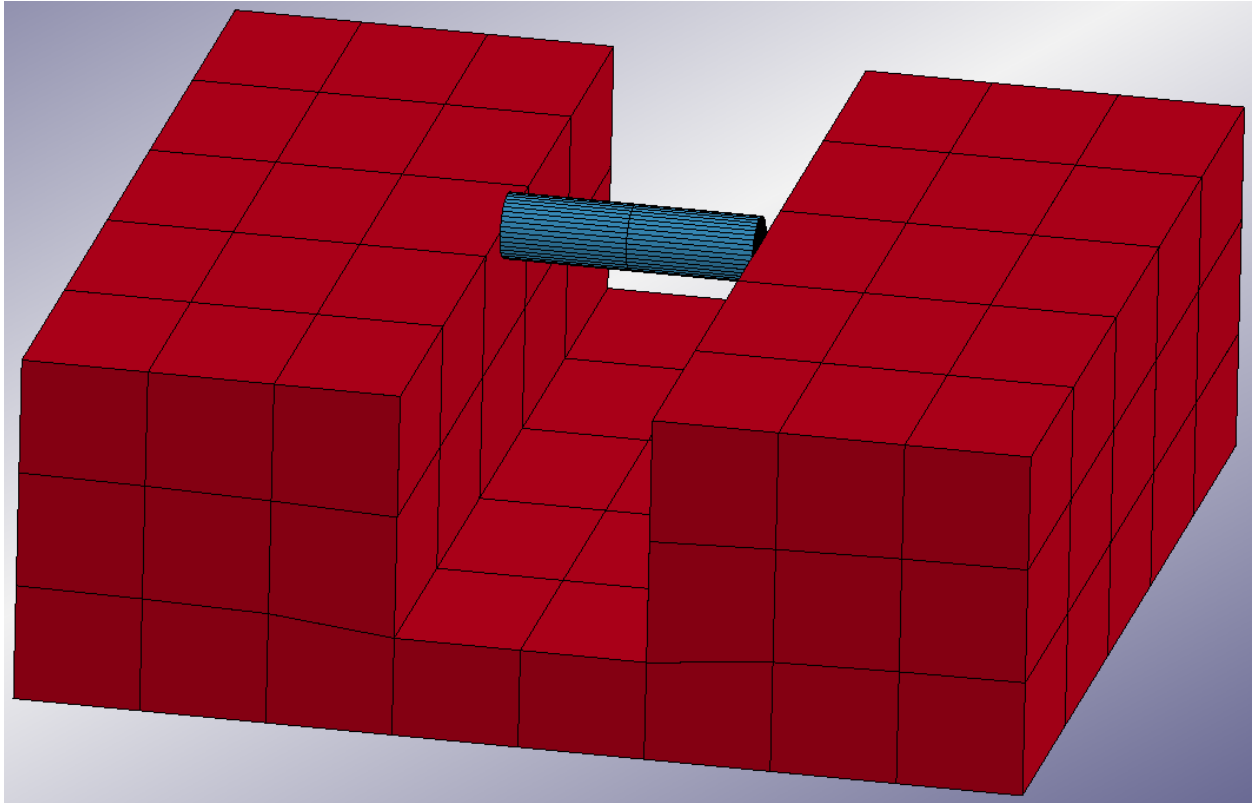
Τετραγωνικό 50x50x1.5 και κυλινδρικό $\Phi 46 \times 2$



Διάγραμμα 5.2: Επίδραση του πάχους των τοιχωμάτων των δύο συνιστωσών του σύνθετου κελύφους στην καμπύλη φορτίου-μετατόπισής του

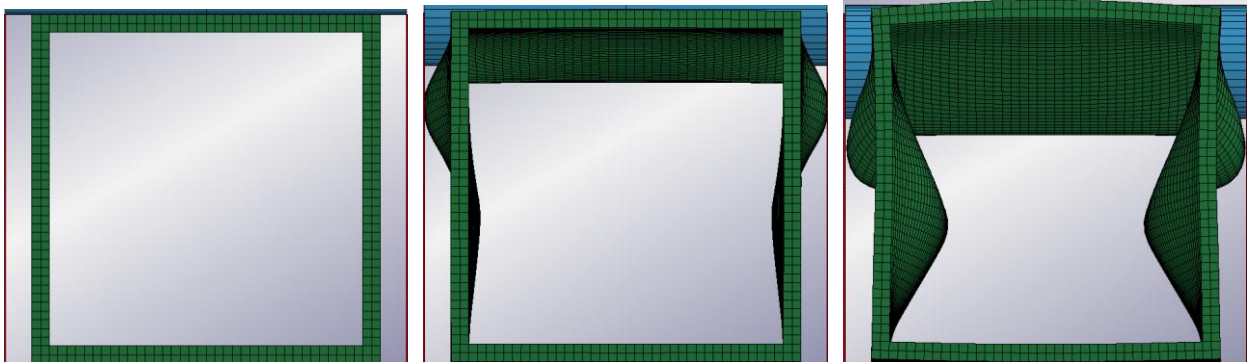
Η καμπύλη B (τετραγωνικό 50x50x2 και κυλινδρικό Φ46x1.5) και ιδιαίτερα η C (τετραγωνικό 50x50x2 και κυλινδρικό Φ46x1) παρουσιάζουν εξαιρετικό δείκτη ομοιομορφίας φορτίου, με συνέπεια τα σύνθετα κελύφη στα οποία αντιστοιχούν να αποτελούν εξαιρετικής ποιότητας ενεργειακούς απορροφητές. Εν' τέλει θα μπορούσαμε (και αυτό αποτελεί μία πολύ καλή πρόταση για μελλοντική εργασία) να πειραματιστούμε εκτενέστερα με τις γεωμετρίες, τα πάχη τοιχωμάτων και τον τρόπο συνδιασμού των κελυφών με αποτέλεσμα να σχεδιάσουμε ένα σύνθετο κέλυφος απλό στην κατασκευή του, οικονομικό και με εξαιρετικά τεχνικά χαρακτηριστικά (βαθμό ομοιομορφίας φορτίου πολύ κοντά στη μονάδα).

Στη συνέχεια εξετάζουμε εν συντομία την επίδραση του περιορισμού του χώρου κατάρρευσης του κελύφους στον τρόπο κατάρρευσής του και την απορροφητική του ικανότητα. Για το λόγο αυτό μελετήσαμε δύο ακόμη προσομοιώσεις (και πάλι με γωνία διεισδυτή κελύφους ίση με 90°) στις οποίες έγιναν κάποιες τροποποιήσεις στη γεωμετρία της κάτω πλάκας και του διεισδυτή με σκοπό τον περιορισμό του χώρου κατάρρευσης πλευρικά του δοκιμίου, οι οποίες φαίνονται στην εικόνα που ακολουθεί:



Εικόνα 5.1: Απεικόνιση της κάτω πλάκας και του διεισδυτή στην περίπτωση του πλευρικά περιορισμένου χώρου κατάρρευσης του κελύφους, προερχόμενη από τον προεπεξεργαστή LS-PrePost

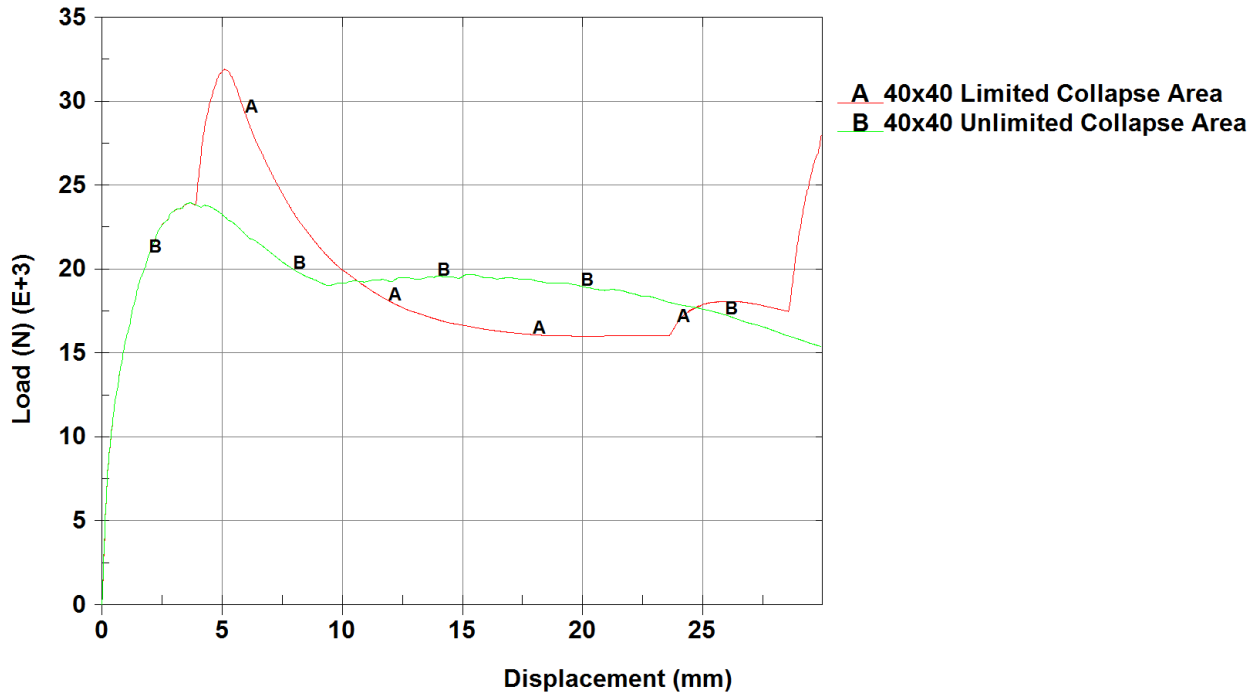
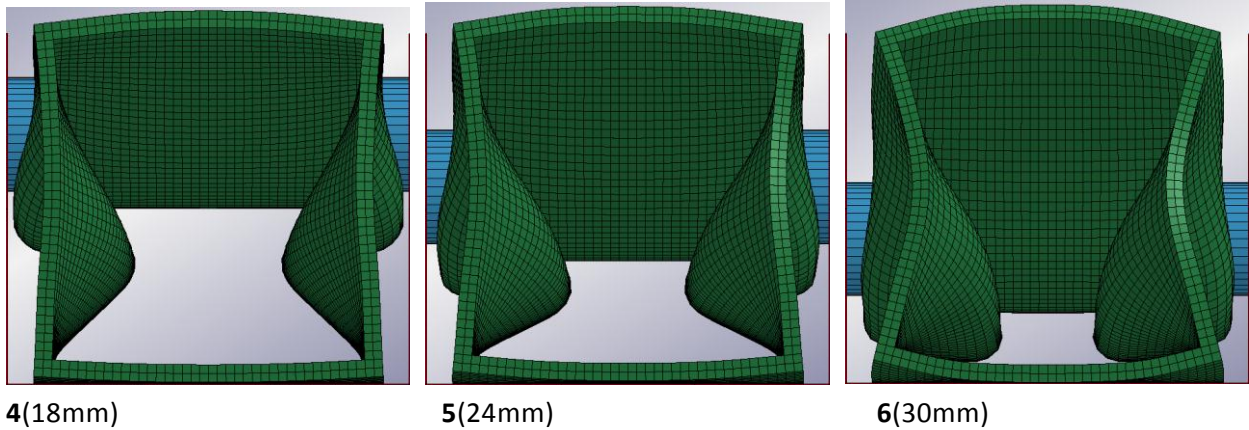
Στην πρώτη επιλέξαμε το τετραγωνικό κέλυφος 40x40 και περιορίσαμε το χώρο κατάρρευσής του δίνοντάς του περιθώριο πλευρικής ανάπτυξης πλαστικών αρμών ίσο με 3mm προς την κάθε πλευρά όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες. Ο λόγος που αφήσαμε το περιθώριο αυτό των 3mm και δεν περιορίσαμε τελείως το χώρο κατάρρευσης είναι το γεγονός ότι στην περίπτωση αυτή ο κώδικας οδηγούσε σε συμπίεση των δύο παράλληλων ως προς τον άξονα της πρέσας πλευρών του κελύφους χωρίς να σχηματίζονται πλαστικοί αρμοί σ' αυτό.



1(0mm)

2(6mm)

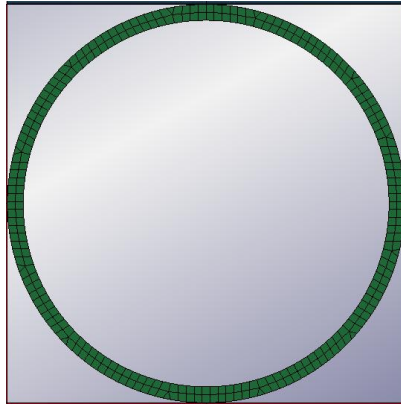
3(12mm)



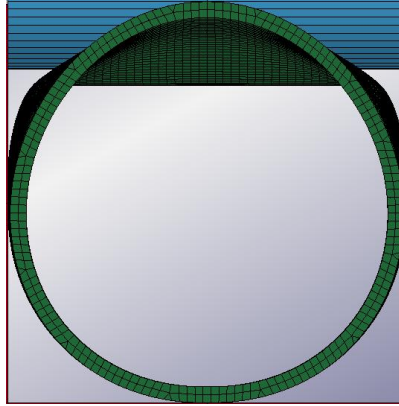
Διάγραμμα 5.3: Επίδραση του περιορισμού του χώρου κατάρρευσης πλευρικά του τετραγωνικού κελύφους 40x40 στην καμπύλη φορτίου-μετατόπισής του

Παρατηρούμε ότι ο περιορισμός των τοιχωμάτων πλευρικά του τετραγωνικού 40x40 κελύφους επιδρά αρνητικά ως προς τον τρόπο κατάρρευσής του με δεδομένο ότι διατηρείται περίπου η ίδια απορροφητική ικανότητα αλλά με πολύ χειρότερο δείκτη ομοιομορφίας φορτίου. Το μεγάλο peak της καμπύλης που εμφανίζεται περίπου στα 5mm της κατάρρευσης οφείλεται όπως φαίνεται και απ' τις παραπάνω εικόνες στην επαφή του κελύφους με τα πλευρικά τοιχώματα.

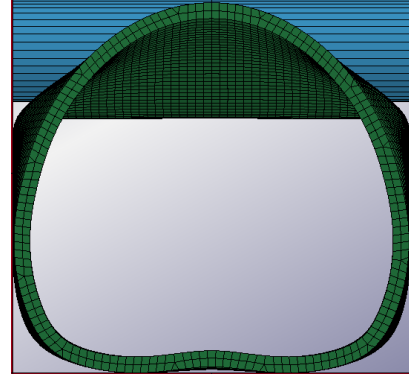
Για τη δεύτερη προσομοίωση επιλέξαμε το κυλινδρικό κέλυφος $\Phi 50$ του οποίου περιορίσαμε τελείως το χώρο κατάρρευσής του, καθώς όντας κυλινδρικό διατηρεί την ικανότητα να σχηματίζει πλαστικούς αρμούς χωρίς να εμφανίζεται το πρόβλημα που αντιμετώπισαμε προηγουμένως στο τετραγωνικό 40x40.



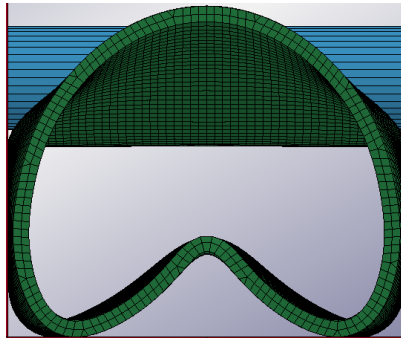
1(0mm)



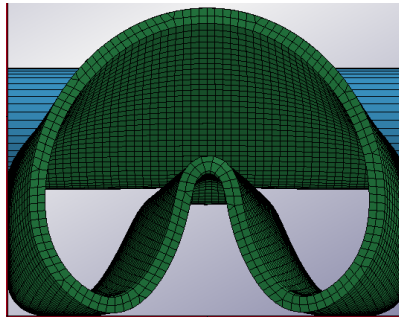
2(8mm)



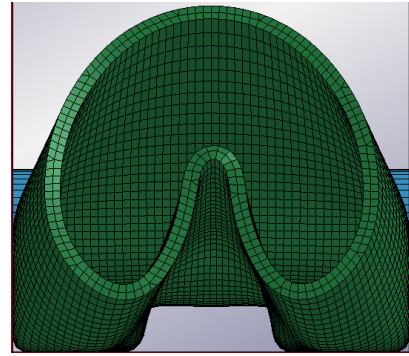
3(16mm)



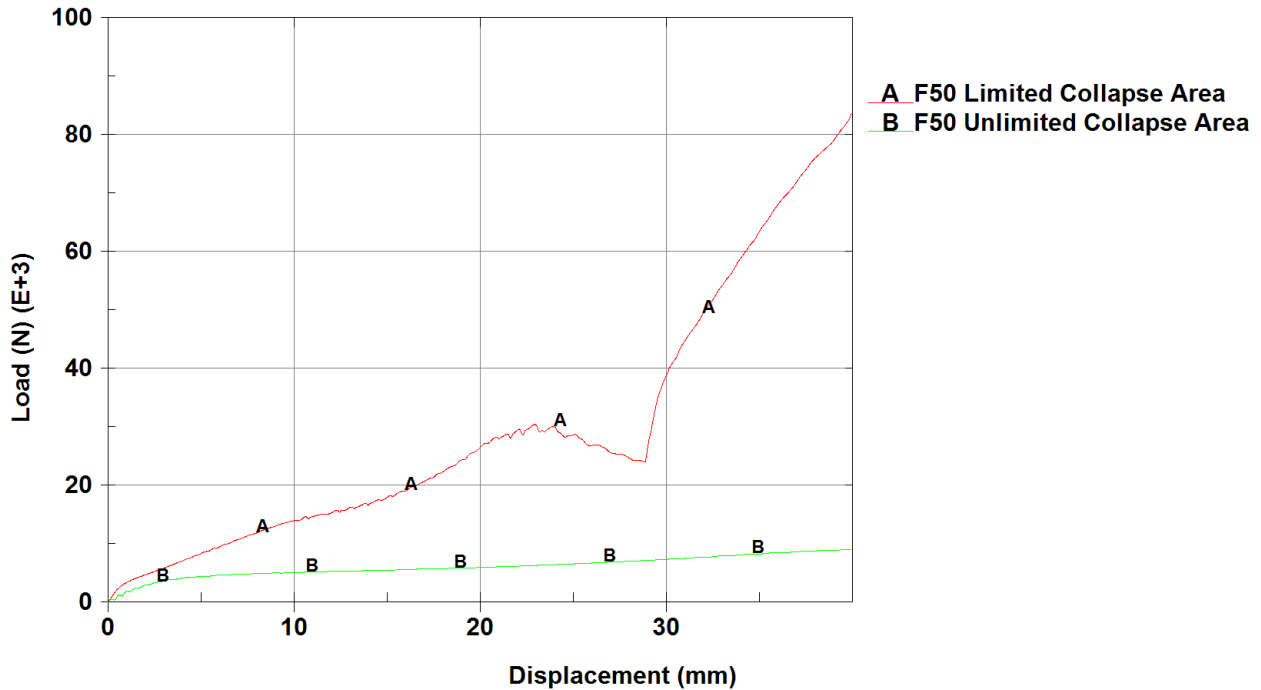
4(24mm)



5(32mm)



6(40mm)



Διάγραμμα 5.4: Επίδραση του περιορισμού του χώρου κατάρρευσης πλευρικά του κυλινδρικού κελύφους Φ50 στην καμπύλη φορτίου-μετατόπισής του

Σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση του τετραγωνικού κελύφους, στην παρούσα όπου το υπό κατάρρευση κέλυφος είναι κυλινδρικό παρουσιάζεται ιδιαίτερα αυξημένη η απορροφητική του ικανότητα στην περίπτωση που περιορίσουμε πλευρικά το χώρο κατάρρευσης. Αιτία αυτής της τεράστιας διαφοράς είναι το γεγονός ότι σε ελεύθερη κατάρρευση τα κυλινδρικά δοκίμια σχηματίζουν μεγάλους σε μήκος πλευρικούς αρμούς που στην περίπτωση αυτή σχηματίστηκαν εσωτερικά του κελύφους (μέσα στο διαθέσιμο χώρο κατάρρευσης), ενώ από τη στιγμή που ήρθαν σε επαφή μεταξύ τους (29mm περίπου) παρατηρήθηκε ραγδαία αύξηση του αναπτυσσόμενου φορτίου (διάγραμμα 5.4).

Συνοψίζοντας βλέπουμε ότι ο περιορισμός του διαθέσιμου χώρου κατάρρευσης έχει σημαντική επίδραση στον τρόπο κατάρρευσης και την απορροφητική ικανότητα των κελυφών, με το θέμα αυτό να αποτελεί ένα εξαιρετικά χρήσιμο αντικείμενο μελλοντικής μελέτης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. <http://www.autoblog.com>
2. <http://www.techvert.com>
3. <http://www.asirt.org>
4. <http://digilib.lib.unipi.gr>
5. <http://www.caricos.com>
6. <http://www.matbase.com>
7. <http://www.carbodydesign.com>
8. <http://www.lstc.com>
9. <http://www.dynasupport.com>
10. <http://en.wikipedia.org>
11. <http://www.autozine.org>
12. <http://www.who.int>
13. <http://www.mtu.edu>
14. <http://www.dynamore.de>

ΕΝΤΥΠΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

15. Κυριακάκης Γιώργος, “Επίδραση της διάταξης συστήματος μεταλλικών ορθογωνικών σωλήνων στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας σε αξονική καταπόνηση: πειραματική και αριθμητική διερεύνηση”, Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ, Αθήνα 2011
16. Γεωργακοπούλου Διαμάντω, “Η επίδραση πυρήνα πολυμερούς αφρού στην πλευρική κατάρρευση μεταλλικών κελυφών”, Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ, Αθήνα 2014
17. Ντάσιος Δημήτριος, “Πλευρική καταπόνηση μεταλλικών κελυφών με κυλινδρικό διεισδυτή”, Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ, Αθήνα 2014
18. N.K. Gupta , G.S. Sekhon, P.K. Gupta, “A study of lateral collapse of square and rectangular metallic tubes”, Department of Applied Mechanics, Indian Institute of Technology, New Delhi, India 2001

19. N.K. Gupta , G.S. Sekhon, P.K. Gupta, “Study of lateral compression of round metallic tubes”, Department of Applied Mechanics, Indian Institute of Technology, New Delhi, India 2004
20. Gayan Rathnaweera, Yvonne Durandet, Dong Ruan, Shigeaki Kinoshita, “Characterizing the Material Properties of a Tube from a Lateral Compression Test”, Faculty of Engineering and Industrial Sciences, Swinburne University of Technology, Hawthorn, Australia 2011
21. A.G. Olabi, Edmund Morris, M.S.J. Hashmi, “Metallic tube type energy absorbers: A synopsis”, School of Mechanical and Manufacturing Engineering, Dublin City University, Dublin, Ireland 2007
22. A.Baroutaji and E.Morris , “Quasi-static response and multi-objective crashworthiness optimization of oblong tube under lateral loading”, School of Mechanical and Manufacturing Engineering, Dublin City University, Glasnevin, Dublin, Ireland 2014
23. A.G. Olabi, “Quasi-static response and multi-objective crashworthiness optimization of oblong tube under lateral loading”, University of the West of Scotland, School of Engineering, High Street, Paisley, UK 2014
24. M. Avalle and L. Goglio, “Static Lateral Compression Of Aluminium Tubes: Strain Gauge Measurements And Discussion Of Theoretical Models”, Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino, Italy 1997
25. Sebastian Lipa, Maria Kotelko, “Lateral impact of tubular structure- theoretical and experimental analysis”, Lodz University of Technology, Institute of Material Science and Engineering, Department of Strength of Materials, Łódź, Poland 2013
26. Spyros A. Karamanos, Kyros P. Andreadakis, “Denting of internally pressurized tubes under lateral loads”, Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Thessaly, Volos, 2006
27. Johnson, W. & Mamalis A.G., “Crashworthiness of Vehicles”, Mechanical Engineering Publications, London, 1978
28. V.P.W. Shim and W. J. Stronge, “Lateral crushing of thin-walled tubes between cylindrical indenters”, Department of Engineering, University of Cambridge, Trumpington Street, UK 1986
29. D. Karagiozova, Marcilio Alves, “Dynamic Elastic Plastic Buckling of Structural Elements: A Review” Applied Mechanics Reviews, Transactions of the ASME, July 2008

30. Mamalis AG, Manolakos DE, Viegelaun GL. “Deformation Characteristics Of Crashworthy Components”, Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften, Dusseldorf, 1989