



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

**ΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΚΩΝΙΚΩΝ ΚΕΛΥΦΩΝ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ
ΜΕ ΠΥΡΗΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ ΑΦΡΟΥ: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΜΠΑΣΙΑ ΕΥΑΓΓΕΛΟΥ

Επιβλέπων : ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2014

Πρόλογος

Η διπλωματική αυτή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ κατά το χρονικό διάστημα Μαρτίου έως Οκτωβρίου του 2014, με σκοπό την ανάκτηση του διπλώματος του Μηχανολόγου Μηχανικού από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Η εργασία αυτή πραγματεύεται την αριθμητική προσομοίωση της συμπίεσης κωνικών δοκιμίων από σύνθετο υλικό τα οποία έχουν πυρήνα πολυμερούς αφρού με σκοπό την σύγκριση τους με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από την πειραματική διαδικασία συμπίεσης των ίδιων δοκιμίων.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια βασική αναφορά στον ρόλο των σύνθετων υλικών στην απορρόφηση ενέργειας κατά την κρούση των κατασκευών. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται η ακριβής έννοια του όρου σύνθετα υλικά, οι ιδιότητες τους, ο τρόπος παραγωγής τους, τα δομικά συστατικά τους, τα είδη τους όπως και η μηχανική συμπεριφορά τους σε καταπόνηση. Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά των αφρωδών υλικών. Στο επόμενο κεφάλαιο αναλύονται οι μηχανισμοί κατάρρευσης και αστοχίας των σύνθετων υλικών και η αντιστοίχησή τους με τα ποσά ενέργειας που απορροφούν. Με το πέμπτο κεφάλαιο αρχίζει ουσιαστικά το πειραματικό μέρος της διπλωματικής αυτής. Σε αυτό μελετάται κατά πόσο μπορεί η προσομοίωση της κατάρρευσης μέσω του προγράμματος LS-Dyna να προσεγγίζει την πραγματική συμπεριφορά και απορροφούμενη ενέργεια του πειράματος. Συγκεκριμένα εξηγείται αναλυτικά ο σχεδιασμός των δοκιμίων στο περιβάλλον του προγράμματος ποιες παραμέτρους επιλέξαμε και γιατί. Στη συνέχεια παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν σε σύγκριση με τα πειραματικά με την βοήθεια εικόνων και αριθμητικών αποτελεσμάτων.

Τέλος η διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται καταλήγοντας μέσω της σύγκρισης σε σημαντικά συμπεράσματα.

Επιβλέπων αυτής της εργασίας υπήρξε ο καθηγητής κ. Δημήτριος Μανωλάκος στον οποίο και επιθυμώ να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου, όπως επίσης και προς τον κ. Πρωτεσίλαο Κωστάζο μέλος Ε.Ε.ΔΙ.Π. του εργαστηρίου ο οποίος έδειξε την αμέριστη συμπαράσταση του καθ' όλη την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας με τις σαφείς οδηγίες του κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης και σε θέματα χρήσης του προγράμματος LS-DYNA.

Αθήνα, Οκτώβριος 2014

Μπασιάς Ευάγγελος

Περιεχόμενα

Πρόλογος...	3
Κεφάλαιο 1	
1. Εισαγωγή...	7
1.1 Γενικά...	7
1.2 Σχεδιασμός συστημάτων απορρόφησης ενέργειας...	13
1.3 Αξιολόγηση συμπεριφοράς συστημάτων απορρόφησης ενέργειας...	17
1.4 Χρήση κατασκευών λεπτού πάχους ως συστημάτων απορρόφησης ενέργειας.	19
Κεφάλαιο 2	
2. Τα σύνθετα υλικά στις κατασκευές...	20
2.1 Εισαγωγή – ορισμός...	20
2.2 Ταξινόμηση των σύνθετων υλικών...	21
2.2.1 Ίνες...	23
2.2.2 Σύγκριση ενισχυτικών ινών...	24
2.2.3 Μήτρα...	25
2.2.4 Ειδικότερα χαρακτηριστικά...	26
2.2.4.1 Σύνθετα νημάτων/ρητίνης...	27
2.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά...	28
2.4 Είδη υφασμάτων...	36

Κεφάλαιο 3

3. Αφρώδη υλικά...	41
3.1 Εισαγωγή – ορισμός...	41
3.1.1 Ορισμός κυψελοειδών αφρών...	41
3.2 Πολυμερή αφρώδη υλικά...	43
3.3 Μέθοδοι παρασκευής κυψελοειδών στερεών...	44
3.4 Ιδιότητες και εφαρμογές των κυψελοειδών στερεών...	45
3.5 Μηχανική συμπεριφορά των αφρών...	46
3.6 Σύνθετα στρωματοειδή ...	50
3.6.1 Κελύφη σύνθετων στρωματοειδών...	54
3.7 Μέθοδοι μορφοποίησης σύνθετων υλικών...	55

Κεφάλαιο 4

4. Μηχανισμοί αστοχίας σύνθετων υλικών...	59
4.1 Μορφές αστοχίας...	59
4.2 Επίδραση των μηχανισμών αστοχίας στην απορροφούμενη ενέργεια...	59

Κεφάλαιο 5

5.1 Αξονική καταπόνηση κελυφών...	68
5.1.1 Χαρακτηρισμός υλικού...	69
5.1.2 Χαρακτηρισμός κελυφών...	73
5.2 Διαδικασία μοντελοποίησης δοκιμίων...	74
5.3 Σχεδιασμός δοκιμίου με τον προεπεξεργαστή LS-PREPOST...	75
5.3.1 Καθορισμός υλικού...	87
5.3.2 Ορισμός τεμαχίων και κόμβων...	88
5.3.3 Ταχύτητα εμβόλου...	90
5.3.4 Καταχώρηση επαφών...	91

5.3.5 Ορισμός χρονικής λήξης της κατεργασίας...	94
5.3.6 Ορισμός εμφάνισης αποτελεσμάτων...	94
5.4 Συμπύεση κελυφών και σύγκριση με την πειραματική διαδικασία...	95
5.4.1 Δοκίμιο 1 ^ο ...	95
5.4.2 Δοκίμιο 2 ^ο ...	104
5.4.3 Δοκίμιο 3 ^ο ...	111
5.4.4 Δοκίμιο 4 ^ο ...	116

Κεφάλαιο 6

6. Συμπεράσματα...	120
--------------------	-----

Κεφάλαιο 7

7. Βιβλιογραφία – σχετικά άρθρα...	122
------------------------------------	-----

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Τα σύνθετα υλικά είναι πολύπλοκα υλικά που εμφανίζουν υψηλή αντοχή ως προς την αναλογία βάρους και μια υψηλή ακαμψία σε σύγκριση με τα συμβατικά μέταλλα. Ωστόσο, οι μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών μπορούν να υποβαθμιστούν σοβαρά κατά την παρουσία βλάβης. Η πρόβλεψη θραύσης ως εκ τούτου σε σύνθετα υλικά είναι πολύ σημαντική, αλλά είναι αρκετά δύσκολη κυρίως επειδή η έναρξη της βλάβης εμφανίζεται συνήθως στο εσωτερικό του υλικού σε αντίθεση με τα μέταλλα. Είναι πολύ σημαντικό να προβλέψουμε την βλάβη μέσω των προσομοιώσεων προκειμένου να μειωθεί το κόστος της παραγωγής. Με τη σύγκριση των πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων, θα ξέρουμε πώς το μοντέλο μπορεί να βελτιωθεί για καλύτερη χρήση. Πρόβλεψη κατάρρευσης δοκιμίων έχει δοκιμαστεί με επιτυχία από έναν μεγάλο αριθμό ερευνητικών ομάδων χρησιμοποιώντας μια ποικιλία από τεχνικές. Παρ'όλα αυτά, εξακολουθεί να υπάρχει μεγάλη ανάγκη για μία μέθοδο ανίχνευσης της αστοχίας που μπορεί να επεκταθεί σε πραγματικά συστήματα όπως εξαιρετικά πολύπλοκες δομές σύνθετων αεροσκαφών. Αυτή η εργασία συγκρίνει τα πειραματικά και αριθμητικά αποτελέσματα των σύνθετων κελυφών πληρωμένα με αφρό.

Τα τελευταία χρόνια, τα σύνθετα υλικά έχουν ζωτικό ρόλο στον τομέα των κατασκευών. Σύνθετα μπορεί βρεθούν σε αεροπλάνα, αυτοκίνητα, εταιρίες αιολικής ενέργειας, λόγω του χαμηλού τους βάρους, της αυξημένης δύναμη και αντοχής, και για την ικανότητα απορρόφησης υψηλής ενέργειας. Τα σύνθετα υλικά είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να έχουν μηχανικές ιδιότητες καλύτερα από τα υλικά που τα αποτελούν ξεχωριστά. Ο πιο σημαντικός παράγοντας που διαφοροποιεί τα σύνθετα και τα συμβατικά υλικά σχετίζεται με την κατευθυντικότητα των ιδιοτήτων τους. Τα συμβατικά υλικά είναι ιστροπικά δηλαδή, ιδιότητες όπως η αντοχή, ακαμψία, κλπ είναι ίδια σε όλες τις κατευθύνσεις, ενώ τα σύνθετα είναι ανισότροπα δηλαδή, οι ιδιότητες ποικίλλουν σε σχέση με τον προσανατολισμό των ινών, ανάλογα με τη κατεύθυνση του φορτίου.

Στην εποχή μας, η ανάγκη για ασφαλή και οικονομικά μεταφορικά μέσα είναι επιτακτική. Και αυτό διότι τα οχήματα εκτός από εξυπηρέτηση που προσφέρουν στον χρήστη, μπορούν να προκαλέσουν και μεγάλα ατυχήματα, αλλά και μεγάλες καταναλώσεις ενέργειας από τις οποίες επιβαρύνεται κυρίως ο χρήστης. Οι έρευνες που γίνονται κυρίως από τις αυτοκινητοβιομηχανίες, αποβλέπουν στη βελτίωση προϊόντων όσον αφορά την μείωση βάρους, την ανάγκη για αντίσταση σε διάβρωση και την ικανότητα όσον το δυνατόν μεγαλύτερης απορρόφησης ενέργειας σε στατικές και δυναμικές καταπονήσεις. Ήδη έχει καταβληθεί μεγάλη προσπάθεια σε πειραματική έρευνα με στόχο την θεμελίωση ασφαλών κριτηρίων θεωρητικής μελέτης των μηχανισμών κατάρρευσης, παρέχοντας την δυνατότητα στους αναλυτές να σχεδιάσουν ασφαλείς κατασκευές σχετικά με την μέγιστη ποσότητα απορροφημένης ενέργειας.

Το βάρος, το κόστος συντήρησης και η συμπεριφορά έναντι κρουστικής φόρτισης θεωρούνται τα κυρίαρχα χαρακτηριστικά στοιχεία στο σχεδιασμό των σύγχρονων μεταφορικών μέσων. Για την εκπλήρωση του σχεδιασμού, απαιτείται η αυστηρή επιλογή των κατάλληλων υλικών που θα αντιμετωπίσουν στον μέγιστο δυνατό βαθμό αυτές τις απαιτήσεις.

Βασική αρχή για την κατασκευή ενός αυτοκινήτου αποτελεί το πλαίσιο. Πάνω σε αυτό στηρίζονται όλα τα μηχανικά μέρη του αυτοκινήτου, όπως ο κινητήρας και οι αναρτήσεις και γενικά όλο το αμάξωμα. Οι κατηγορίες αμαξώματος που συναντούμε χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

Πλαίσιο τύπου σκάλας

Το πλαίσιο τύπου σκάλας χρησιμοποιείται σε όλο και λιγότερα εκτός δρόμου οχήματα γιατί είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό στις καταπονήσεις, με βασικό όμως μειονέκτημα, έναντι ενός αυτοφερόμενου, το αυξημένο βάρος.

Πάνω σε αυτό προσαρμόζονται με βίδες όλο το αμάξωμα, τα μηχανικά μέρη και οι αναρτήσεις και κατασκευάζεται από χάλυβα υψηλής αντοχής. Αποτελείται από δύο δοκούς τοποθετημένες παράλληλα, τις δοκίδες, οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους με εγκάρσιες δοκούς, τις διαδοκίδες.

Αυτοφερόμενο πλαίσιο

Το αυτοφερόμενο πλαίσιο χρησιμοποιείται σε όλα τα επιβατικά αυτοκίνητα και στα περισσότερα σύγχρονα οχήματα ελεύθερου χρόνου (SUV). Το μπροστινό και το πίσω τμήμα του διαθέτουν ζώνες ελεγχόμενης παραμόρφωσης με ενισχυμένα φύλλα χάλυβα, ώστε να απορροφούν το μεγαλύτερο



Σχήμα 1.1. Παράδειγμα πλαισίου αυτοκινήτου

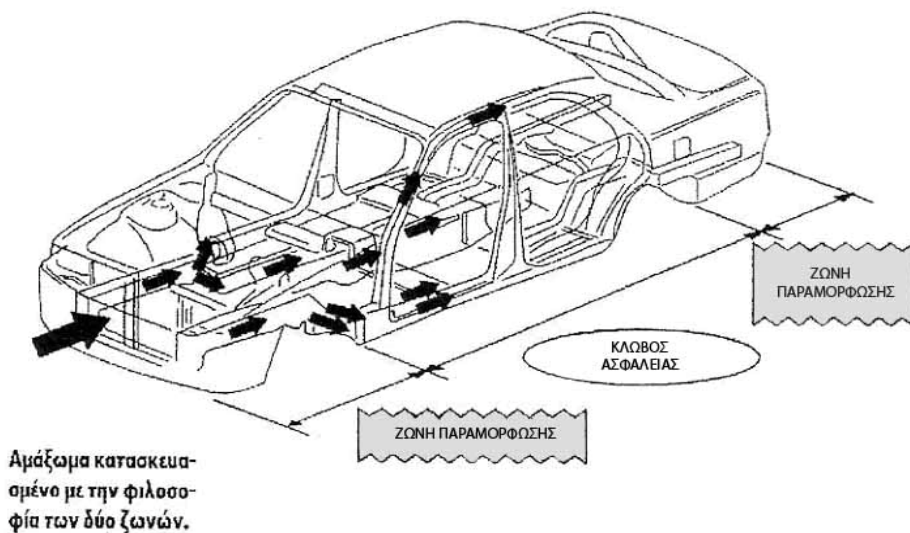
μέρος της ενέργειας μιας σύγκρουσης και παράλληλα να παραμορφώνονται σταδιακά. Η δομή τους πρέπει να είναι κατασκευασμένη με τέτοιο τρόπο, ώστε να μην είναι πολύ σκληρή γιατί καταπονούνται οι επιβάτες- αλλά ούτε ιδιαίτερα μαλακή γιατί παραμορφώνεται έντονα σε ενδεχόμενη σύγκρουση.

Ο χώρος των επιβατών, ο οποίος χαρακτηρίζεται ως "κλωβός ασφαλείας", είναι σχεδιασμένος με τέτοιο τρόπο, ώστε να παραμένει ακέραιος ακόμη και μετά από μια ισχυρή καταπόνηση. Ιδιαίτερες ενισχύσεις διαθέτουν οι κολόνες της οροφής και το πλαϊνό μέρος λόγω έλλειψης ζωνών παραμόρφωσης αυξημένου μεγέθους, για να μην παραμορφωθούν έντονα σε περίπτωση ανατροπής ή πλάγιας σύγκρουσης.

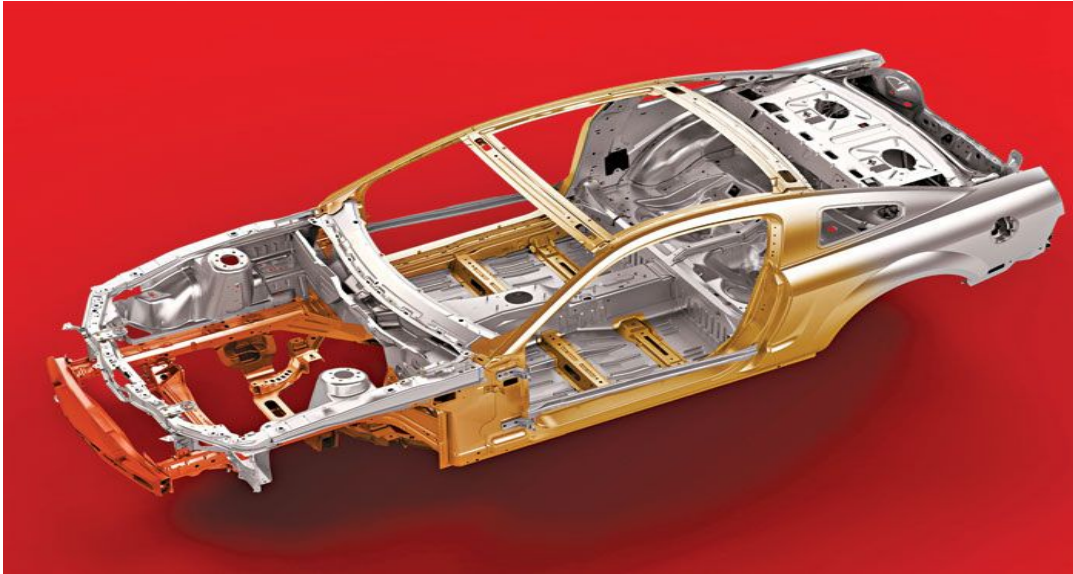
Έρευνες σχετικά με τη σχεδίαση συστημάτων που θα βελτίωναν την παθητική ασφάλεια των οχημάτων οδήγησαν στη μέθοδο σχεδίασης του οχήματος με βάση το διαχωρισμό του αμαξώματος σε δύο ζώνες:

1. τη ζώνη παραμόρφωσης η οποία με τη σειρά της διαχωρίζεται στην **εμπρόσθια** και στην **οπίσθια ζώνη**

2. την άκαμπτη ζώνη η οποία σχηματίζει ένα κλωβό ασφαλείας γύρω από τους επιβαίνοντες και τους εξασφαλίζει τον αναγκαίο ζωτικό χώρο για να επιβιώσουν σε περίπτωση σοβαρής σύγκρουσης.



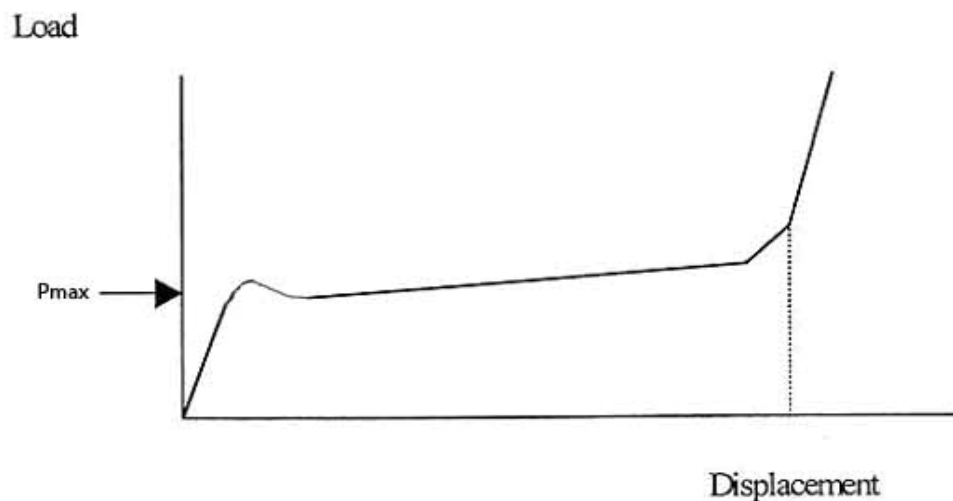
Σχήμα 1.2. Σχηματική διάταξη αμαξώματος διαχωρισμένου σε δύο ζώνες



Σχήμα 1.3. Παράδειγμα πλαισίου αυτοκινήτου

Σε μία δοκιμή αξονικής καταπόνησης η ενέργεια η οποία απορροφάται από το δοκίμιο κατά την διαδικασία αστοχίας και κατάρρευσής του μπορεί να υπολογιστεί με εμβαδομέτρηση του χωρίου κάτω από την αντίστοιχη καμπύλη φορτίου – βράχυνσης δοκιμίου (μετατόπισης). Αρχικά το κέλυφος παραμορφώνεται ελαστικά ενώ το φορτίο αυξάνεται με σταθερό ρυθμό, σχεδόν γραμμικά, μέχρι μία μέγιστη τιμή P_{max} . Το μέγεθος της μέγιστης αυτής τιμής εξαρτάται από την γεωμετρία του κελύφους και τα χαρακτηριστικά του υλικού. Με την προσέγγιση της τιμής αυτής το φορτίο εμφανίζει απότομη πτώση. Καθώς συνεχίζεται η παραμόρφωση, η μορφή της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης εξαρτάται από τον τρόπο κατάρρευσης της κατασκευής και τις συνθήκες φόρτισης. Γενικώς, για την καταγραφή της ικανότητας προς απορρόφηση ενέργειας ενός αξονικά καταπονούμενου κελύφους λαμβάνεται ως μέγεθος μέτρησης και σύγκρισης η ειδική ενέργεια απορρόφησης W_s . Αυτή ορίζεται σαν ο λόγος της ενέργειας που απορροφά το κέλυφος κατά την κατάρρευση του W , προς τη μάζα του υλικού που έχει αστοχήσει, M_c , η οποία υπολογίζεται από τον αντίστοιχο όγκο V_c πολλαπλασιαζόμενο με την πυκνότητα του υλικού ρ .

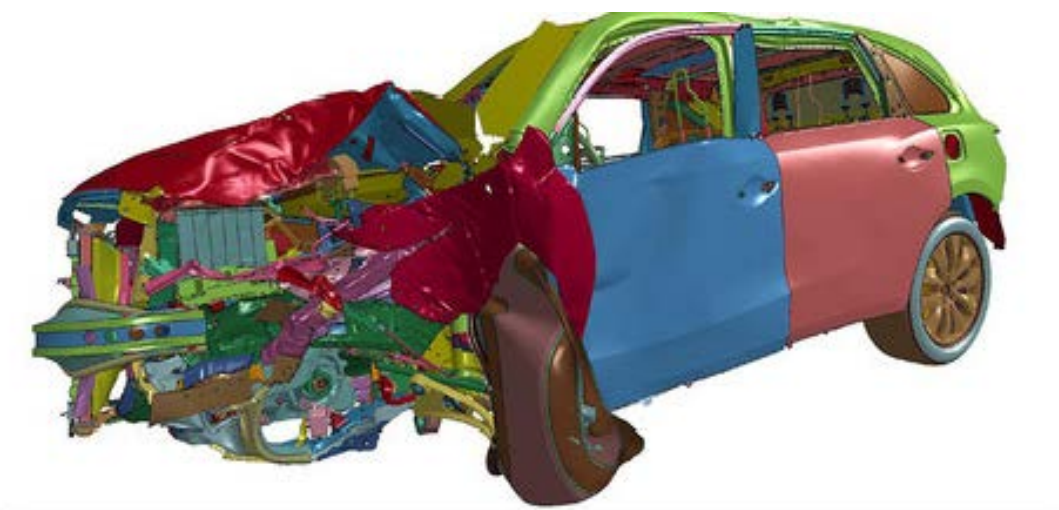
Τα μεταλλικά κελύφη συνήθως απορροφούν την ενέργεια αυτή με σταδιακή αναδίπλωση και κάμψη τοπικά, κατά την κατάρρευση των τοιχωμάτων τους. Ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα μιας τέτοιας παραμόρφωσης είναι ότι ο ρυθμός της διάχυσης της ενέργειας συγκεντρώνεται σε σχετικά μικρές ζώνες ενώ το υπόλοιπο της δομής διατηρεί την ακαμψία του. Σε σύγκριση με τα μέταλλα, τα περισσότερα κελύφη σύνθετου υλικού καταρρέουν με έναν πιο εύθραυστο τρόπο και αστοχούν μέσω μιας αλληλουχίας μηχανισμών θραύσεως που περιλαμβάνουν την θραύση ινών, ράγισμα μήτρας, αποσύνδεση ινών-μήτρας, διαστρωματική αποκόλληση και εσωτερικός διαχωρισμός ινών. Επιπλέον, με τα σύνθετα υλικά, ο μελετητής μηχανικός μπορεί να μεταβάλλει τον τύπο των ινών, τη μήτρα και τον προσανατολισμό των ινών για να κατασκευάσει σύνθετα υλικά με βελτιωμένες ιδιότητες.



Σχήμα 1.3. Τυπική μορφή καμπύλης φορτίου-μετατόπισης

1.2 Σχεδιασμός συστημάτων απορρόφησης ενέργειας

Τον τελευταίο καιρό, ένας μεγάλος αριθμός επιστημονικών άρθρων έχει ασχοληθεί με την απόδοση μεταλλικών κελυφών λεπτού πάχους όπως και σύνθετων κελυφών ενισχυμένων με ίνες σε αξονική καταπόνηση (θλίψη). Σε αυτοκινητιστικές εφαρμογές, οι κατασκευαστικές δομές που χρησιμοποιούνται, απορροφούν την ενέργεια της σύγκρουσης με έναν σταδιακό ελεγχόμενο τρόπο, ώστε οι επιβάτες να μην υποβληθούν σε απότομη υψηλή επιβράδυνση.



Σχήμα 1.4 Προσομοίωση κρούσης στο LS-DYNA

Η έννοια της λεγόμενης “συμπεριφοράς/απόκρισης κατασκευών έναντι πρόσκρουσης” σχετίζεται με την απόκριση του εκτιθέμενου δομικού στοιχείου ή συστήματος και των απαιτήσεων προστασίας που δύναται να εξασφαλίσει, με κύριο παράγοντα την ικανότητα απορρόφησης υψηλού ποσοστού της ενέργειας πρόσκρουσης κατά την κατάρρευσή του.

Στην περίπτωση επιβαινόντων ή πολύτιμων υλικών εντός μιας κατασκευής (π.χ. όχημα) βασικό στόχο του σχεδιασμού της συνιστά η δημιουργία μετώπου κατάρρευσης δηλαδή μιας συγκεκριμένης ζώνης υψηλής (προοδευτικής και ελεγχόμενης) παραμόρφωσης στην πλευρά της πρόσκρουσης. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται αφενός υψηλή απορρόφηση ενέργειας, με αποτέλεσμα την περιορισμένη καταπόνηση των επιβαινόντων λόγω μειωμένης επιβράδυνσης, αφετέρου διατηρείται αλώβητο (ή σχεδόν αλώβητο) το υπόλοιπο τμήμα της κατασκευής, διασφαλίζοντας ζωτικό χώρο (επιβίωσης/ακεραιότητας) στους επιβαίνοντες και τα αγαθά. Η συγκεκριμένη επιδίωξη αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα του λεγόμενου “σχεδιασμού παθητικής ασφάλειας” των οχημάτων. Ένα συμβάν πρόσκρουσης διέπεται από τη μάζα, το υλικό, τη γεωμετρία της ζώνης πρόσκρουσης και το ευρύτερο σχήμα των αλληλεπιδρώντων σωμάτων, καθώς και τη σχετική μεταξύ τους ταχύτητα. Βασικό πεδίο έρευνας στη βιομηχανία επίγειων και υπέργειων μέσων μεταφοράς αποτελεί η ανάπτυξη ελαφρύτερων, φθηνότερων και μηχανικά αποτελεσματικότερων υλικών και κατασκευών. Σύμφωνα με την νομοθεσία για τα αυτοκίνητα, ο σχεδιασμός τους πρέπει να γίνεται με τρόπο ώστε οι επιβάτες να μην υποστούν επιβράδυνση μεγαλύτερη από 20g σε περίπτωση σύγκρουσης με ταχύτητες έως και 15.5 m/s.

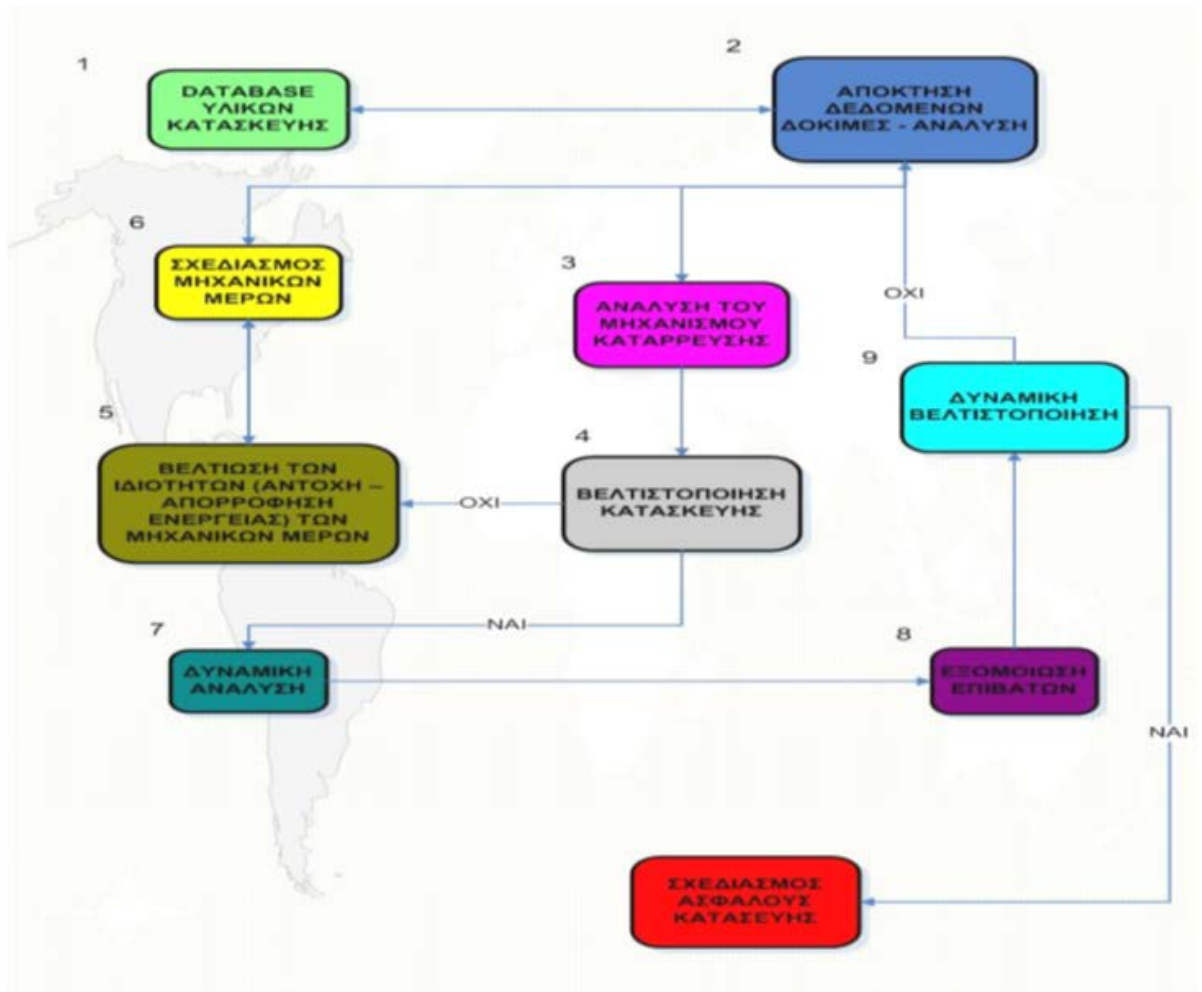
Είναι γενικώς αποδεκτές δύο μέθοδοι για την εκπόνηση της παραπάνω μελέτης. Η πρώτη είναι με δοκιμή και αστοχία σε πρωτότυπα της κατασκευής ενώ η δεύτερη σχετίζεται με τη χρήση μαθηματικού μοντέλου με τη βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων (FINITE ELEMENT ANALYSIS) FEA η οποία αποτελεί και το κύριο περιεχόμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η διαδικασία σχεδιασμού θα πρέπει να υποστηρίζεται από προσομοίωση της απόκρισης του απορροφητή μέσω πεπερασμένων στοιχείων.

Συγκεκριμένα χρειάζεται να εκτελεστούν πειράματα για κάθε ένα από τα δοκίμια. Στόχος μας είναι να έχουμε μια καλή συσχέτιση μεταξύ των πειραματικών και των υπολογιστικών αποτελεσμάτων. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε εργαλεία προσομοίωσης για να προβλέψουμε την τελική συμπεριφορά για μη υπάρχοντα φυσικά σύνθετα υλικά άρα εξοικονομούμε το χρόνο που απαιτείται για την εξεύρεση της βέλτιστης σύνθεσης ενός τέτοιου σύνθετου υλικού.

Ο βέλτιστος σχεδιασμός μιας κατασκευής μπορεί να κλιμακωθεί στα παρακάτω στάδια:

- a) **Βάση δεδομένων των στοιχείων κατασκευής:** Αναπτύσσεται το σκεπτικό για την αρχή του σχεδιασμού. Συλλέγονται στοιχεία για το υλικό που θα βρεθούν με δοκιμές ή με ανάλυση.
- b) **Λήψη στοιχείων μέσω δοκιμής και ανάλυσης:** Αν για ένα συγκεκριμένο στοιχείο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η βάση δεδομένων το στοιχείο αυτό κατασκευάζεται και υπόκειται σε δοκιμές για να προσδιοριστεί και να καταχωρηθεί η συμπεριφορά του.
- c) **Ανάλυση της κατάρρευσης:** Μόλις προσδιοριστούν όλες οι απαιτούμενες ιδιότητες για όλες τις συνιστώσες της κατάρρευσης (αντοχή και ικανότητα απορρόφησης ενέργειας), εκτελείται στατική ανάλυση της κατασκευής με σκοπό τον προσδιορισμό της συνολικής ικανότητας της να φέρει φορτίο. Ο προσδιορισμός αυτός γίνεται με βάση τις ακόλουθες προϋποθέσεις:
 - Η μάζα της καταρρέουσας κατασκευής είναι αμελητέα σε σχέση με την επιβραδύνουσα μάζα
 - Η διεύθυνση και η φορά των φορτίων που αναπτύσσονται στην καταρρέουσα κατασκευή κατά τη δοκιμή μπορούν να προβλεφθούν
- d) **Βελτιστοποίηση της κατασκευής:** Μαζί με την ικανότητα της κατασκευής να φέρει φορτία συνυπολογίζεται η αντοχή και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του κάθε στοιχείου της. Αυτές οι πληροφορίες βοηθούν τον σχεδιαστή να απομονώσει τα στοιχεία εκείνα που δεν είναι συμβατά με την κατασκευή. Τα κριτήρια που εξετάζονται είναι αν και κατά πόσο κάθε στοιχείο μπορεί να μεταβιβάσει τα επιβαλλόμενα φορτία μέσω της κατασκευής και ταυτόχρονα να απορροφήσει ένα ποσοστό της προσδιδόμενης ενέργειας
- e) **Βελτιώσεις στην αντοχή και στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του κάθε στοιχείου:** Μόλις προσδιοριστούν τα μη συμβατά στοιχεία, μπορεί να αποφασισθεί το μέγεθος και το είδος βελτίωσης. Εδώ η ανάλυση αποβλέπει στην εκλογή των ιδιοτήτων που πρέπει να βελτιωθούν και σε τι ποσοστό ώστε να καλυφθούν οι απαιτήσεις.

- f) **Υπολογισμός σε κάμψη:** Έχοντας υπολογίσει τις απαιτούμενες ιδιότητες προσδιορίζονται στη συνέχεια οι διαστάσεις του απλοποιημένου στοιχείου που καταπονούμενο σε θλίψη ή κάμψη θα φτάσει και θα διατηρήσει το απαιτούμενο εσωτερικό φορτίο.
- g) **Σχεδιασμός του στοιχείου:** Παρά το γεγονός ότι το απλοποιημένο στοιχείο που υπολογίστηκε προηγουμένως αρκεί για τα αρχικά στάδια του σχεδιασμού, αποτελεί μόνο έναν οδηγό για τον υπολογισμό των τελικών διαστάσεων της κατασκευής. Εξαιτίας ποικίλων άλλων απαιτήσεων ο υπολογισμός μετατρέπεται σε μια σύνθετη διεργασία, με αφηρητά τις αρχικά υπολογισμένες απλοποιημένες μορφές.
- h) **Δυναμική ανάλυση:** Η ανάλυση αυτή γίνεται με βάση δύο κριτήρια. Από τη μία, αν η μάζα της καταρρέουσας κατασκευής είναι αμελητέα σε σχέση με την επιβραδύνουσα μάζα και η ταχύτητα κρούσης δεν είναι πολύ μεγάλη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η καμπύλη φορτίου που παρέχεται από το στάδιο 3. Αν από την άλλη μεριά, υπάρχουν υπολογίσιμες μάζες στην καταρρέουσα κατασκευή, χρησιμοποιούνται απευθείας τα δεδομένα που προκύπτουν από τα στάδια 1, 2, 6 και 7.
- i) **Προσομοίωση επιβάτη:** Μετά την ολοκλήρωση του σταδίου 8, όπου η ταχύτητα και η υπό κατάρρευση κατασκευή είναι πια γνωστές, μπορεί να είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη η ασφάλεια των επιβατών ή και του περιεχομένου της κατασκευής γενικότερα, κάτι που είναι πρωταρχικής σημασίας για όλα τα επιβατικά οχήματα.
- j) **Δυναμική βελτιστοποίηση:** Αν στο στάδιο 9 προκύψουν μη παραδεκτά αποτελέσματα όσον αφορά την ασφάλεια του επιβάτη, χρησιμοποιείται και πάλι όλο το σύστημα ανάλυσης μέχρι την επίτευξη αποδεκτών αποτελεσμάτων. Το παραπάνω αποτελεί βασικό στοιχείο της διαδικασίας βελτιστοποίησης, γνωστό και ως ανατροφοδότηση των εισόδων του συστήματος.



Σχήμα 1.5.

1.3 Αξιολόγηση συμπεριφοράς συστημάτων απορρόφησης ενέργειας

Όπως είναι φυσικό η αξιολόγηση της συμπεριφοράς των συστημάτων απορρόφησης ενέργειας είναι πρωταρχικής σημασίας. Σχεδιαστικό στόχο αποτελεί η μέγιστη δυνατή διάχυση ενέργειας κατά τρόπο μη αντιστρεπτό. Με βάση τα παραπάνω η βέλτιστη συμπεριφορά που αναμένεται από κάποιο υλικό είναι αυτή του απόλυτα πλαστικού υλικού, όπου το διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης προσδιορίζεται από μία τετραγωνική επιφάνεια. Γίνεται εύκολα αντιληπτή η ανάγκη για την ύπαρξη κριτηρίων ώστε να ποσοτικοποιείται η συμπεριφορά των συστημάτων απορρόφησης ενέργειας και να είναι εύκολη τόσο η σύγκρισή τους όσο και η αξιολόγησή τους.

Τα βασικότερα κριτήρια είναι:

- **Συνολική απορροφούμενη ενέργεια W** : προκύπτει από το διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης με ολοκλήρωση.

$$W = \int P ds$$

- **Μέσο ελαστικό φορτίο P** : με $P = \frac{W}{s}$

- **Ειδική ενέργεια απορρόφησης W_s ή E_s** :

$$W_s = \frac{W}{Mc} = \frac{W}{pVc}$$

- **Ομοιομορφία φορτίου (Load Uniformity)** : $LU = \frac{P_{max}}{P}$

- **Πυκνότητα διάχυσης ενέργειας (Energy Dissipation Density) E_v** :

$$E_v = \frac{W}{V} \text{ με } V : \text{ ο όγκος του κατεστραμμένου υλικού}$$

- **Λόγος b** : $b = \frac{P_{dyn}}{P_{stat}}$ με P_{dyn} : το φορτίο σε δυναμική καταπόνηση

P_{stat} : το φορτίο σε στατική καταπόνηση

1.4 Χρήση κατασκευών λεπτού πάχους ως συστημάτων απορρόφησης ενέργειας

Εκτός από την μέγιστη απορρόφηση ενέργειας ένα άλλο εξίσου σημαντικό στοιχείο για τις σημερινές κατασκευές είναι και η ελαχιστοποίηση του βάρους κάτι το οποίο έχει άμεση σχέση με το κόστος και τις λειτουργικές απαιτήσεις μιας κατασκευής.

Έτσι, η λύση για το παραπάνω πρόβλημα οδηγεί στην κατασκευή λεπτότοιχων κελυφών π.χ. σωλήνων στους οποίους βασίζεται και η κύρια μελέτη για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων ενός υλικού. Οι σωλήνες αυτοί όταν υπόκεινται σε αξονική καταπόνηση καταρρέουν με διάφορους τρόπους ανάλογα το υλικό τους.

Για να μπορέσουμε να ελέγξουμε και ειδικότερα να προβλέψουμε τον μηχανισμό κατάρρευσης χρησιμοποιούνται μηχανισμοί σκανδάλης (triggering mechanisms). Ειδικά σε κελύφη από σύνθετα υλικά τα οποία δεν παρουσιάζουν κάποιον δεδομένο τρόπο κατάρρευσης, η χρήση τέτοιων μηχανισμών κρίνεται αναγκαία.

2. ΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

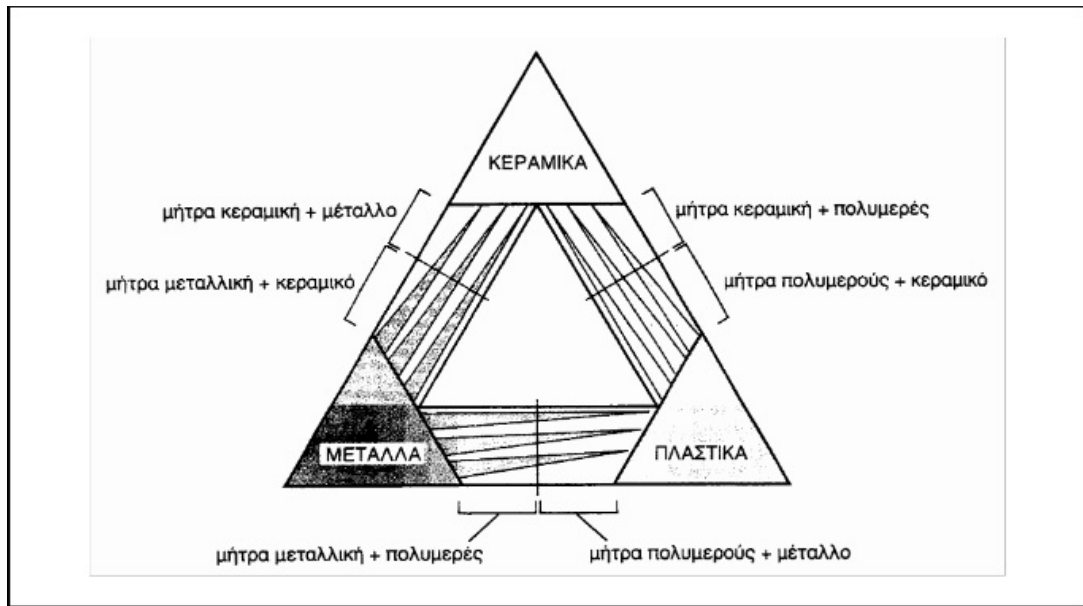
2.1 Εισαγωγή - Ορισμός

Σύνθετα ονομάζονται τα υλικά τα οποία αποτελούνται από επιμέρους υλικά με σημαντικά διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες ενώ και το ίδιο το σύνθετο υλικό έχει επίσης διαφορετικές ιδιότητες από εκείνες των συστατικών του.

Το ένα συστατικό το οποίο προσφέρει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες χαρακτηρίζεται ως συστατικό ενίσχυσης και ανάλογα το δεύτερο συστατικό καλείται μήτρα, είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει την μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων ενίσχυσης.

Το μικρό βάρος, η υψηλή αντοχή, η ιδιαίτερα ανεπτυγμένη αντοχή σε διάβρωση, η πολύ καλή συμπεριφορά σε κόπωση, σε κρούση και στη διάδοση ρωγμών είναι λίγοι από τους παράγοντες εκείνους που έχουν οδηγήσει τα σύνθετα υλικά στην πρώτη θέση μεταξύ των κατασκευαστικών υλικών για μεγάλο πλήθος εφαρμογών

Όμως τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα. Συγκεκριμένα έχουν παρατηρηθεί υψηλά επίπεδα ερπυσμού, μικρή αντίσταση σε μηχανική φθορά, ευαίσθητη συμπεριφορά σε δυσμενείς συνθήκες περιβάλλοντος όπως και το ιδιαίτερα υψηλό αρχικό τους κόστος. Βέβαια με την πάροδο του χρόνου και την αντίστοιχη έρευνα και μελέτη βαθμιαία αντιμετωπίζονται πιο αποτελεσματικά.



Σχήμα 2.1. Κατηγορίες σύνθετων υλικών

2.2 Ταξινόμηση των σύνθετων υλικών

Ανάλογα με την μορφή του συστατικού ενίσχυσης, τα σύνθετα κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- Ινώδη σύνθετα υλικά (fibrous composites): Με ενίσχυση ινών εμποτισμένων σε υλικό μήτρας.
- Στρωματικά σύνθετα (laminated composites): Με επάλληλες στρώσεις υλικών.
- Κοκκώδη σύνθετα (particulate composites): Με ενίσχυση σωματιδίων διασκορπισμένων στο υλικό της μήτρας

Τα ινώδη υλικά μπορούν να διαχωριστούν επιπλέον ανάλογα με τον προσανατολισμό και τη διάταξη των ινών μέσα στη μήτρα και διακρίνονται σε:

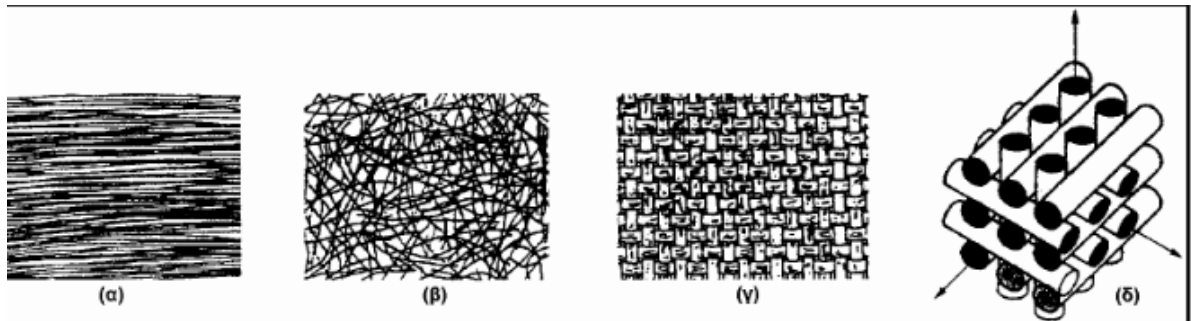
- Μονοδιευθυντικά σύνθετα, στα οποία, οι ίνες έχουν όλες την ίδια διεύθυνση.
- Πολυδιευθυντικά σύνθετα, στα οποία, οι ίνες έχουν διαφορετικές διευθύνσεις.

Τα πολυδιευθυντικά σύνθετα με τη σειρά τους χωρίζονται σε:

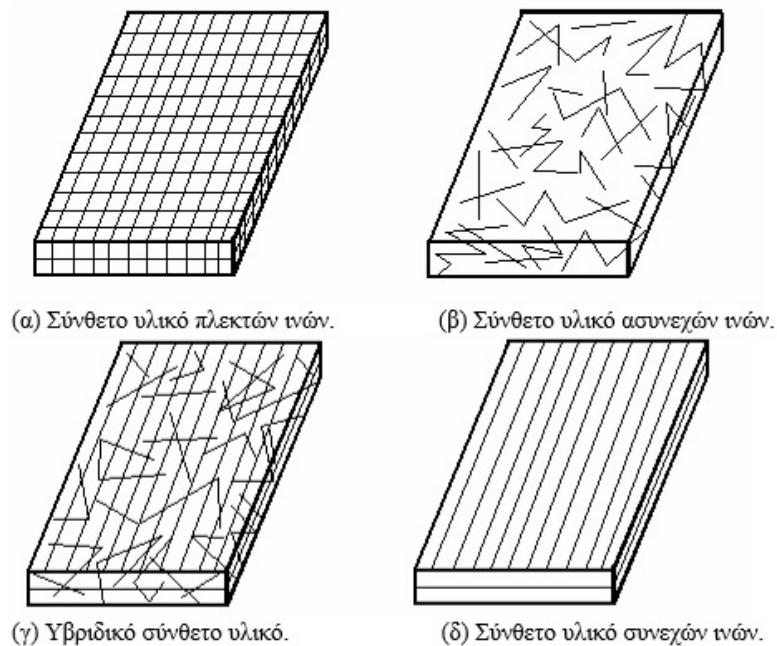
- Σύνθετα με ίνες τυχαίας διεύθυνσης.
- Σύνθετα με ίνες σε πλέξη ύφανσης
- Σύνθετα με ίνες σε τρισορθογώνια ύφανση

Σχετικά με το λόγο μήκους προς διάμετρο των ινών, τα ινώδη σύνθετα κατηγοριοποιούνται σε:

- Συνεχείς ή μεγάλου μήκους ίνες (continuous fibers), όταν είναι $l/d \geq 100$.
- Ασυνεχείς ή κοντές ίνες (discontinuous fibers), όταν είναι $l/d < 100$.
- Νηματίδια ή τριγίτες (whiskers): Με $d < 1 \mu\text{m}$ και $l = 100 \mu\text{m}$ (πρόκειται για λεπτούς μονοκρυστάλλους κεραμικού υλικού).



Σχήμα 2.2. Τύποι διάταξης ινών: (α) μονοδιευθυντικές ίνες, (β) ίνες τυχαίου προσανατολισμού, (γ) ίνες σε τρισορθογώνια πλέξη



Σχήμα 2.2.

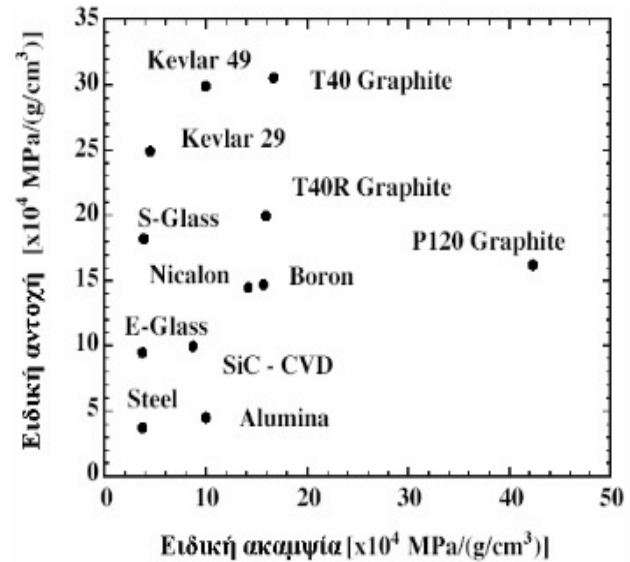
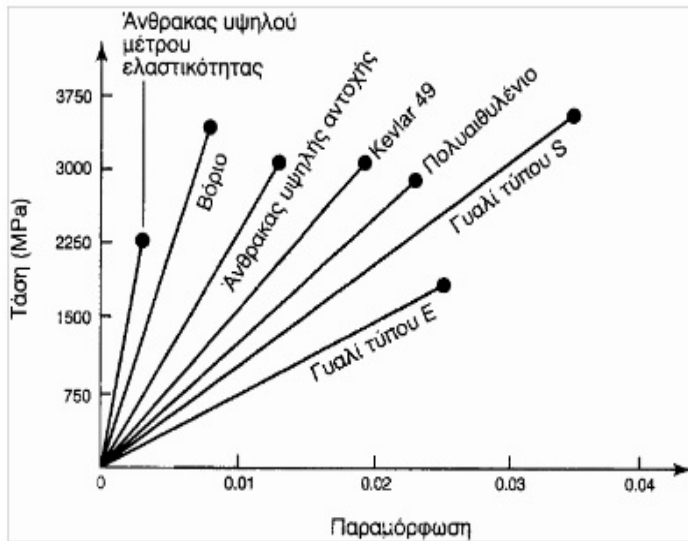
2.2.1 Ίνες

Προκειμένου οι ίνες να προσφέρουν ικανοποιητική ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων της μήτρας, το υλικό κατασκευής τους επιλέγεται, έτσι ώστε να παρουσιάσει υψηλό μέτρο ελαστικότητας, υψηλή τάση θραύσης σε εφελκυσμό, μεγάλη ακαμψία, χαμηλή δυσθραυστότητα και επιπλέον να έχει μικρή πυκνότητα.

Στα προηγμένα σύνθετα υλικά οι ενισχυτικές ίνες είναι κατασκευασμένες από ανόργανα υλικά (γυαλί, άνθρακας, μέταλλα, κεραμικά) είτε από οργανικά υλικά (πολυμερή).

2.2.2. Σύγκριση ενισχυτικών ινών

A) Ως προς την ειδική αντοχή και την ειδική ακαμψία



(α)

(β)

Σχήμα 2.3.

B) Ως προς την παραμόρφωση θραύσης

Ίνα	Παραμόρφωση θραύσης (%)
Kevlar	3-4
Glass	2
Carbon	1
Ceramic	<1

Σχήμα 2.4.

2.2.3 Μήτρα

Ο ρόλος της μήτρας συνίσταται σε:

- Συγκράτηση των ινών μεταξύ τους
- Προστασία των ινών από περιβαλλοντικές φθορές και προσβολές
- Μεταβίβαση των μηχανικών τάσεων που ασκούνται συνολικά στο σύνθετο υλικό προς τις ίνες
- Ανακοπή της διάδοσης των ρωγμών, που ξεκινούν από θραύση των ινών.

Για να ικανοποιεί τον ρόλο για τον οποίο προορίζεται η μήτρα θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από:

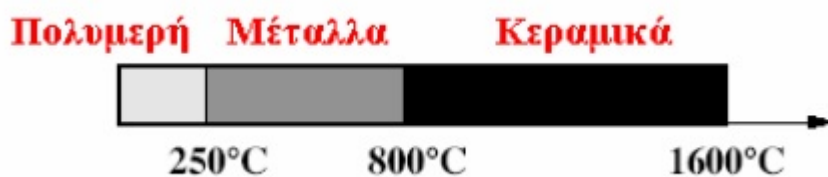
- Ολκιμότητα
- Ανθεκτικότητα
- Σχετική ακαμψία
- Σημείο τήξης μεγαλύτερο από τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του συνθέτου υλικού

Συνήθως το υλικό της μήτρας έχει μικρότερη πυκνότητα, αντοχή και δυσκαμψία από τις ίνες.

Οι μήτρες διακρίνονται σε κατηγορίες ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους:

- Οργανικές
- Μεταλλικές
- Κεραμικές

Μια γενική οδηγία αναφορικά με τα θερμοκρασιακά όρια για κάθε ομάδα υλικών παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.5

2.2.4 Ειδικότερα χαρακτηριστικά

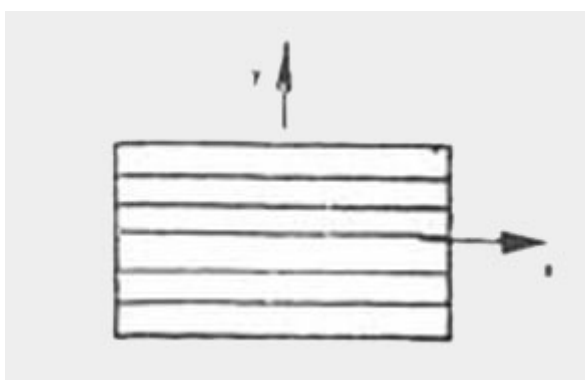
Εξ' ορισμού, όπως αναφέραμε παραπάνω, σύνθετα υλικά, ονομάζονται τα υλικά τα οποία προκύπτουν από τη σύνθεση, σε μακροσκοπική κλίμακα, δύο ή περισσότερων υλικών με σκοπό την απόκτηση καλύτερων και χρησιμότερων ιδιοτήτων. Το σύνθετο υλικό είναι ανομοιογενές και ανισότροπο.

Ανομοιογενές είναι το υλικό του οποίου οι ιδιότητες είναι διαφορετικές από σημείο σε σημείο, ενώ το ανισότροπο συμπεριφέρεται με διαφορετική αντοχή όταν το φορτίο εφαρμόζεται υπό διαφορετικές διευθύνσεις.

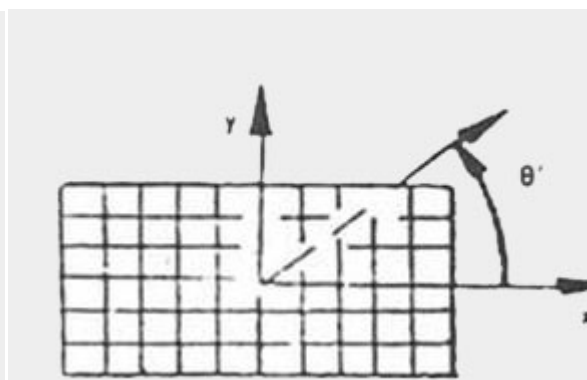
Σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχουν n επίπεδα συμμετρίας των ιδιοτήτων του υλικού. Επομένως τα τεχνικά χαρακτηριστικά είναι συναρτήσεις του προσανατολισμού σε ένα σημείο του υλικού.

Για να αποκτηθεί ένα ισότροπο σύνθετο υλικό π.χ. από υαλοϋφασμα, είναι απαραίτητο να τοποθετηθούν περισσότερες στρώσεις υφάσματος υπό διαφορετικές κύριες διευθύνσεις αντοχής έτσι ώστε το υλικό που θα προκύψει να παρουσιάζει την συγκεκριμένη συμπεριφορά υπό οποιαδήποτε διεύθυνση του εφαρμοστεί το φορτίο.

Αντιθέτως με τα σύνθετα υλικά, τα μεταλλικά υλικά θεωρούνται ομοιογενή και ισότροπα.



Σχήμα 2.6. Σχηματική παράσταση υφάσματος με νήματα κατά μία μόνο διεύθυνση.



Σχήμα 2.7. Σχηματική παράσταση υφάσματος με νήματα κατά δύο διευθύνσεις την διαμήκη (x) και την εγκάρσια (y).

Ένα πολύ γνωστό σύνθετο υλικό είναι εκείνο το οποίο αποκτάται εμποτίζοντας υαλοϋφασμα με πολυεστερική ή εποξειδική ρητίνη.

Όταν η ρητίνη στερεοποιηθεί, τότε το σύνθετο υλικό που θα προκύψει θα έχει τεχνικά χαρακτηριστικά τα οποία θα είναι συναρτήσεις των δύο επιμέρους υλικών (υαλοϋφάσματος – ρητίνης), του τρόπου εμποτισμού, της αναλογίας σε βάρος υφάσματος/ρητίνης, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος υπό την οποία έγινε η εργασία, της θερμοκρασίας υπό την οποία θα γίνει η σκλήρυνση της ρητίνης, τη διεύθυνση των κυρίων νημάτων του υφάσματος σε σχέση με την διεύθυνση εφαρμογής του φορτίου, κτλ. Γίνεται επομένως σαφές ότι εάν το σύνθετο υλικό δεν προμηθεύεται έτοιμο αλλά κατασκευάζεται από τον εκάστοτε χρήστη, τότε είναι πολύ πιθανό να παρουσιάζει διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά από χρήστη σε χρήστη.

Αυτό βέβαια δε συμβαίνει μετά μεταλλικά υλικά τα οποία ο χρήστης προμηθεύεται έτοιμα από τον παραγωγό και πληρούν συγκεκριμένες προδιαγραφές. Είναι σαφές ότι για να αποκτηθούν οι μέγιστες επιθυμητές τιμές των τεχνικών χαρακτηριστικών του σύνθετου υλικού, απαιτείται πολύ μεγάλη εμπειρία τόσο στην επιλογή των δύο υπό σύνθεση υλικών, όσο και στη διεργασία σύνθεσης. Εάν δεν υπάρχει εμπειρία τότε τα τεχνικά χαρακτηριστικά και γενικώς η συμπεριφορά του προκύψαντος σύνθετου υλικού θα είναι σίγουρα τυχαία.

Οι δυσκολίες που συναντώνται ειδικά στον σωστό εμποτισμό του υφάσματος με την κατάλληλα και άριστα παρασκευασμένη ρητίνη, τείνουν να μειωθούν με την εμφάνιση των προεμποτισμένων υφασμάτων. Αυτά τα υφάσματα αφού εμποτιστούν με τη σωστή ποιότητα και ποσότητα ρητίνης, τοποθετούνται σε ξηρό πάγο όπου υπό τη χαμηλή θερμοκρασία η σκλήρυνση της ρητίνης σταματά σε μία προκαθορισμένη φάση. Όταν αυτό το εργοστασιακά προεμποτισμένο, σύνθετο υλικό πρόκειται να χρησιμοποιηθεί τότε μεταφέρεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες όπου και συνεχίζεται η σκλήρυνση της ρητίνης.

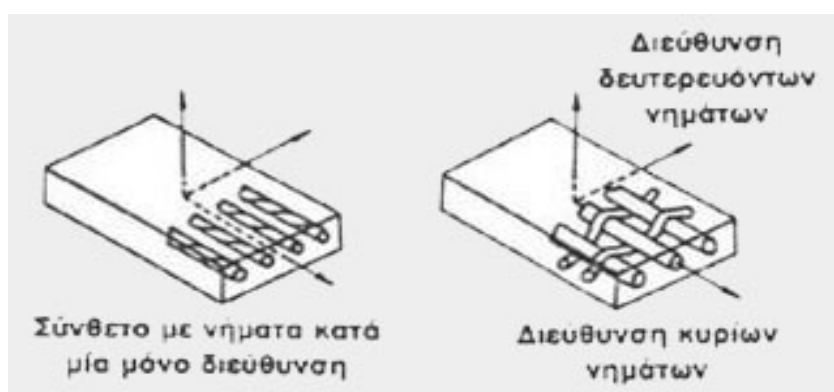
2.2.4.1. Σύνθετα νημάτων/ρητίνης

Τα συνηθέστερα σύνθετα υλικά αποκτώνται με υφάσματα ή νήματα εμποτισμένα σε ρητίνη. Τα υαλοϋφάσματα, τα ανθρακονήματα, το Kevlar και άλλα γνωστά εμπορικά ονόματα, συνιστούν τη μεγαλύτερη οικογένεια των σύνθετων υλικών.

2.3. Τεχνικά χαρακτηριστικά

Το βασικότερο πλεονέκτημα των σύνθετων έναντι άλλων υλικών (μεταλλικών, πλαστικών, κεραμικών κτλ.) είναι η δυνατότητα απόκτησης της επιθυμητής αντοχής κατά τη διεύθυνση εφαρμογής του φορτίου μέσω της απλής διευθέτησης, προσανατολισμού, των νημάτων του υφάσματος.

Εάν η διεύθυνση του φορτίου είναι σταθερή, τότε είναι εύλογο να χρησιμοποιηθεί ύφασμα μίας κύριας διεύθυνσης στο οποίο τα κύρια νήματα είναι τοποθετημένα κατά μία μόνο διεύθυνση έτσι ώστε η μέγιστη αντοχή του υφάσματος να είναι κατά τη διεύθυνση αυτή. Σε αυτό τον τύπο υφάσματος υπάρχουν και λίγα δευτερεύοντα, αμελητέας σημασίας νήματα κάθετα προς την κύρια διεύθυνση με σκοπό να συγκρατούν με απλή πλέξη τα κύρια νήματα.



Σχήμα 2.8.

Στην περίπτωση που το φορτίο είναι στο επίπεδο και κατά δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις, τότε στην κατασκευή του σύνθετου πρέπει να χρησιμοποιηθεί ύφασμα με κύρια νήματα τοποθετημένα κατά δύο διευθύνσεις κάθετες μεταξύ τους.

Σ' αυτή την περίπτωση ο αριθμός νημάτων ανά μονάδα μήκους κατά την εγκάρσια διεύθυνση είναι ακριβώς ίσος με τον αριθμό νημάτων ανά μονάδα μήκους κατά τη διαμήκη διεύθυνση.

Επομένως και η αντοχή του σύνθετου είναι ίδια κατά τις δύο αυτές διευθύνσεις και είναι η μέγιστη. Η μικρότερη αντοχή παρουσιάζεται κατά τη διεύθυνση της διχοτόμου της ορθής γωνίας που σχηματίζουν τα κύρια νήματα, δηλαδή κατά τη διεύθυνση που σχηματίζει γωνία $\theta^\circ = 45^\circ$ με τις κύριες διευθύνσεις. Ένα τέτοιο επίπεδο, σύνθετο υλικό, που παρουσιάζει την αυτή αντοχή κατά διευθύνσεις κάθετες μεταξύ τους, ονομάζεται "ορθότροπο".

Παρομοίως ονομάζεται ορθότροπο και το τρισδιάστατο σύνθετο υλικό που έχει τρία κάθετα μεταξύ τους επίπεδα συμμετρίας των ιδιοτήτων ελαστικότητας του και γενικότερα των μηχανικών του ιδιοτήτων.

Το σύνθετο υλικό που υπό οποιαδήποτε διεύθυνση (ή γωνία θ) στο επίπεδο του παρουσιάζει τις αυτές μηχανικές ιδιότητες, ονομάζεται δισδιάστατο "ισότροπο" υλικό.

Στον τρισδιάστατο χώρο αυτό το υλικό είναι και ονομάζεται "σχεδόν ισότροπο".

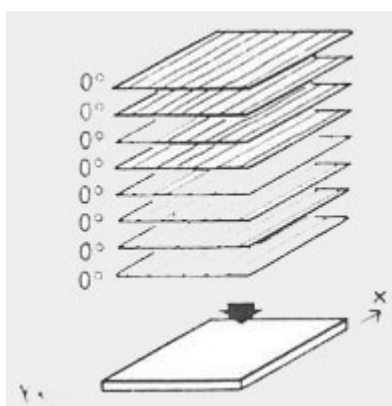
Τέτοιο σύνθετο υλικό μπορεί να κατασκευαστεί τοποθετώντας πολλές στρώσεις υφάσματος με τις κύριες διευθύνσεις των νημάτων κατάλληλα διευθετημένες έτσι ώστε το σύνθετο που θα προκύψει να συμπεριφέρεται κατά τον ίδιο τρόπο υπό οποιαδήποτε διεύθυνση στο επίπεδο (xy) του εφαρμοστεί το φορτίο.

Συνήθως ένα "σχεδόν ισότροπο" σύνθετο υλικό μπορεί να αποκτηθεί τοποθετώντας κατ' ελάχιστο τρία στρώματα ορθότροπου υφάσματος, με το διαμήκη άξονα να σχηματίζει γωνίες $+60, 0, -60$, με τον άξονα αναφοράς x, όπου 0, σχηματίζει ο διαμήκης άξονας του μεσαίου στρώματος με τον άξονα x.

Είναι ευκολονόητο επομένως ότι τα σύνθετα υλικά είναι γενικώς "ανισότροπα" υλικά, ενώ μπορούν να γίνουν με τον κατάλληλο αριθμό στρωμάτων και διεύθυνση των νημάτων, υλικά "δισδιάστατα ισότροπα" ή αλλιώς υλικά "τρειςδιάστατα σχεδόν ισότροπα".

Η ρητίνη παίζει σημαντικό ρόλο στα μηχανικά χαρακτηριστικά του σύνθετου. Η ποσοστιαία αναλογία του βάρους της ρητίνης προς το συνολικό βάρος του σύνθετου (ρητίνης + υφάσματος) είναι ένα βασικό στοιχείο της σύνθεσης. Συνήθως το ποσοστό του βάρους της ρητίνης κυμαίνεται από 25-50% του συνολικού Βάρους.

Χρησιμοποιούνται κυρίως δύο τύποι ρητινών, οι πολυεστερικές και οι εποξειδικές. Οι πολυεστερικές ρητίνες έχουν κατώτερες μηχανικές ιδιότητες από τις εποξειδικές και γι' αυτό δε χρησιμοποιούνται στις αεροπορικές κατασκευές, αλλά αντιθέτως είναι ο κύριος τύπος ρητίνης για τις ναυτικές κατασκευές. Μερικές γνωστές εποξειδικές ρητίνες, εμποτισμού του εμπορίου είναι η Shell Epon 828, η Ciba Geigy 604, η Dow Der 331, η Safe-T-Poxy 2410 της Arco, η EA 9309 της Hysol, και άλλες.



Σχήμα 2.8. Κατασκευή συνθέτου μιας διεύθυνσης με 8 στρώσεις νημάτων κατά την αυτή διεύθυνση

Οι τελικές ιδιότητες ενός ιώδους σύνθετου υλικού εξαρτώνται και από γεωμετρικές παραμέτρους όπως διάμετρος, μήκος, περιεκτικότητα σε όγκο των ινών, ευθυγράμμιση και χωρική διάταξη των ινών εντός του υλικού μήτρας.

Διάκενα

Η επίδραση των διακένων στη διατμητική και διαστρωματική αντοχή ενός συνθέτου υλικού είναι σημαντικότερη. Ανεξαρτήτως του τύπου των ινών ή της ρητίνης έχει διαπιστωθεί ότι διάκενα της τάξεως του 4% επιφέρουν ελάττωση της διατμητικής αντοχής μέχρι 30%. Τα διάκενα δημιουργούνται κατά την Παρασκευή του συνθέτου υλικού. Εμφανίζονται είτε εντός μιας στρώσης, παράλληλα των ινών, με ελλειψοειδή ή σφαιρική μορφή, είτε μεταξύ των στρώσεων ενός πολύστρωτου. Η δημιουργία τους βασίζεται κυρίως σε δύο λόγους:

- Στη παγίδευση φυσαλίδων αέρα ανάμεσα στη ρητίνη και τις ίνες

- Στη παρουσία πτητικών ουσιών που παράγονται κατά την θερμική κατεργασία των θερμοσκληραινόμενων ρητινών ή κατά την τήξη των θερμοπλαστικών

Διεπιφάνεια (interface)

Η διεπιφάνεια ίνας-μήτρας ορίζεται ως κοινή επιφάνεια μεταξύ των δύο συστατικών υλικών, καθώς και η περιοχή στα σύνορα αυτής της επιφάνειας. Οι μηχανικές και φυσικές ιδιότητες της διεπιφάνειας διαφέρουν και από αυτές της μήτρας και από αυτές της ίνας. Για λόγους θεωρητικής ανάλυσης και μόνο, θεωρείται ως έχουσα μηδενικό πάχος. Στην πραγματικότητα όμως, και κατά τη διάρκεια των διεργασιών πρόσφυσης ίνας-μήτρας, διάφοροι παράγοντες επενεργούν στη διαφοροποίηση, τοπικά, των ιδιοτήτων και στις δύο πλευρές της διεπιφάνειας λόγω διάχυσης, χημικών αντιδράσεων και διαφορικών θερμικών φαινομένων.

Μηχανισμοί πρόσφυσης

Υπάρχουν διάφορα μοντέλα προσομοίωσης του δεσμού μεταξύ ίνας και μήτρας βασισμένα στις θεωρίες μηχανικής, φυσικής και ηλεκτροχημικής πρόσφυσης.

Ο μηχανικός δεσμός προκύπτει με την προώθηση της υγρής φάσης εντός των πόρων και ρωγμών της στερεάς. Η τραχύτητα της στερεάς επιφάνειας αυξάνει την αποτελεσματικότητα αυτού του δεσμού. Ο μηχανικός δεσμός εκδηλώνεται μέσω της αντίστασης τριβής κατά την σχετική ολίσθηση των δύο επιφανειών και ενισχύεται από την ύπαρξη θερμικών τάσεων που δρουν εγκάρσια στην επιφάνεια επαφής

Ο φυσικός δεσμός εξαρτάται από την θερμοδυναμική συμβατότητα της υγρής και της στερεάς φάσης. Αυτή προσδιορίζεται από τη γωνία επαφής της επιφάνειας της ίνας και μιας σταγόνας της υγρής φάσης. Η υψηλή θερμοδυναμική συμβατότητα χαρακτηρίζεται από μικρή γωνία επαφής.

Ο χημικός δεσμός μπορεί να οφείλεται είτε στην ηλεκτροστατική έλξη μεταξύ δύο αντιθέτως φορτισμένων ατόμων, είτε σε ομοιοπολική αλληλεπίδραση. Δευτερογενείς δεσμοί γεννώνται από τις ασθενείς δυνάμεις Van der Waals. Δεσμός μεταξύ δύο φάσεων μπορεί ακόμα να αναπτυχθεί όταν μόρια του πολυμερούς διαχέονται στο μοριακό δίκτυο της άλλης φάσης

Από τη στιγμή που η πρόσφυση μεταξύ των δύο φάσεων έχει επιτευχθεί με τους παραπάνω μηχανισμούς η μεταβίβαση των τάσεων από τη μία φάση στην άλλη, μπορεί να αναλυθεί ως καθαρά μηχανική διαδικασία.

Το τασικό πεδίο περί τη διεπιφάνεια

Όταν ένα εξωτερικό φορτίο εφαρμόζεται σε ένα σύνθετο υλικό με ευθυγραμμισμένες ίνες, οι τάσεις μεταδίδονται από τη μαλακή φάση (μήτρα) στην ισχυρή (ίνα) μέσω της κοινής τους περιοχής, της διεπιφάνειας. Αφού οι δύο φάσεις έχουν διαφορετικές ελαστομηχανικές ιδιότητες, η δομική ακεραιότητα του σύνθετου εξαρτάται από την ικανότητα της διεπιφάνειας να υποφέρει τις μετατοπίσεις που αναγκαστικά αναπτύσσονται στην περιοχή. Συνεπώς, το μακροσκοπικά ομοιόμορφο τασικό πεδίο ανατρέπεται στην περιοχή τις διεπιφάνειας.

Εφόσον το μέτρο ελαστικότητας των ινών είναι πολύ υψηλότερο από της μήτρας, εκτιμάται ότι οι ίνες φέρουν σχεδόν όλο το αξονικό φορτίο, ενώ η μήτρα υποβάλλεται αποκλειστικά σε διάτμηση. Η παραπάνω υπόθεση αποτελεί τη βάση της θεωρίας shear-lag, ή διατμητικής υστέρησης, που αναπτύχθηκε σαν πρώτη προσπάθεια ανάλυσης του πολύπλοκου τασικού πεδίου της διεπιφάνειας.

Η μεταφορά του φορτίου από την μήτρα στην ίνα

Ο μηχανισμός μεταβίβασης των τάσεων από τη μήτρα στην ίνα μέσω της διεπιφάνειας ενεργοποιείται στα σημεία ασυνέχειας του σύνθετου υλικού, όπως τα άκρα των ινών, τα σημεία θραύσης, εγκοπές και ρωγμές. Το τασικό πεδίο στη διεπιφάνεια ίνας-μήτρας δημιουργείται υπό την επίδραση εξωτερικών φορτίων και θερμικών τάσεων. Η ένταση αυτού του πεδίου εξαρτάται από την διάταξη των ινών.

Όταν ένα ινώδες σύνθετο υλικό καταπονείται στη διεύθυνση των ευθυγραμμισμένων ινών, η ακεραιότητα του σύνθετου εξαρτάται από την ικανότητα της διεπιφάνειας να αντέξει στις μετατοπίσεις που αναπτύσσονται στην περιοχή. Με την προϋπόθεση ότι η δυσκαμψία των ινών είναι πολύ μεγαλύτερη από της μήτρας, η ελαστική ανάλυση του τασικού πεδίου της διεπιφάνειας βασίζεται στην παραδοχή ότι οι ίνες μεταφέρουν όλο το αξονικό φορτίο, ενώ η μήτρα φέρει τις διατμητικές τάσεις.

Αντοχή του διεπιφανειακού δεσμού

Η αντοχή του διεπιφανειακού δεσμού ίνας-μήτρας μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά, είτε έμμεσα, είτε άμεσα. Ο έμμεσος προσδιορισμός επιτυγχάνεται με πειράματα επί δοκιμίων συνθέτων υλικών που έχουν κύριο στόχο τη μέτρηση μιας μακροσκοπικής ιδιότητας, όπως η διαστρωματική αντοχή ενός πολύστρωτου, η αντοχή σε εγκάρσιο εφελκυσμό, η αντοχή σε κάμψη. Καθώς δεν υπάρχει αναλυτική σχέση που να συνδέει αυτές τις μακροσκοπικές ιδιότητες με την αντοχή του διεπιφανειακού δεσμού, η τελευταία μπορεί να εκτιμηθεί από αυτά τα τεστ μόνο ποιοτικά και συγκριτικά.

Αντίθετα, η άμεση μέτρηση της αντοχής του διεπιφανειακού δεσμού εκτελείται με πειράματα επί προτύπων μονονηματικών δοκιμίων, που είναι μεν ιδανικά και μη ρεαλιστικά σύνθετα υλικά, παρασκευάζονται όμως και δοκιμάζονται εύκολα και οικονομικά. Ευρέως διαδεδομένα τεστ αυτής της κατηγορίας είναι η αποκόλληση με εφελκυσμό, το πείραμα της σταγόνας, το πείραμα της εγκάρσιας, θλιπτικής σημειακής πίεσης στην διατομή της ίνας, το τεστ της θλιπτικής διατμητικής αστοχίας, το πείραμα του αμφίκυρτου δοκιμίου και τέλος το πλέον δημοφιλές το πείραμα της πολλαπλής μονονηματικής θραύσης. Από τα παραπάνω, μόνο το πείραμα του αμφίκυρτου δοκιμίου προσδιορίζει την εγκάρσια εφελκυστική αντοχή της διεπιφάνειας, ενώ τα υπόλοιπα, υπολογίζουν την αντοχή της διεπιφάνειας σε διάτμηση, από την τιμή της μέγιστης διατμητικής τάσης που μπορεί να αναπτυχθεί πριν την αστοχία.

Στον πίνακα 2.9. δίδονται ορισμένα μηχανικά χαρακτηριστικά διαφόρων τύπων νημάτων και σύνθετων υλικών. Όπου δεν αναφέρεται η εποξειδική ρητίνη τότε τα μηχανικά χαρακτηριστικά είναι του νήματος μόνο.

Τα πηλικά E/γ (Ειδικό μέτρο ελαστικότητας) και σ/γ (ειδική τάση), είναι βασικές παράμετροι για τη σωστή επιλογή του υλικού στην αεροπορική κατασκευή (όπου γ είναι το ειδικό βάρος).

Υπάρχουν υλικά τα οποία έχουν υψηλό μέτρο ελαστικότητας (E) και άλλα που έχουν υψηλή τιμή της μέγιστης τάσης εφελκυσμού (σ).

Η κλίση της καμπύλης (σ - ϵ), τάσης (σ) - επιμήκυνσης (ϵ), προσδιορίζει την ελαστικότητα του υλικού.

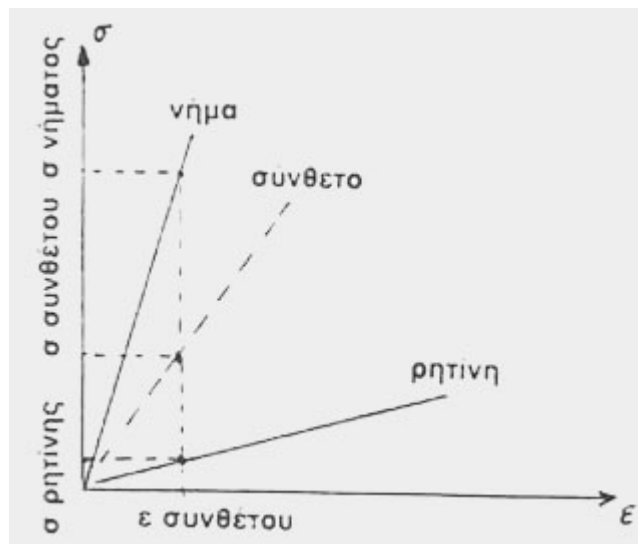
Υλικό	Μέτρο Ελαστικότητας E (Kg/mm ²)	Μέγιστη τάση εφελκυσμού σ (Kg/mm ²)	Ειδικό βάρος (Kg/m ³)	Ειδικό μέτρο E/γ (m) X10 ⁵	Ειδική τάση σ/γ (m) X10 ⁵
E- Υαλονήματα	7350	320	2550	2.9	1.25
S- Υαλονήματα	8400	380	2490	3.4	1.53
E-Υαλονήματα Εποξειδ.	5250	140	1940	2.7	0.72
S-Υαλονήματα Εποξειδ.	5250	210	1940	2.7	1.08
Κέβλαρ 29	6300	350	1440	4.4	2.43
Κέβλαρ 49	14000	350	1660	8.4	2.11
Κέβλαρ 49/Εποξειδ.	8400	200	1520	5.5	1.32
HM Νήματα Γραφίτη	38500	210	1910	20.2	1.10
HS Νήματα Γραφίτη	24500	245	1770	13.8	1.38
HM Γραφίτη Εποξειδ.	21000	95	1605	13.1	0.59
HS Γραφίτη Εποξειδ.	15400	145	1495	10.3	0.97
Νήματα Βορίου	42000	280	2630	16.0	1.06
Νήματα Βορίου/Εποξ.	21700	155	2075	10.5	0.75
Αλουμίνιο 7075-T6	7200	55	2685	2.7	0.20

Αλουμίνιο 6061-T6	7200	30	2685	2.7	0.11
Τιτανίο Ti-6Al- 4V	11200	105	4430	2.5	0.24
Χρόμιο μολυβδενιούχος	20300	95	7830	2.6	0.12
Χάλυβας 4130					

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.9. Πίνακας μηχανικών χαρακτηριστικών νημάτων και σύνθετων υλικών.

HM = Νήματα γραφίτη υψηλού μέτρου ελαστικότητας.

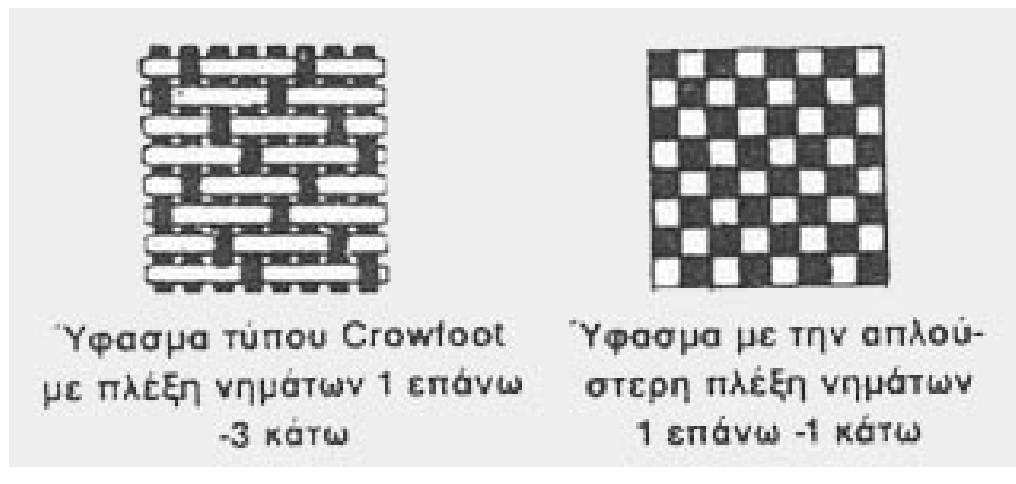
HS = Νήματα γραφίτη υψηλής τάσης εφελκυσμού.



Σχήμα 2.10.. Καμπύλες σ - ϵ .

2.4. Είδη υφασμάτων

Τα Βασικότερα είδη υφασμάτων που χρησιμοποιούνται, είναι τα ακόλουθα.



Σχήμα 2.11.

Ε-Υαλοϋφασμα

Το υαλοϋφασμα είναι το συνηθέστερο υλικό (ανόργανο) που χρησιμοποιείται στις σύνθετες κατασκευές. Είναι υλικό που δεν καίγεται, δε σαπίζει, δεν απορροφά υγρασία και δεν αλλοιώνεται με το χρόνο. Επίσης, έχει γραμμική συμπεριφορά ελαστικότητας, η καμπύλη (σ-ε) είναι ευθεία γραμμή έως το σημείο θραύσης και παρουσιάζει εξαιρετικά υψηλή αντοχή στα φορτία. Ευρίσκεται στο εμπόριο σε μεγάλη ποικιλία πλέξεων και είναι σχετικά το φθηνότερο ύφασμα για σύνθετες κατασκευές. Χρησιμοποιείται στις αεροπορικές κατασκευές ως υλικό επικάλυψης, στην κατασκευή κύριων και δευτερευόντων δομικών στοιχείων, στην κατασκευή του ριναίου κώνου, κτλ.

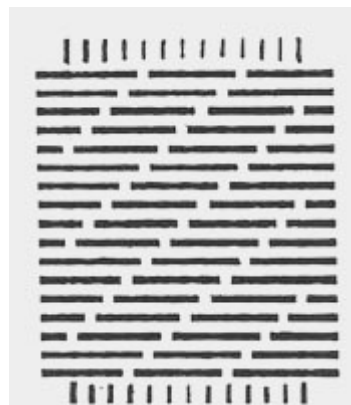


Σχήμα 2.12. Αποτύπωμα
πλέξης νημάτων 1 επάνω -1
κάτω

S-Υαλουφασμα

Έχει τις ίδιες περίπου ιδιότητες με το E-Υαλοϋφασμα (E:για Electrical, S: για Structural) αλλά υπερέχει αυτού κατά 20% περίπου στην αντοχή και 15% στο μέτρο ελαστικότητας. Ο τύπος S-ΥΥ (ΥαλοΥφασμα) είναι ελαφρότερος από τον E-ΥΥ, παρουσιάζει μεγάλη αντοχή στην κρούση και κοστίζει περίπου τρεις φορές περισσότερο από τον E-ΥΥ

Χρησιμοποιείται για κρίσιμα δομικά στοιχεία και σε συνδυασμό με το E-ΥΥ για εξωτερικές δεξαμενές, για δοχεία καυσίμων, για δοχεία υψηλής πίεσης, για ριναίους κώνους κτλ.

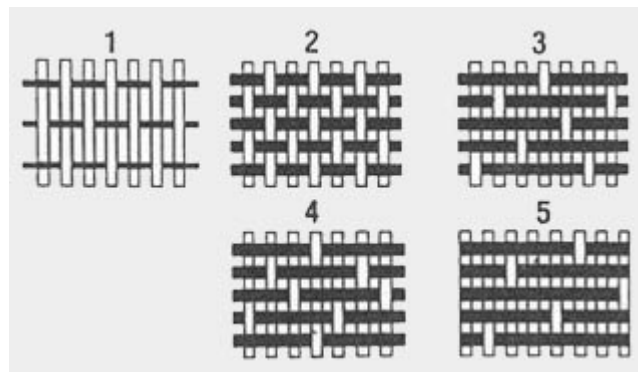


Σχήμα 2.13. Αποτύπωμα
πλέξης νημάτων 4 επάνω -1
κάτω.

S2- Υαλοϋφασμα

Είναι παραλογή του S-YY με τα ίδια μηχανικά χαρακτηριστικά αλλά είναι ποιοτικώς περισσότερο ευέλικτο και δεν ανταποκρίνεται ακριβώς στις προδιαγραφές MIL-SPEC., όπως αντιθέτως συμβαίνει με τον τύπο S-YY.

Χρησιμοποιείται σε υβριδικές σύνθετες κατασκευές (συνδυασμός δύο ή περισσότερων διαφορετικών υφασμάτων, π.χ. (E-YY + S2-YY + Κέβλαρ) / Εποξειδική, για δομικά στοιχεία που απαιτούν υψηλό μέτρο ελαστικότητας, για δοχεία υψηλής πίεσης και για τμήματα που καταπονούνται σε υψηλές θερμοκρασίες, διότι το S2-YY διατηρεί τις μηχανικές του ιδιότητες και άνω των 800 C.



Σχήμα 2.13. Διάφοροι τύποι πλέξης νημάτων υαλοϋφάσματος: 1) Μονής διεύθυνσης, 2) Διπλής διεύθυνσης με απλή πλέξη 1 επάνω -1 κάτω, 3) τύπου HS1 επάνω - 4 κάτω, 4) τύπου CrowFoot 1 επάνω - 3 κάτω, 5) τύπου BMS.

Κέβλαρ

Είναι ένα αρωματικό πολυαμίδιο, (ανόργανο υλικό) με πολύ στερεούς μοριακούς δεσμούς και έχει την υψηλότερη σχέση αντοχής προς Βάρος (σ/γ) από οποιοδήποτε άλλο ύφασμα. Διατίθεται από την εταιρεία Dupont σε δύο Βασικούς τύπους. Τον τύπο Κέβλαρ 29 που έχει χαμηλή τιμή του μέτρου ελαστικότητας και τον τύπο 49 που έχει υψηλή τιμή του μέτρου ελαστικότητας.

Το Κέβλαρ είναι κατά 35% - 40% περίπου ελαφρύτερο από το υαλοϋφασμα, έχει μεγαλύτερη ειδική τάση (σ/γ) και μεγαλύτερο ειδικό μέτρο ελαστικότητας (E/γ), από οποιοδήποτε υαλοϋφασμα, έχει περίπου τον αυτό συντελεστή θερμικής διαστολής με τον γραφίτη, επομένως μπορούν να συνεργαστούν σε υβριδικές συνθέσεις, δεν μεταβάλλονται οι ιδιότητες του και τα μηχανικά του χαρακτηριστικά με την πάροδο του χρόνου και τέλος έχει κατά δέκα φορές περίπου μεγαλύτερη ειδική τάση από το αλουμίνιο.

Το Κέβλαρ εμποτίζεται όπως και το υαλοϋφασμα με εποξειδικές ρητίνες αλλά το σύνθετο υλικό που αποκτάται είναι κατά 20% περίπου ελαφρύτερο από το αντίστοιχο με υαλοϋφασμα.

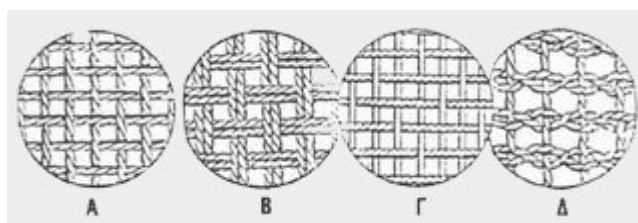
Όλες οι μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου με Κέβλαρ είναι πολύ καλές εκτός από την αντοχή του σε φορτία θλίψης όπου παρουσιάζει μικρές τιμές.

Για τέτοιου είδους φορτία γίνονται υβριδικές συνθέσεις υφασμάτων Κέβλαρ και γραφίτη, ή υαλοϋφάσματος, με τις οποίες αποκτώνται οι επιθυμητές αντοχές.

Το Κέβλαρ έχει μεγαλύτερη αντοχή στην κρούση από το υαλοϋφασμα, μεγάλη αντοχή στην κόπωση, καλή αντίσταση στην ανάπτυξη ρωγμών και καλή απόσβεση των κραδασμών.

Το Κέβλαρ χρησιμοποιείται στις αεροπορικές κατασκευές για την κατασκευή δομικών στοιχείων, για την κατασκευή ελίκων οι οποίες γίνονται ελαφρύτερες από τις αντίστοιχες του αλουμινίου και έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής στην κόπωση.

Επίσης το Κέβλαρ 49 χρησιμοποιείται στην κατασκευή πυραυλοκινητήρων με σημαντική μείωση του βάρους.



Σχήμα 2.14. Διάφοροι τύποι πλέξης υφάσματος κέβλαρ 49: α) Απλή πλέξη, β) Πλέξη μπάσκετ, γ) σατέν, δ) λινό

Ανθρακονήματα (Νήματα Γραφίτη)

Τα ανθρακονήματα καθώς και τα υφάσματα τους είναι υλικά (οργανικά) τα οποία χρησιμοποιούνται στις κατασκευές όπου απαιτείται υψηλή αντίσταση στην παραμόρφωση, δηλαδή υψηλή τιμή του ειδικού μέτρου ελαστικότητας (E/γ).

Τα ανθρακονήματα έχουν περισσότερο από το διπλάσιο ειδικό μέτρο ελαστικότητας από εκείνο του Κέβλαρ 49 και πάνω από τέσσερις φορές των υαλοϋφασμάτων.

Είναι το ακριβότερο υλικό για σύνθετα, εφ' όσον κοστίζει περίπου πέντε φορές περισσότερο από το Κέβλαρ, το οποίο με τη σειρά του κοστίζει περίπου τρεις φορές περισσότερο από το υαλοϋφασμα.

Τα σύνθετα υλικά που αποκτώνται με ανθρακονήματα παρουσιάζουν εξαιρετική αντίσταση στην παραμόρφωση, έχουν πολύ μεγάλη αντοχή στην κόπωση, αλλά είναι σχετικά εύθραυστα και δεν εμποδίζουν την ανάπτυξη ρωγμών.

Η χρησιμοποίηση των ανθρακονημάτων και των υφασμάτων τους είναι πολύ δυσκολότερη από εκείνη των άλλων υφασμάτων, απαιτεί ειδικές μεθόδους εφαρμογής, μεγάλη εμπειρία, ειδικό τρόπο σχεδίασης ώστε να αποφεύγονται περιοχές συγκέντρωσης τάσεων και γνώσεις για υβριδικές συνθέσεις εφ' όσον θα χρειαστεί να συνδυαστούν οι ιδιότητες και τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά μετά αντίστοιχα άλλων υφασμάτων.

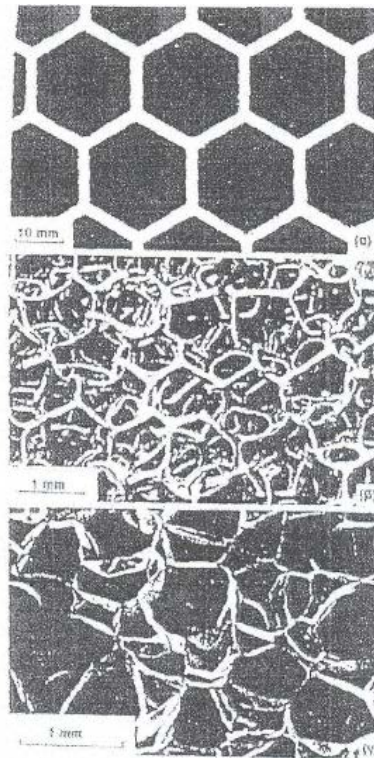
Τα ανθρακονήματα χρησιμοποιούνται στην κατασκευή ισχυρών δομικών στοιχείων, για την κατασκευή των δοκών της πτέρυγας, στα αεροδιαστημικά οχήματα, αλλά και σε πολλές άλλες Βιομηχανικές εφαρμογές.

3. ΑΦΡΩΔΗ ΥΛΙΚΑ

3.1 Εισαγωγή - ορισμός

3.1.1 Ορισμοί κυψελοειδών αφρών

Με τον όρο κυψελοειδές στερεό, εννοούμε το στερεό εκείνο, το οποίο συνίσταται από ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο από στερεές ράβδους ή πλάκες οι οποίες και μορφοποιούν τόσο τις άκρες όσο και τις επιφάνειες των κυψελών. Τρεις τυπικές δομές εμφανίζονται στις ακόλουθες εικόνες:

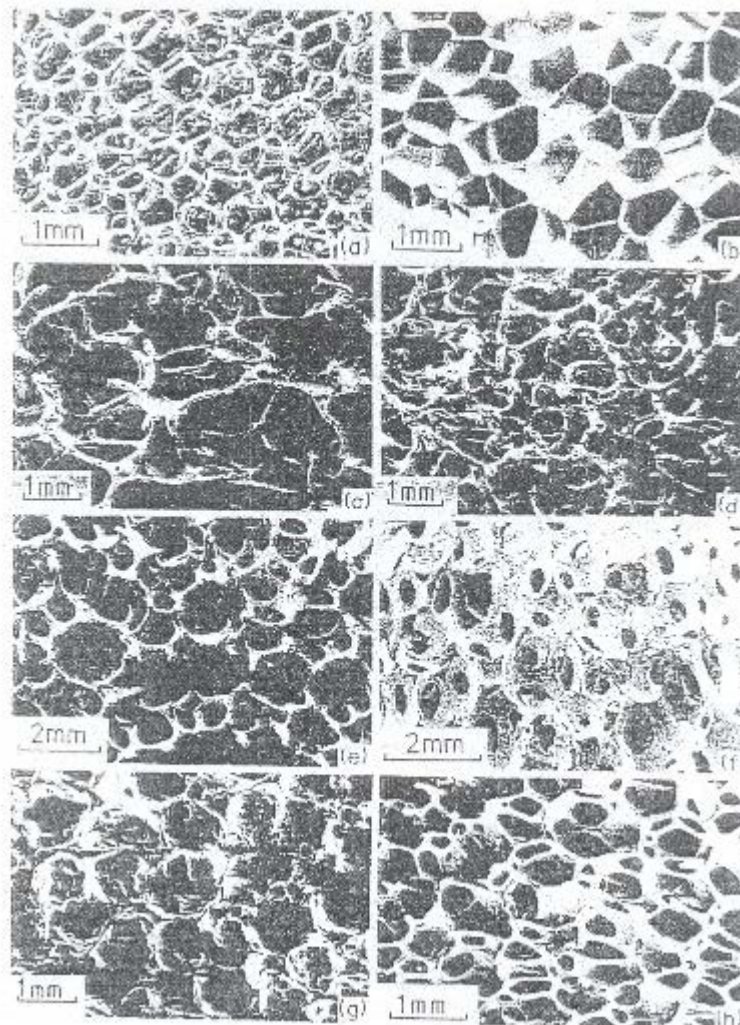


Σχήμα 3.1. Παραδείγματα κυψελοειδών υλικών. Α) Κηρήθρα δύο διαστάσεων, Β) αφρός ανοιχτών κυψελών τριών διαστάσεων και Γ) αφρός κλειστών κυψελών τριών διαστάσεων

Η απλούστερη είναι μια δισδιάστατη διάταξη από πολύγωνα, τα οποία είναι τοποθετημένα έτσι, ώστε να καλύπτουν μια επίπεδη επιφάνεια μορφής παρόμοιας με τις εξαγωνικές κυψέλες των μελισσών. Γι' αυτό το λόγο τέτοια υλικά αποκαλούνται ως κηρήθρες. Πιο απλά, οι κυψέλες είναι πολύεδρα τα οποία συγκροτούνται στο χώρο των τριών διαστάσεων μορφοποιώντας στερεά. Τέτοιου τύπου κυψελοειδή υλικά των οποίων η δομή είναι τρισδιάστατη αποκαλούνται αφροί. Εάν το στερεό από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο αφρός περιέχεται μόνο στις άκρες των κυψελών τότε ο αφρός λέμε ότι είναι ανοικτών κυψελών. Αν και οι όψεις των κυψελών είναι επίσης στερεές έτσι ώστε κάθε κυψέλη να είναι αποκλεισμένη δίχως συνδέσεις με τις διπλανές τις, λέμε ότι ο αφρός είναι κλειστών κυψελών. Υπάρχουν και κάποιοι αφροί οι οποίοι είναι εν μέρει ανοιχτοί και εν μέρη κλειστοί.

Σημαντικό χαρακτηριστικό σε ένα κυψελοειδές υλικό είναι η σχετική του πυκνότητα ρ/ρ_s , δηλαδή το πηλίκο της πυκνότητας του κυψελοειδούς υλικού ρ , προς την πυκνότητα ρ_s του υλικού από το οποίο είναι φτιαγμένα τα τοιχώματα των κυψελών. Καθώς η σχετική πυκνότητα αυξάνεται, τα τοιχώματα των κυψελών διογκώνονται ενώ οι πόροι συστέλλονται- πέρα περίπου από την τιμή 0,30 υφίσταται μετάβαση από την αμιγώς κυψελοειδή δομή σε μια άλλη δομή η οποία μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί στερεό το οποίο περιέχει απομονωμένους μεταξύ τους πόρους.

Στις παρακάτω εικόνες εμφανίζονται παραδείγματα κυψελοειδών υλικών:



Σχήμα 3.2. Α) πολυουρεθάνη, Β) πολυαιθυλένιο, Γ) νικέλιο, Δ) χαλκός, Ε) ζirkονία, Ζ) μουλίτης, Η) γυαλί, Θ) πολυεστέρας

3.2 Πολυμερή αφρώδη υλικά

Τα πολυμερή αφρώδη υλικά χαρακτηρίζονται από μικρό βάρος, άριστη αναλογία αντοχής/βάρος, τις υψηλές δυνατότητες μόνωσης και υψηλή ενεργειακή απορρόφηση, τα οποία συνιστούν διάδοση χρήσης του σε ολοένα και περισσότερες εφαρμογές.

Οι αφροί ουσιαστικά μπορούν να παρασκευαστούν από οποιοδήποτε πολυμερές σώμα. Αρκεί να προστεθεί ένα αέριο στην πολυμερή μήτρα. Επιπλέον μπορούν να κατασκευαστούν σε οποιοδήποτε βαθμό σκληρότητας. Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι παραγωγής είναι η χύτευση, σχηματοποίηση, ψεκασμός και ελασματοποίηση.

Κύριες εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται τα πολυμερή αφρώδη υλικά αποτελούν τα έπιπλα, τον κλάδο των μεταφορών, την κλινοστρωμή, το υπόστρωμα ταπήτων, τη συσκευασία, τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα, τα παιχνίδια, τα στολίσματα, αθλητικές εφαρμογές, παπούτσια και την απορρόφηση κραδασμών-ήχου.

3.3 Μέθοδοι παρασκευής κυψελοειδών στερεών

Εκτός από τα πολυμερή υλικά που μπορούν να αποκτήσουν δομή αφρού, τα μέταλλα, τα κεραμικά, τα υαλώδη αλλά ακόμα και τα σύνθετα υλικά μπορούν να παραχθούν ως αφροί σε σύνθετη δομή. Οι κυριότεροι τρόποι παρασκευής είναι οι εξής:

A. Κηρήθρες:

Ένας προφανής τρόπος κατασκευής υλικού είναι να συμπιεστεί ένα λεπτό φύλλο υλικό και να δώσει ένα ημιεξαγωνικό προφίλ. Στη συνέχεια πρέπει να κολληθούν τα ημιεξαγωνικά προφίλ, ώστε να δώσουν εξάγωνα. Επίσης κηρήθρες μπορούν να χυτευτούν σε καλούπια. Τέλος, μπορούν να παραχθούν και με διέλαση. Οι κεραμικές κηρήθρες που χρησιμοποιούνται στους καταλύτες των αυτοκινήτων παρασκευάζονται με τον τρόπο αυτό.

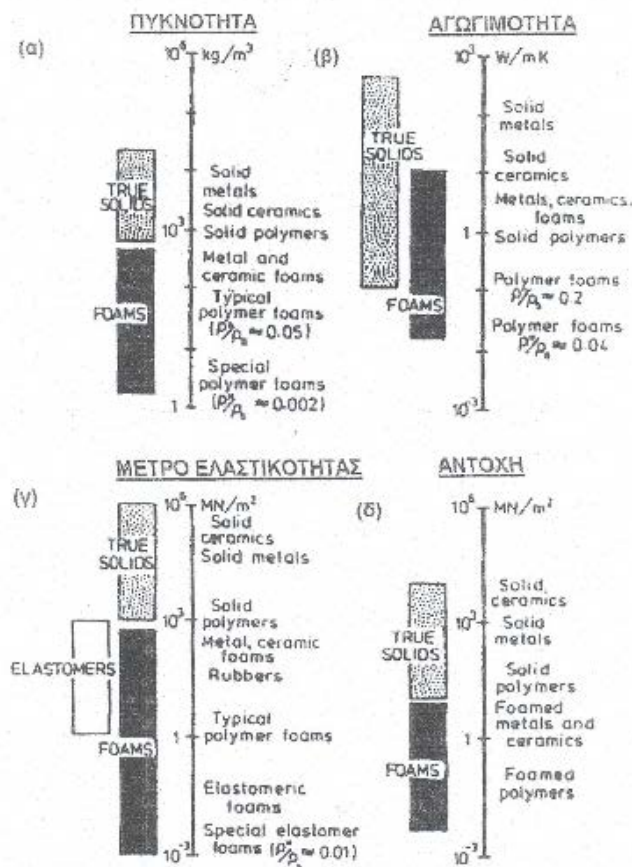
B. Αφροί

Για την μορφοποίηση σε αφρούς διαφόρων ειδών στερεών χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές. Τα πολυμερή μορφοποιούνται σε αφρούς με την εισαγωγή φυσαλίδων αερίου στο υγρό μονομερές ή στο θερμό πολυμερές, επιτρέποντας στις φυσαλίδες να διογκωθούν και στη συνέχεια να στερεοποιηθούν με ψύξη. Το αέριο εισάγεται με τη βοήθεια μηχανικού αναδευτήρα, αναμειγνύοντας κάποιο μέσο που διογκώνεται μέσα στο πολυμερές βοηθώντας έτσι στο να λάβει το αέριο μέρος του όγκου του.

Φυσικά διογκωτικά μέσα είναι τα αδρανή αέρια όπως το διοξείδιο του άνθρακα ή το άζωτο. Αυτά διαλύονται στο θερμό πολυμερές σε υψηλή πίεση και διαστέλλονται καθώς η πίεση ελαττώνεται. Εναλλακτικά, υγρά χαμηλού σημείου τήξης, όπως οι χλωροφθοράνθρακες, αναμειγνύονται με το πολυμερές και εξατμίζονται κατόπιν θέρμανσης προς τον σχηματισμό ατμωδών φυσαλίδων. Τα χημικά διογκωτικά μέσα είναι πρόσθετα, τα οποία είτε αποσυντίθενται κατά την θέρμανση, είτε ελευθερώνουν αέρια. Οποιαδήποτε από τις παραπάνω διεργασίες οδηγεί στη δημιουργία αφρών ανοικτών η κλειστών κυψελών.

3.4 Ιδιότητες και εφαρμογές των κυψελοειδών στερεών

Στο ακόλουθο σχήμα εμφανίζεται το εύρος των τεσσάρων ιδιοτήτων των αφρών: Της πυκνότητας, της ελαστικότητας, της θερμικής αγωγιμότητας και της αντοχής σε θλίψη.



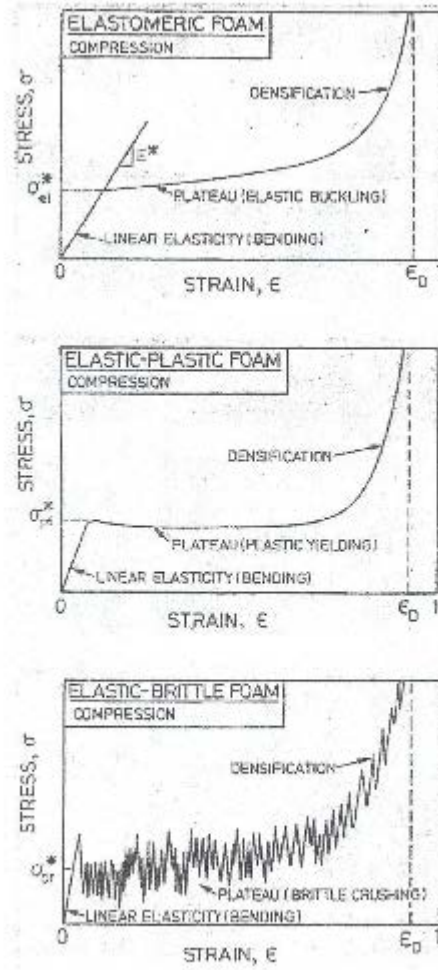
Σχήμα 3.3. Οι ιδιότητες των αφρών

- Η χαμηλή πυκνότητα επιτρέπει το σχεδιασμό άκαμπτων ελαφριών εξαρτημάτων
- Η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα επιτρέπει την κατασκευή φθηνών και αξιόπιστων θερμομονώσεων
- Η χαμηλή ακαμψία και η δυνατότητα για παραλαβή μεγάλων θλιπτικών παραμορφώσεων κάνει τους αφρούς ιδανικούς για εφαρμογές απορρόφησης ενέργειας

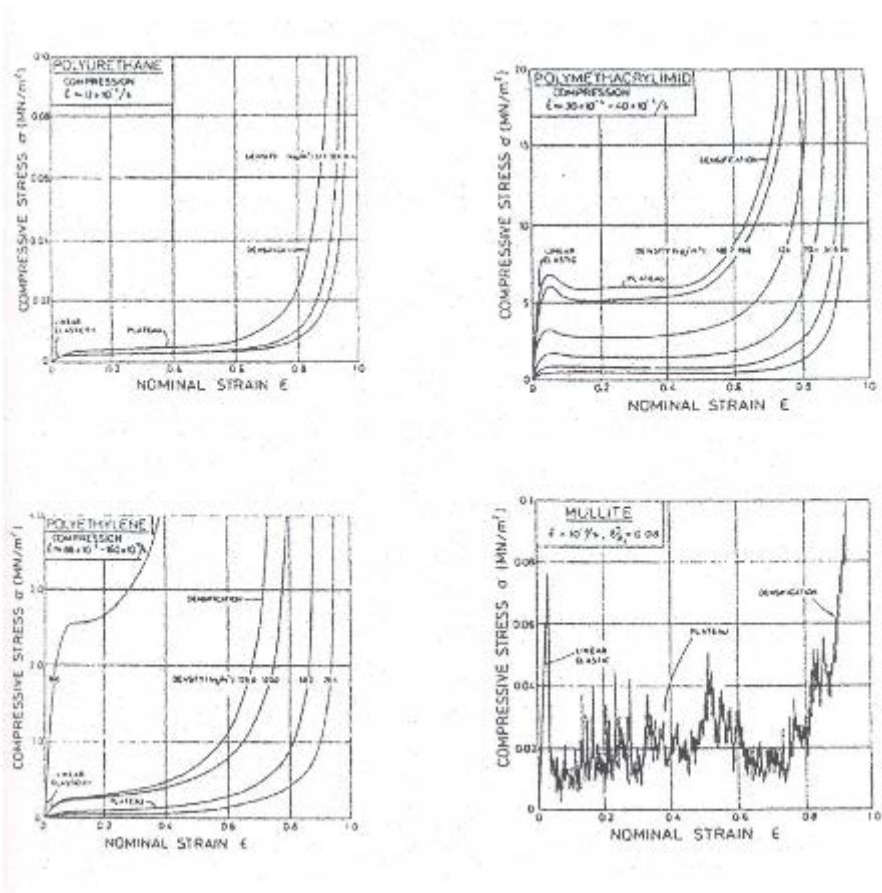
3.5 Μηχανική συμπεριφορά των αφρών

Οι μηχανικές ιδιότητες ενός αφρού σχετίζονται με τη δομή του και με το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένα τα τοιχώματα των κυψελών του. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά της δομής ενός αφρού είναι η σχετική πυκνότητα, ο βαθμός στον οποίον οι κυψέλες είναι ανοιχτές ή κλειστές και οι λόγοι ανισοτροπίας του R12 και R13 . Οι κρίσιμες ιδιότητες των τοιχωμάτων των κυψελών είναι η πυκνότητα του στερεού από το οποίο αποτελούνται, το μέτρο ελαστικότητας, το όριο διαρροής, το όριο θραύσης και οι παράμετροι ερπυσμού.

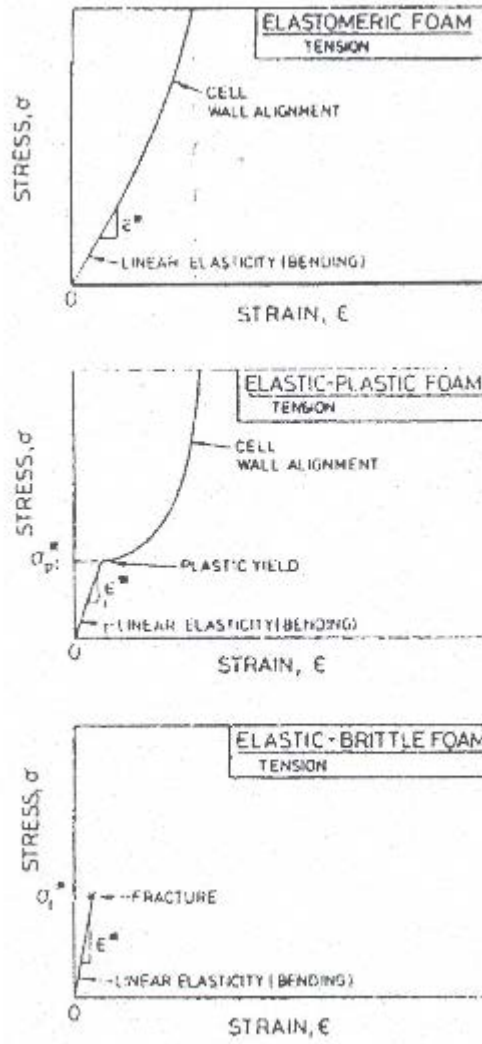
Οι ιδιότητες ενός αφρού αναλύονται με βάση αυτές τις παραμέτρους και κατόπιν συγκρίνονται και συσχετίζονται με τα πειραματικά δεδομένα προκειμένου να δώσουν τις κατάλληλες εξισώσεις. Παράγοντες όπως ο ρυθμός παραμόρφωσης, η θερμοκρασία, η ανισοτροπία και η πολυαξονική φόρτιση επηρεάζουν σημαντικά τις ιδιότητες αυτές. Γενικά, η έρευνα της πλήρους μηχανικής ανάλυσης είναι αρκετά δύσκολη, λόγω της γεωμετρικής πολυπλοκότητας.



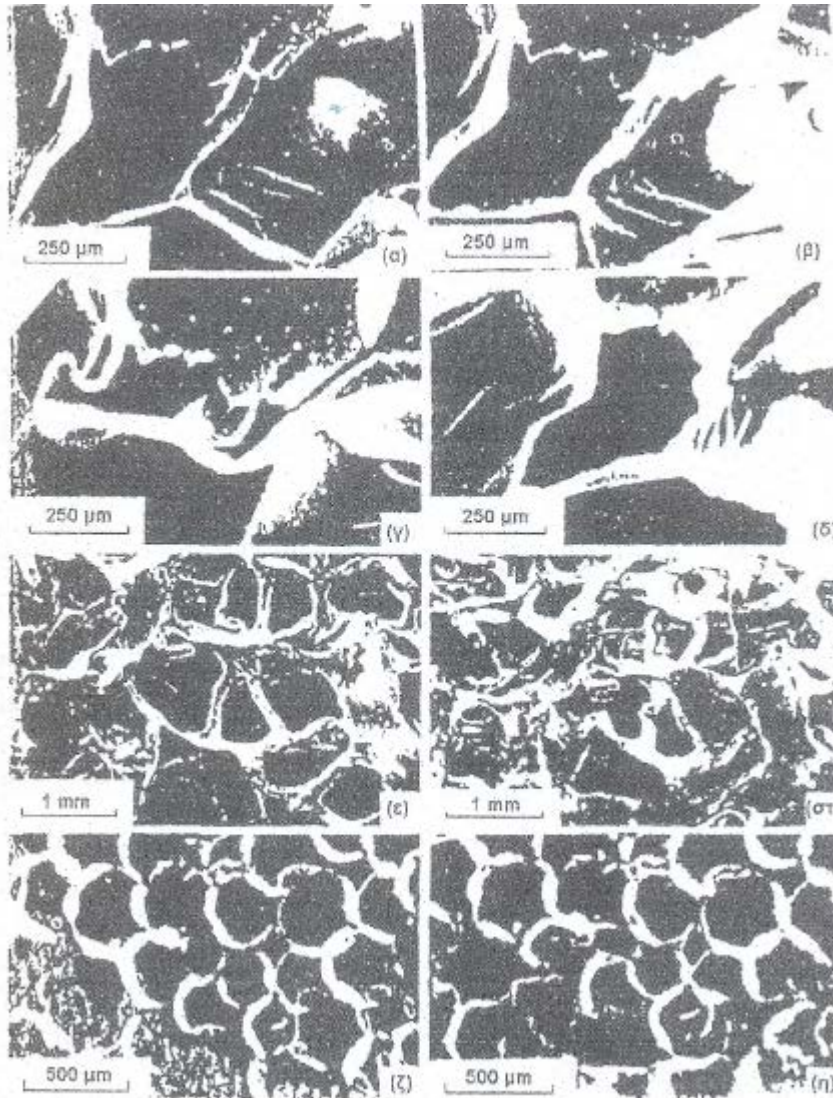
Σχήμα 3.4. Καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης θλιπτικής καταπόνησης για (α) ελαστομερή αφρό, (β) ελαστικό- πλαστικό αφρό και (γ) ψαθρό ελαστικό αφρό.



Σχήμα 3.5. Καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης θλίψης για αφρούς (α) εύκαμπτης πολουρεθάνης, (β) πολυαιθυλενίου, (γ) πολυμεθυκρυλαμιδίου (δ) μουλλάτη για διάφορες τιμές πυκνότητας



Σχήμα 3.6. Καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων δοκιμής εφελκυσμού για (α) ελαστομερή αφρό, (β) ελαστοπλαστικό αφρό και (γ) ελαστικό ψαθυρό αφρό.



Σχήμα 3.7. Μικρογραφίες στις οποίες παρατηρούμε τους τρόπους παραμόρφωσης που ανταποκρίνονται σε κάθε περιοχή συμπεριφοράς στη θλίψη του ελαστομερούς πολυαιθυλενίου. (α) αφόρτιστο, (β) φόρτιση στη περιοχή γραμμικής ελαστικότητας, (γ) φόρτιση στην περιοχή μη γραμμικής ελαστικότητας, (δ) αποκατάσταση ελαστικής παραμόρφωσης στην αποφόρτιση

3.6 Σύνθετα στρωματοειδή (σάντουιτς)

Οι δομές sandwich είναι μια ειδική κατηγορία σύνθετων υλικών που κατασκευάζονται με την ένωση δύο λεπτών αλλά δύσκαμπτων πλακών με έναν ελαφρύ αλλά παχύ πυρήνα. Ο πυρήνας συνήθως αποτελείται από ένα σχετικά αδύναμο υλικό, όμως το μεγάλο πάχος του εξασφαλίζει στο σύνθετο ακαμψία και συγκριτικά χαμηλή πυκνότητα.

Η επιλογή του κατάλληλου υλικού για τον πυρήνα ενός sandwich κελύφους αποτελεί ύψιστης σημασίας παράγοντα στην επίτευξη της απαιτούμενης συμπεριφοράς του κελύφους. Στόχος του πυρήνα σε ένα sandwich κελύφος σύνθετου υλικού είναι η αύξηση της δυσκαμψίας του μέσω της αύξησης του πάχους του με ένα υλικό πυρήνα μικρής πυκνότητας μάζας. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να επιτευχθεί πολύ μεγαλύτερη δυσκαμψία με ιδιαίτερα μικρό πρόσθετο βάρος στο κελύφος, επιτρέποντας μια περισσότερο οικονομική και αποτελεσματική κατασκευή δομικών στοιχείων.

Γενικά οι πυρήνες βασίζονται σε τέσσερις κατηγορίες:

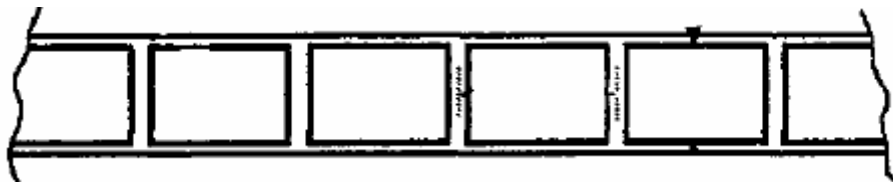
1. Αφρός ή στερεός πυρήνας (foam core sandwich)



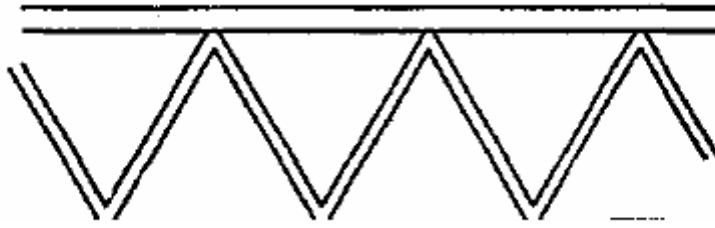
2. Κυψελωτός πυρήνας (honeycomb core)



3. Πυρήνας ιστού (web core sandwich)

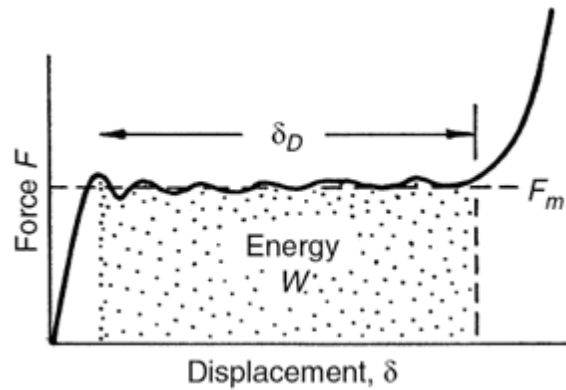


4. Ζαρωμένος πυρήνας (truss core sandwich)



Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται μια τυπική καμπύλη θλιπτικής τάσης - παραμόρφωσης ενός πολυμερούς αφρού, όπου φαίνονται τρεις διακριτές φάσεις παραμόρφωσης:

Στην αρχή φαίνεται μία γραμμικά ελαστική περιοχή στις μικρές παραμορφώσεις, έπειτα μια παρατεταμένη περιοχή παραμόρφωσης μετά τη διαρροή του υλικού και τέλος μια περιοχή απότομης αύξησης της τάσης. Η πρώτη φάση αντιστοιχεί στην ομοιόμορφη παραμόρφωση των κυψελίδων του υλικού σε όλη την έκτασή του και σχετίζεται με την κάμψη και στρέβλωση των τοιχωμάτων και των ακμών των κυψελίδων. Συνήθως, αυτή η φάση ανακτήσιμης παραμόρφωσης συνιστά ένα πολύ μικρό ποσοστό πριν την εμφάνιση διαρροής και ουσιαστικά ορίζει το μέτρο ελαστικότητας. Το πλατό μετά τη διαρροή αποτελεί το κυρίαρχο χαρακτηριστικό της κατάρρευσης των κυψελωδών υλικών και αντιστοιχεί σε μόνιμη παραμόρφωση λόγω πλαστικού λυγισμού, διαρροής και ρήξης των τοιχωμάτων και των ακμών των κυψελίδων, καθώς η παραμόρφωση λαμβάνει χώρα σε σχετικά σταθερά επίπεδα φορτίου. Στην τελική φάση, οι κυψελίδες παραμορφώνονται τόσο έντονα που τα κενά εντός τους εξαλείφονται ολοκληρωτικά. Περαιτέρω φόρτιση οδηγεί σε υψηλή συμπίεση του υλικού των τοιχωμάτων των κυψελίδων, προκαλώντας συμπεριφορά που τείνει σε εκείνη του ομογενούς συμπαγούς υλικού, οπότε δημιουργείται η απότομη αύξηση του φορτίου. Η φάση αυτή καλείται συμπύκνωση.



Σχήμα 3.8. Καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για υλικό απορρόφησης ενέργειας

Ο πυρήνας μιας sandwich δομής πρέπει να ικανοποιεί κάποιες σημαντικές προϋποθέσεις με επιτακτική ανάγκη την κατάλληλη ποιότητα σύνδεσής του με τα εξωτερικά ελάσματα, που μπορούν να συνεισφέρουν δραστικά σε μια βελτιωμένη μηχανική απόκριση σε περίπτωση πρόσκρουσης. Συγκεκριμένα:

- Πρέπει να είναι δύσκαμπτος (stiff) σε διεύθυνση κάθετη στα περιβλήματα, ώστε να αποτρέπει εκτεταμένη στρέβλωση των τοιχωμάτων του κελύφους στα αλώβητα τμήματά του.
- Πρέπει να παρουσιάζει αυξημένη αντοχή σε διάτμηση προκειμένου να αποφεύγεται σχετική ολίσθηση των περιβλημάτων όταν το sandwich κέλυφος υπόκειται σε καμπτική καταπόνηση.
- Πρέπει να έχει την απαιτούμενη δυσκαμψία προκειμένου να εξασφαλίζει επιπεδότητα στα περιβλήματα, προλαμβάνοντας τη δημιουργία πτυχώσεων στις ανέπαφες περιοχές τους, κατά τη διάρκεια ολόκληρης της διαδικασίας κατάρρευσης.

Κυριότερα πλεονεκτήματα των δομών sandwich:

- Υψηλή ακαμψία που συνδυάζεται με τον υψηλότερο λόγο αντοχής/βάρους
- Ομαλότερη εξωτερική επιφάνεια
- Υψηλότερη σταθερότητα

- Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής
- Υψηλότερη αντοχή σε κόπωση και μικρότερη τάση παρουσίασης ρωγμών σε σχέση με τις απλές πλάκες
- Υψηλή θερμική και ακουστική μόνωση
- Υψηλή διαξονική δυνατότητα συμπίεσης
- Μείωση ενεργειακής κατανάλωσης λόγω κυρίως του χαμηλότερου βάρους τους

Όμως στην χρήση των υλικών αυτών παρουσιάζονται αρκετά εμπόδια όπως:

- Το κόστος τους είναι ακόμα αρκετά υψηλό και για αυτό ακόμα χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές περίπλοκες και εξειδικευμένες π.χ. αεροπλάνα
- Η κατασκευή τους απαιτεί μια σειρά από απαιτητικές και ακριβές κατεργασίες
- Χρειάζεται εκ νέου εκπαίδευση για το προσωπικό ώστε να εξοικειωθεί με την χρήση τέτοιων υλικών

3.6.1 Κελύφη sandwich

Κελύφη τα οποία είναι εσωτερικά πληρωμένα με ενισχυτικά υλικά, ονομάζονται κελύφη sandwich.

Οι πλέον σημαντικοί μηχανισμοί απορρόφησης ενέργειας των κατασκευών αυτών κατά την παραμόρφωσή τους είναι η τοπική σύνθλιψη/θραύση και η διατμητική παραμόρφωση/ρηγμάτωση του υλικού του (ενισχυμένου) πυρήνα, η κάμψη και έκταση των ελασμάτινων περιβλημάτων), καθώς και η θραύση ινών, η αποσύνδεση ινών-μήτρας και η διαστρωματική αποκόλληση σε αυτά, ενώ ενέργεια απορροφάται αποτελεσματικά μέσω και της τοπικής σύνθλιψης του δομικού στοιχείου και της παραμόρφωσής του ως σύνολου. Η διάταξη των σύνθετων περιβλημάτων και η πυκνότητα του πυρήνα φαίνεται ότι χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά των sandwich κατασκευών κατά την κατάρρευσή τους έναντι πρόσκρουσης. Παρατηρούμε ότι, προκειμένου να κατασκευαστούν sandwich υβριδικά δομικά στοιχεία με αποτελεσματική συμπεριφορά έναντι πρόσκρουσης, είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθούν συστατικά υλικά με μεγάλη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας, εξετάζοντας τις ιδιότητες των επιμέρους στοιχείων (εξωτερικά ελάσματα, πυρήνας, ενίσχυση πυρήνα) που τα αποτελούν.

3.7 Μέθοδοι μορφοποίησης σύνθετων υλικών

Η μορφοποίηση ινωδών συνθέτων υλικών περιλαμβάνει συνήθως τα ακόλουθα τρία στάδια:

- Παραγωγή των ινών.
- Διάταξη-διευθέτηση των ινών σε ιστό, πλέγμα ή πακέτα, όπου οι μεμονωμένες ίνες ομαδοποιούνται κατάλληλα ανά 100-100.000.
- Εισαγωγή των ινών στη μήτρα: με βάση το υλικό της μήτρας, οι μέθοδοι μορφοποίησης ινωδών συνθέτων υλικών μπορούν να καταταγούν στις εξής κατηγορίες

1. Μορφοποίηση συνθέτου οργανικής μήτρας

1α) Ασυνεχής μορφοποίηση συνθέτου

- Χειροποίητη στρώση (hand lay-up)
- Χύτευση θαλάμου πίεσης (pressure bag)
- Χύτευση σε διαιρετό καλούπι (matched die-moulding)

1β) Συνεχής μορφοποίηση συνθέτου

- Περιέλιξη νήματος (filament winding)
- Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος (sheet moulding process, SMC)
- Μορφοποίηση με εμβάπτιση (pultrusion)

2. Μορφοποίηση συνθέτου μεταλλικής μήτρας

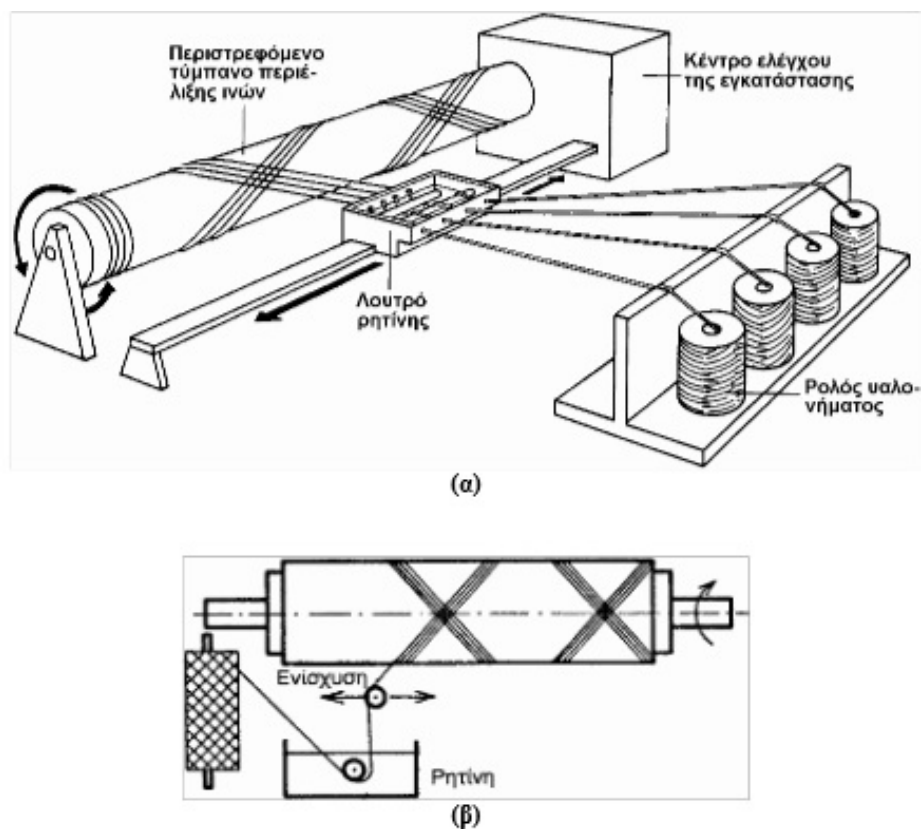
- Συνδιέλαση (co-extrusion)
- Μορφοποίηση με χύτευση (casting process)
- Συμπίεση σε στερεή κατάσταση
- Απόθεση υλικού μήτρας

3. Μορφοποίηση συνθέτου κεραμικής μήτρας

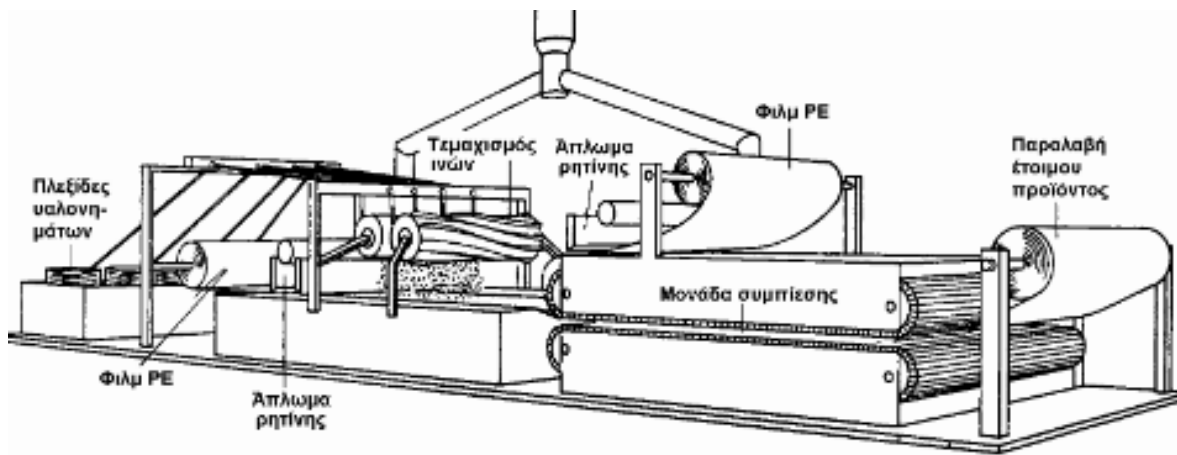


Σχήμα 3.9.

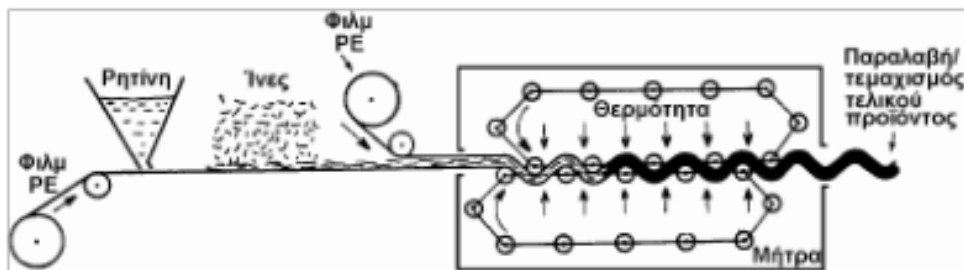
- Οι ίνες διατίθενται στην αγορά σε δεσμίδες τυλιγμένες γύρω από έναν κυλινδρικό οδηγό. Μπορεί να είναι ευθυγραμμισμένες ή πεπλεγμένες.
- Οι ασυνεχείς ίνες συνδυάζονται με το υλικό της μήτρας είτε σε τυχαία διάταξη, είτε όσο το δυνατόν προσανατολισμένες.
- Οι συνεχείς ίνες είτε ευθυγραμμίζονται σε μία διεύθυνση σε μορφή ταινίας είτε διατάσσονται σε πλεγμένα στρώματα (υαλούφασμα).



Σχήμα 3.10. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται κυρίως στην παραγωγή κοίλων κυλίνδρων υψηλών προδιαγραφών

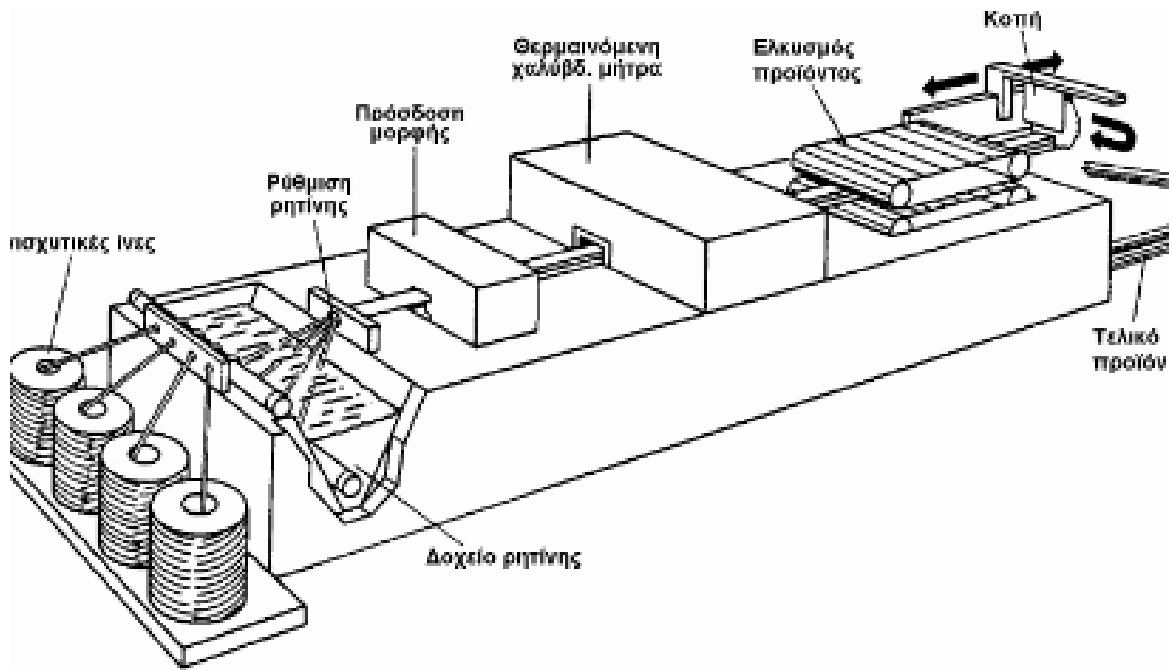


(α)

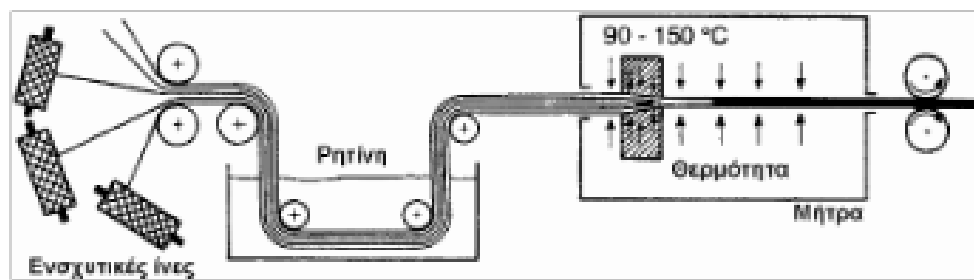


(β)

Σχήμα 3.11. Νέα τεχνική με ευρεία εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία

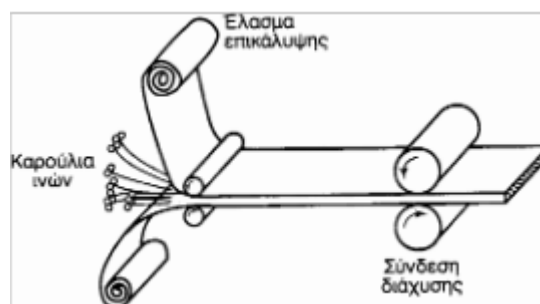


(α)



(β)

Σχήμα 3.12. Η παρούσα τεχνική εφαρμόζεται όπου απαιτείται σταθερή διατομή προϊόντος (σωλήνες, αγωγοί, δοκοί)



Σχήμα 3.13. Συνεχείς ίνες, υπό μορφή ταινιών, τοποθετούνται μεταξύ μεταλλικών ελασμάτων και το σύστημα συμπιέζεται κατάλληλα και προκύπτει σάντουιτς υλικό

4. Μηχανισμοί αστοχίας σύνθετων υλικών

4.1 Μορφές αστοχίας

Ο καθορισμός της αστοχίας μιας κατασκευής μπορεί να χαρακτηριστεί από μία πολύ μικρή παραμόρφωση είτε από συνολική θραύση/αποκόλληση των δομικών μερών της. Άρα για να μπορούμε να πούμε ότι έχει λάβει χώρα η αστοχία ενός δομικού στοιχείου θα πρέπει αυτό να αδυνατεί να ανταποκριθεί λειτουργικά με επιτυχία.

Τα σύνθετα υλικά αρχίζουν να αστοχούν από μέσα προς τα έξω πριν εκδηλωθεί οποιαδήποτε μακροσκοπική μεταβολή στην συμπεριφορά τους. Οι πιο βασικές μορφές αστοχίας των σύνθετων υλικών παρουσιάζονται παρακάτω:

- 1) Θραύση/σπάσιμο ινών
- 2) Παραμόρφωση και θραύση της μήτρας
- 3) Αποχωρισμός των ινών από την μήτρα είτε λόγω εμφάνισης και διάδοσης ρωγμών στην διεπιφάνεια ίνας μήτρας είτε λόγω θραύσης των ινών και εκρίζωση τους από την μήτρα
- 4) Διαχωρισμός μιας στρώσης από την άλλη σε ένα πολύστρωτο σύνθετο υλικό που καλείται διαστρωματική αποκόλληση

4.2 Επίδραση των μηχανισμών αστοχίας στην απορροφούμενη ενέργεια

Θραύση ινών

Όταν μία ρωγμή διαδίδεται σε κάθετη διεύθυνση προς τις ίνες, προκαλείται βαθμιαία θραύση των ινών έως ότου διαχωριστούν πλήρως μεταξύ τους, κατά την έννοια του πάχους του σύνθετου. Οι ίνες θραύονται όταν η παραμόρφωση τους αγγίζει την τιμή παραμόρφωσης θραύσης τους. Ενώ οι ίνες συμμετέχουν κατά κύριο λόγο στην υψηλή αντοχή των σύνθετων υλικών, η απαιτούμενη ενέργεια για την θραύση των ινών, αντιστοιχεί σε ένα πολύ μικρό ποσοστό της συνολικής απορροφούμενης ενέργειας που σχετίζεται με την υπέρβαση των μηχανισμών αστοχίας του υλικού.

Παραμόρφωση και θραύση της ίνας

Το υλικό της μήτρας που περιβάλλει τις ίνες πρέπει να θραυστεί για να ολοκληρωθεί η θραύση του σύνθετου υλικού. Οι πολυεστερικές και εποξειδικές ρητίνες ανήκουν στα ψαθυρά υλικά και επιδέχονται περιορισμένη συνολική παραμόρφωση μέχρι την αστοχία τους ενώ αντίθετα οι μεταλλικές μήτρες μπορούν να υποστούν εκτεταμένη πλαστική παραμόρφωση. Ο μηχανισμός απορρόφησης ενέργειας στην περίπτωση μητρών από πολυμερές υλικό χαρακτηρίζεται από θραύση και μικρή παραμόρφωση της μήτρας και παρατηρείται μικρή συνεισφορά στη συνολική απορροφούμενη ενέργεια σε σύγκριση με αυτή των σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας.

Αποκόλληση ινών από μήτρα

Με την εμφάνιση και διάδοση των ρωγμών παράλληλα προς τις ίνες, οι ίνες μπορούν να αποκολληθούν από το υλικό της μήτρας. Σε αυτήν την διαδικασία οι χημικοί δεσμοί μεταξύ ινών και μήτρας σπάνε. Μία τέτοια ρωγμή μπορεί να διαδίδεται στην διεπιφάνεια ίνας-μήτρας ή μέσα στη μήτρα ανάλογα με την σχετική τους αντοχή. Με μείωση της αντοχής της διεπιφάνειας μπορεί να συμβεί εκτεταμένη αποκόλληση καταλήγοντας σε μία αξιοσημείωτη αύξηση της απορροφούμενης ενέργειας

Αποκάλυψη-εκρίζωση ινών από μήτρα

Λαμβάνει χώρα όταν ψαθυρές ή ασυνεχείς ίνες εμποτίζονται σε δύσκαμπτη μήτρα. Οι ίνες θραύονται κατά τις αδύνατες τους διατομές, οι οποίες δεν είναι απαραίτητο να συμπίπτουν με το επίπεδο θραύσης του σύνθετου υλικού. Λόγω της θραύσης των ινών εμφανίζεται μία συγκέντρωση τάσεων στη μήτρα η οποία τελικά ανακουφίζεται από την διαρροή του υλικού της μήτρας με αποτέλεσμα την αποφυγή ρυγμάτωσης της. Με αυτόν τον τρόπο περιορίζεται και η θραύση των ινών σε εκείνο το σημείο μόνο.

Η διαφορά σε σχέση με την αποκόλληση των ινών έγκειται στο εξής: Στην πρώτη περίπτωση η αποκόλληση δημιουργείται όταν μια ρωγμή που διαδίδεται στην μήτρα εμποδίζεται να διαδοθεί εγκάρσια προς την ίνα, ενώ στην δεύτερη περίπτωση η αποκόλληση υφίσταται όταν μία ρωγμή που ξεκινάει από τη θραύση της ίνας αδυνατεί να διαδοθεί μέσω μιας δύσκαμπτης μήτρας. Επιπρόσθετα στην δεύτερη περίπτωση το φαινόμενο συνοδεύεται από εκτεταμένη παραμόρφωση της μήτρας κάτι που δεν εμφανίζεται στην πρώτη.

Διαστρωματική αποκόλληση

Η διαφορετική διεύθυνση των ενισχυτικών ινών των στρώσεων μπορεί να συμβάλει στην ανάπτυξη διαστρωματικής αποκόλλησης μεταξύ δύο διαδοχικών στρώσεων λόγω της ανομοιογένειας/ασυνέχειας της δυσκαμψίας στη διεπιφάνειά τους. Το μέγεθος των ζωνών διαστρωματικής αποκόλλησης επηρεάζεται άμεσα από το μέγεθος της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης, ενώ, όταν αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια παράλληλα στο επίπεδο των στρώσεων, οδηγούν συνήθως σε υψηλή απορρόφηση ενέργειας.

Μέθοδοι κατάρρευσης σύνθετων υλικών

Η ικανότητα προστασίας σε περίπτωση σύγκρουσης (crashworthiness) είναι ένα σχετικά νέο αντικείμενο μελέτης επομένως η αντοχή στην σύγκρουση ενός δομικού συστατικού υπό αξονική συμπίεση και κάμψη επιδέχεται ακόμα αρκετή έρευνα και δοκιμή.

Ο κύριος μηχανισμός που εμφανίζεται στην κατάρρευση λεπτότοιχων κατασκευών από σύνθετα υλικά είναι αυτός της θραύσης και του θρυμματισμού του υλικού. Γενικά οι μορφές κατάρρευσης εξαρτώνται σε μέγιστο βαθμό από την γεωμετρία της κατασκευής και τα χαρακτηριστικά του υλικού. Συγκεκριμένα μεγαλύτερη επίδραση παρουσιάζουν η διεύθυνση που είναι διατεταγμένες οι ίνες σε κάθε στρώση του σύνθετου ελάσματος καθώς και οι ιδιότητες των ινών και της ρητίνης.

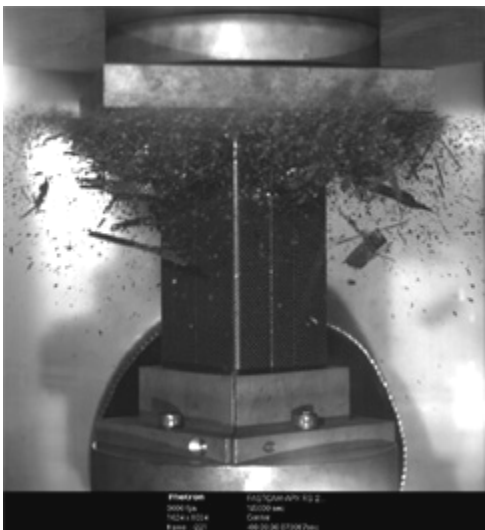
Σε προηγούμενες έρευνες επιβεβαιώνεται η θεωρία ότι δηλαδή τα σύνθετα κελύφη παραμορφώνονται με τρόπο διαφορετικό από παρόμοιες δομές κατασκευασμένες από συμβατικά υλικά. Η πλαστική παραμόρφωση εδώ δεν αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό της κατάρρευσης αλλά κυριαρχεί η ανάπτυξη μικρορωγμών. Σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρήθηκε ότι τα σύνθετα κελύφη που καταρρέουν με σταθερό τρόπο, προοδευτικό και ελεγχόμενο μπορούν να απορροφήσουν ένα μεγάλο ποσό ενέργειας.

Μπορούμε να ταξινομήσουμε τις μορφές κατάρρευσης αρχικά σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Η πρώτη κατηγορία εμφανίζει σταθερή και προοδευτική κατάρρευση η οποία συνεχίζεται σε συνδυασμό με έναν μηχανισμό αστοχίας του υλικού που εξελίσσεται ελεγχόμενα.
- Η δεύτερη κατηγορία χαρακτηρίζεται από ασταθή και ανεξέλεγκτη εκτεταμένη ψαθυρή θραύση του υλικού σε διάφορα σημεία της κατασκευής

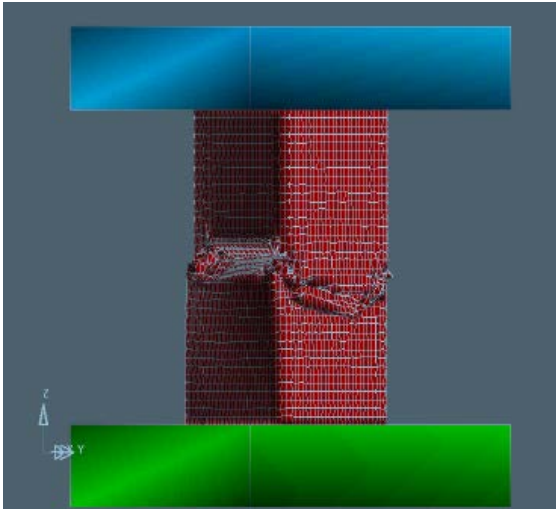
Από την πειραματική εργασία και έρευνα που έχει προηγηθεί σε κελύφη λεπτού πάχους διαφόρων γεωμετριών και τα οποία είναι κατασκευασμένα από σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες γυαλιού και διαποτισμένα με ρητίνη και πολυμερές, καταλήγουμε στους παρακάτω κύριους τρόπους αστοχίας κατά την διάρκεια συμπίεσης τους.

Προοδευτική συντριβή με μικρορωγμές του σύνθετου υλικού που συνδέεται με μεγάλα ποσά ενέργειας σύνθλιψης (τρόπος I):



Σχήμα 4.1.

Ψαθυρό σπάσιμο της δομής με συνέπεια την καταστροφική αστοχία με χαμηλή ενεργειακή απορρόφηση (τρόπος II και III):



Σχήμα 4.2.

Προοδευτικό δίπλωμα (folding) παρόμοιο με την συμπεριφορά συντριβής λεπτότοιχου μεταλλικού και πλαστικού σωλήνα που παρουσιάζει μέτρια ικανότητα απορρόφησης ενέργειας (τρόπος IV):



Σχήμα 4.3.

Πιο συγκεκριμένα:

A. Τρόπος κατάρρευσης I

Κύριο χαρακτηριστικό του η σταθερή και σταδιακή κατάρρευση του δοκιμίου καθώς και ο συνεχής θρυμματισμός του υλικού στη ζώνη παραμόρφωσης. Ο τρόπος αυτός αναλύεται στις παρακάτω τρεις διαφορετικές μορφές.

- i. Η πρώτη μορφή κατάρρευσης Ια, η οποία λόγω ομοιότητας αναφέρεται και σαν μορφή αστοχίας μανιτάρι, χαρακτηρίζεται κυρίως από την σταδιακή κατάρρευση του κελύφους μέσω του σχηματισμού συνεχών μετώπων τα οποία εκτείνονται εσωτερικά και εξωτερικά και με την ταυτόχρονη ανάπτυξη ενός αριθμού αξονικών διαρηγματώσεων στο εξωτερικό μέτωπο.
- ii. Η δεύτερη μορφή κατάρρευσης Ιβ χαρακτηρίζεται από την προοδευτική στροφή του διαρρέοντος θρυμματιζόμενου υλικού προς τα μέσα. Η στροφή αυτή του παραμορφωθέντος υλικού προς τα μέσα εξελίσσεται σε όλη την περιφέρεια και καθ' όλο το πάχος του τοιχώματος. Δεν εμφανίζονται αξονικές διαρηγματώσεις
- iii. Η Τρίτη μορφή κατάρρευσης Ιγ χαρακτηρίζεται από την ολική στροφή του παραμορφωθέντος υλικού προς τα έξω. Οι αξονικές διαρηγματώσεις αποτελούν βασικό χαρακτηριστικό της μορφής αυτής. Η ζώνη παραμόρφωσης εκτείνεται στη βάση του κελύφους

B. Τρόπος κατάρρευσης II

Ο τρόπος κατάρρευσης II χαρακτηρίζεται κυρίως από εκτεταμένη ψαθυρή θραύση που οδηγεί σε καταστροφική αστοχία του κελύφους. Στην περίπτωση των κωνικών κελυφών ο τρόπος αυτός χαρακτηρίζεται από την ανάπτυξη μιας ελικοειδούς ή μιας διαμήκουσ ρωγμής διαδιδόμενης στην περιφέρεια του κελύφους, ενώ στην περίπτωση των τετραγωνικών πυραμίδων κύριο γνώρισμα του τρόπου αυτού είναι η εμφάνιση διαμήκων ρωγμών στις τέσσερις γωνίες της βάσης του κελύφους.

C. Τρόπος κατάρρευσης III

Σε αυτήν την περίπτωση έχουμε καταστροφική αστοχία του υλικού με την εμφάνιση περιφερειακής θραύσης περίπου στο μέσο ύψος του κελύφους η οποία προκαλεί τον διαχωρισμό του σε ακανόνιστα σχήματα. Αυτός ο τρόπος αστοχίας έχει ορισμένα χαρακτηριστικά όμοια με τον λυγισμό κατά Euler πολύ λεπτών μεταλλικών και PVC σωλήνων.

D. Τρόπος κατάρρευσης IV

Σχεδόν με την έναρξη της φόρτισης παρατηρούμε την εμφάνιση γραμμών πτυχώσεως (θραύσεως) ομοίων με αυτές που εμφανίζονται στους μεταλλικούς και PVC σωλήνες. Πρόκειται για καθαρά καταστροφικής μορφής κατάρρευση των κελυφών.

Ένα αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό της κατάρρευσης αποτελεί η δημιουργία μιας δακτυλοειδούς σφήνας κωνικής διατομής από κονιοποιημένο υλικό, η οποία πιέζει αξονικά προς τα κάτω προκαλώντας τη δημιουργία και διάδοση μιας κεντρικής ρωγμής στο μέσο του τοιχώματος του σωλήνα.

Αρκεί τώρα να προσδιορίσουμε που και πως διαχέεται η προσφερόμενη εξωτερική ενέργεια κατά την κατάρρευση του κελύφους εντοπίζοντας τους μηχανισμούς στους οποίους κατανέμεται η συνολική απορροφούμενη ενέργεια. Παρακάτω αναλύουμε αυτούς τους μηχανισμούς:

1. Διάδοση της κύριας εσωτερικής ρωγμής κατά την αξονική διεύθυνση στο μέσο του τοιχώματος του κελύφους. Οι διαστάσεις της ρωγμής εξαρτώνται από τις ιδιότητες του υλικού, τον αριθμό των στρώσεων καθώς και από τις συνθήκες φόρτισης
2. Τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ της σφήνας και των ήδη δημιουργηθέντων ισοπαχών μετώπων κατά την αξονική μετατόπιση της σφήνας. Κατά τη διάρκεια της κατάρρευσης, προκαλείται περαιτέρω διάρρηξη του τοιχώματος λόγω διάδοσης της κύριας κεντρικής ρωγμής η οποία προκαλείται από την εισχώρηση της σφήνας μεταξύ των δύο μετώπων.

3. Εκτεταμένη διαστρωματική αποκόλληση στα μέτωπα που αποκτούν μικρή ακτίνα καμπυλότητας κατά την είσοδο της σφήνας.
4. Καμπτική αστοχία στα όρια της διαστρωματικής αποκόλλησης με τη μορφή πολλαπλών ακτινικών ρωγμών στις διπλώσεις που παρουσιάζονται στα μέτωπα.
5. Τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ των γειτονικών στρώσεων του υλικού κατά την δημιουργία της καμπυλότητας των μετώπων.
6. Τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ των μετώπων και της πλάκας κατά την ακτινική διάδοση τους, καθώς και μεταξύ της σφήνας και πλάκας κατά την μετατόπιση της σφήνας σε αυτήν. Στην περίπτωση φυσικά των κυλινδρικών κελυφών, η σφήνα δεν μετακινείται ως προς την πλάκα μετά την ολοκλήρωση του σχηματισμού της.
7. Αξονική διαρηγμάτωση των μετώπων. Ο αριθμός των αξονικών διαρηγματώσεων εξαρτάται από τη γεωμετρία του κελύφους. Για παράδειγμα, στην περίπτωση των κυλινδρικών κελυφών εξαρτάται από τη διάμετρο του δοκιμίου ενώ στην περίπτωση των κελυφών τετραγωνικής διατομής το πρόβλημα είναι πιο απλό αφού οι αξονικές διαρηγματώσεις εμφανίζονται μόνο στις θέσεις των ακμών.
8. Πολλαπλές διαμήκειες ρωγμές μέσα στις διπλώσεις των μετώπων καθώς αυτά τείνουν να γίνουν επίπεδα κατά την καταπόνηση.

Σε ότι αφορά τον μηχανισμό κατάρρευσης κελυφών όπως κόλουροι κώνοι εντοπίζονται ορισμένες διαφορές στο μέγεθος, την μορφή και την θέση της σφήνας και της κύριας εσωτερικής ρωγμής. Πιο συγκεκριμένα:

1. Η σφήνα μετατοπίζεται από το κέντρο προς το εξωτερικό μέρος του τοιχώματος. Αυτό γίνεται πιο εμφανές όσο μεγαλώνει η ημιγωνία κορυφής. Έτσι η δέσμη στρώσεων που αποτελεί το εσωτερικό μέτωπο έχει μεγαλύτερο πάχος από ότι η αντίστοιχη εξωτερική με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος του παραμορφωθέντος υλικού να ρέει προς το εσωτερικό του κελύφους. Αξίζει να τονιστεί ότι υπάρχει ένα κρίσιμο εύρος ημιγωνιών κορυφής (15 έως 20 μοίρες) όπου τελικώς όλη η ζώνη παραμόρφωσης ρέει προς τα μέσα με αποτέλεσμα το κέλυφος να αστοχεί πλέον ακολουθώντας τον τρόπο κατάρρευσης Ιβ. Επιπλέον η μετακίνηση της σφήνας προς τα έξω συνοδεύεται με την μετακίνηση της κύριας εσωτερικής ρωγμής η οποία διαδίδεται παράλληλα προς το τοίχωμα του κελύφους. Το μέγεθος της ρωγμής αυτής μειώνεται με την αύξηση της ημιγωνίας κορυφής. Όσο δηλαδή μετακινείται προς το εξωτερικό μέρος του τοιχώματος το μήκος της μειώνεται μέχρι τον ολοκληρωτικό εκφυλισμό της.

2. Η γεωμετρία της σφήνας δεν παραμένει αναλλοίωτη όπως στην περίπτωση των σωλήνων, αλλά μεταβάλλεται όσο αυξάνει η ημιγωνία κορυφής. Ακόμα είναι προφανές ότι όσο αυξάνει η μετατόπιση η μάζα της σφήνας αυξάνει ενώ ταυτόχρονα έχουμε και ανάπτυξη τριβής μεταξύ σφήνας και της πλάκας του εμβόλου λόγω ολίσθησης της σφήνας προς τα έξω.

5. Πειραματικό μέρος

5.1 Αξονική καταπόνηση κελυφών

Η αξιολόγηση της συμπεριφοράς των συστημάτων απορρόφησης ενέργειας έχει πρωταρχική σημασία. Ο κύριος μηχανισμός απορρόφησης ενέργειας είναι η εφαρμογή ενός φορτίου για μια δεδομένη μετατόπιση. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η μετατόπιση για δεδομένη απορροφούμενη ενέργεια τόσο μικρότερο είναι το μέσο φορτίο. Ο σχεδιαστικός στόχος είναι η μέγιστη δυνατή διάχυση ενέργειας κατά τρόπο μη αντιστρεπτό. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η βέλτιστη συμπεριφορά που αναμένεται από κάποιο υλικό είναι αυτή του απόλυτα πλαστικού υλικού, όπου το διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης προσδιορίζεται από ία τετραγωνική επιφάνεια.

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής είναι η αριθμητική προσομοίωση της αξονικής καταπόνησης των σύνθετων κελυφών τα οποία έχουν πληρωθεί εσωτερικά με αφρό. Τα συγκεκριμένα δοκίμια υποβλήθηκαν σε αξονική καταπόνηση κατά την διάρκεια της εκπόνησης διπλωματικής εργασίας του Μηχανολόγου μηχανικού Γκαγκαδέλη Ερωτόκριτου και χρησιμοποιούμε τα αποτελέσματα, δηλαδή τα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης που πρόεκυψαν για σύγκριση με αυτά που προκύπτουν από την αριθμητική προσομοίωση των ίδιων κελυφών μέσω του προγράμματος LS-DYNA.

5.1.1 Χαρακτηρισμός υλικού

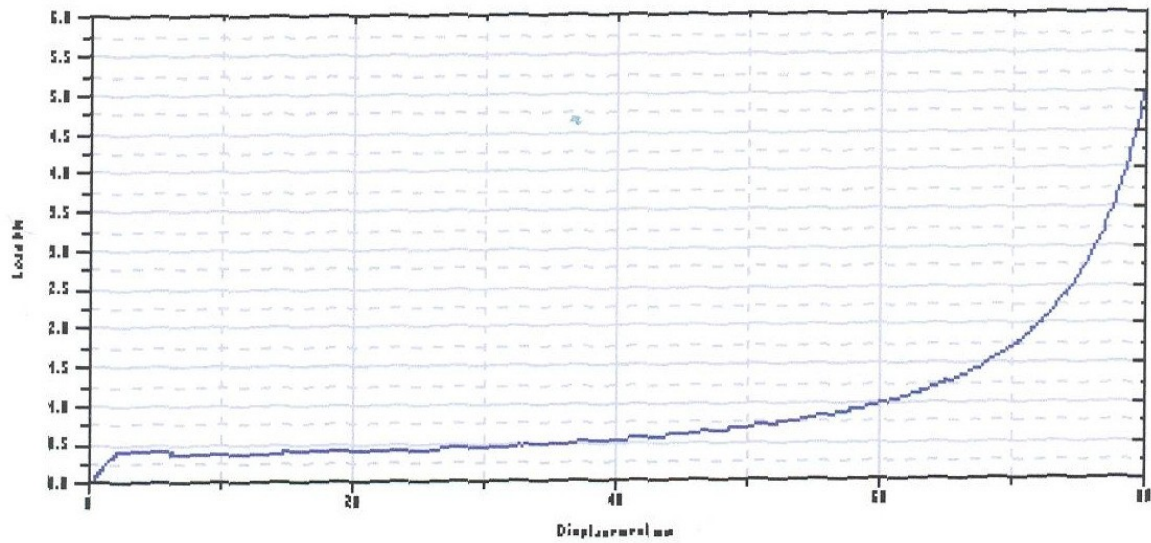
Για τις δοκιμές σχεδιάσαμε στο LS-DYNA τέσσερα διαφορετικά κελύφη.

Τα κελύφη ήταν κυκλικής διατομής και αποτελούταν από σύνθετο υλικό ως μήτρα. Πιο συγκεκριμένα, το σύνθετο υλικό αποτελείτο από υαλοϋφασμα με ίνες τυχαίας διεύθυνσεως (chopped strand glass mat) εμποτισμένο με πολυεστερική ρητίνη. Το μέσο μήκος των ινών ήταν 54 mm, η διάμετρος τους 9 μm και το ειδικό βάρος του υαλοϋφασματος 65 Nt mm^{-2} . Η ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένα μίγμα φθαλικού ανυδρίτη και μαλεϊκού ανυδρίτη εστεροποιημένου με προπυλενογλυκόλη. Για τον πολυμερισμό της ρητίνης χρειάστηκε καταλύτης περίπου 1.5-3% του βάρους της ρητίνης. Η αναλογία ρητίνης υαλοϋφασματος ήταν περίπου 100 ml ρητίνη για 1000 cm^2 υαλοϋφασμα. Το σύνθετο υλικό που προέκυψε είχε κατά βάρος σύσταση 72% ίνες και πυκνότητα 1.37 gr cm^{-3} . Το μέτρο ελαστικότητας αυτού είναι $E=10000 \text{ MPa}$, η αντοχή του σε εφελκυσμό είναι $\sigma=180 \text{ MPa}$.

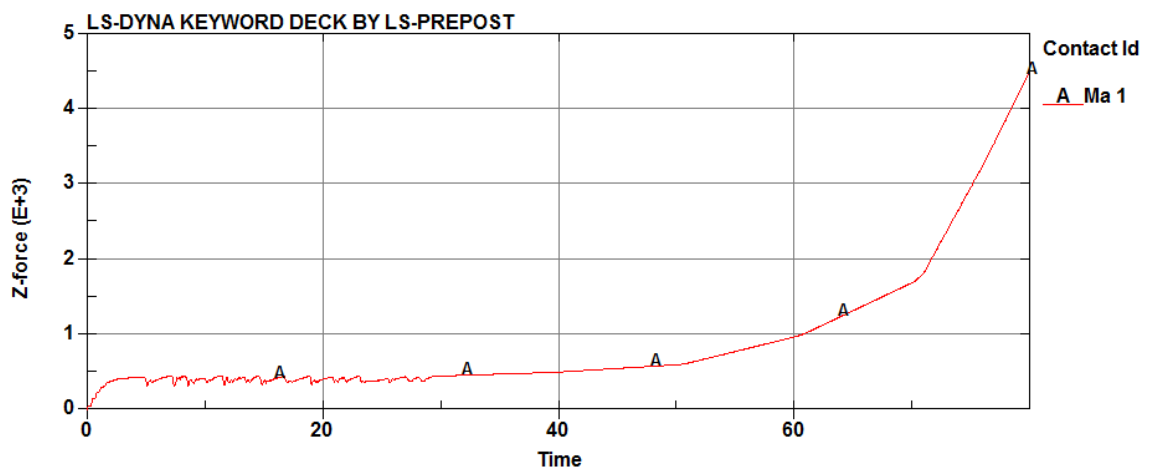
Η επιλογή του συγκεκριμένου υαλοϋφασματος έγινε με το σκεπτικό ότι η τυχαία διεύθυνση των ινών θα μπορούσε να στηρίζει την υπόθεση ότι μακροσκοπικά, στο επίπεδο του υαλοϋφασματος, το υλικό που χρησιμοποιείται είναι σχεδόν ισότροπο.

Ο αφρός που χρησιμοποιήσαμε για την ενίσχυση των κελυφών ήταν από πλάκα εξηλασμένης πολυστερίνης με την εμπορική ονομασία STYROFOAM της εταιρίας DOW. Η πυκνότητα του ήταν 35 kg/m^3 .

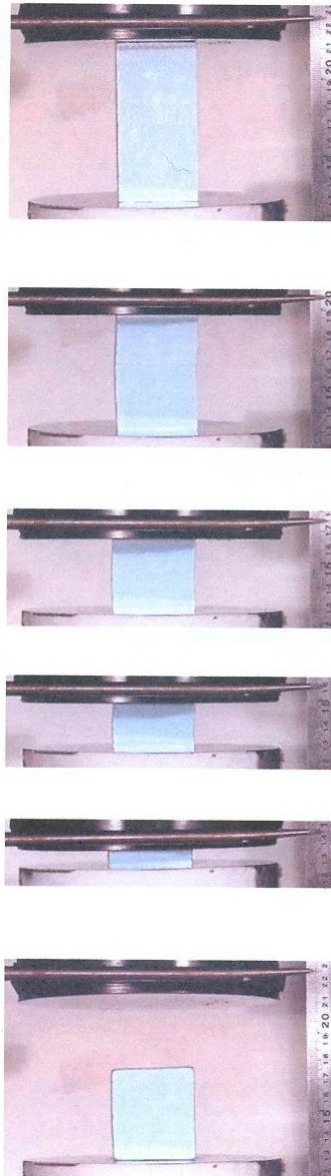
Παρακάτω παρουσιάζεται το γράφημα φορτίου – μετατόπισης και διαδοχικές εικόνες από την δοκιμή θλίψης για τον αφρό με διαστάσεις διατομής 51.2mm X 46.2mm και ύψος 90mm.



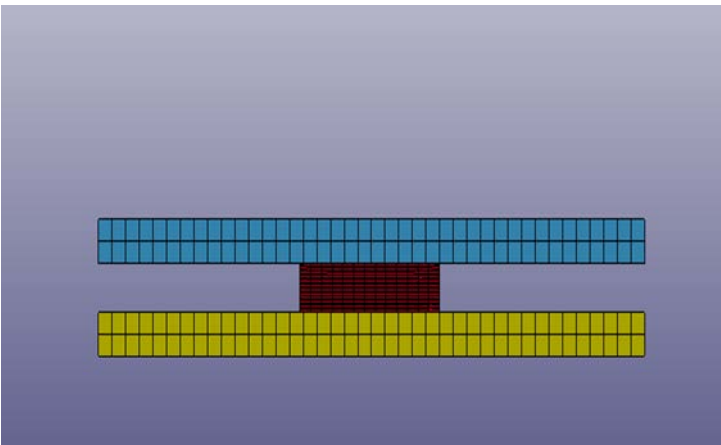
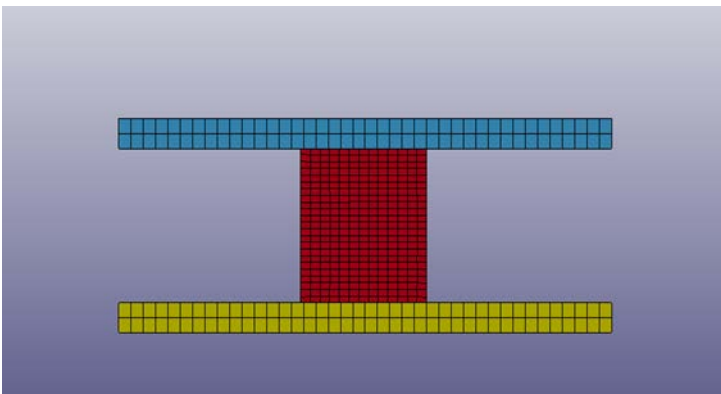
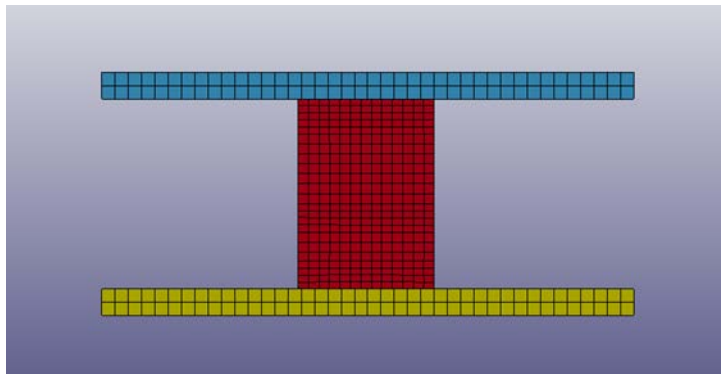
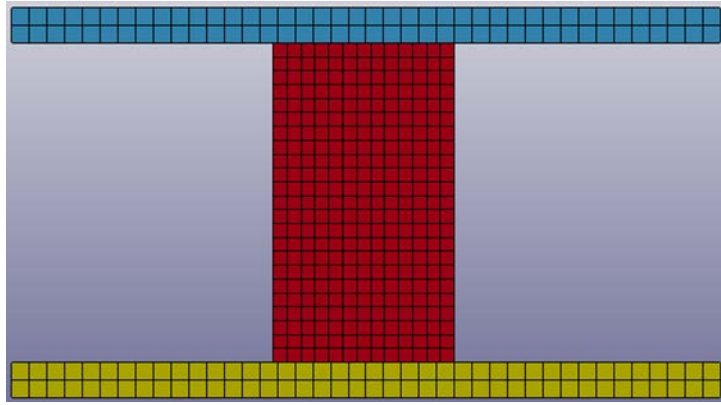
Σχήμα 5.1. Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης για αφρό τύπου DOW



Σχήμα 5.2. Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης για αφρό τύπου DOW από την δοκιμή θλίψης μέσω του LS-DYNA



Σχήμα 5.3. Εικόνες από τη συμπίεση του αφρού DOW



Σχήμα 5.4. Δοκιμή θλίψης του αφρού DOW στο LS-DYNA

5.1.2 Χαρακτηριστικά κελυφών

➤ 1^ο Κέλυφος:

Το κέλυφος αυτό έχει 3 στρώσεις υαλονημάτων, πάχος 2.7mm, ύψος 138mm, διάμετρο πάνω κύκλου 31.3mm και κάτω κύκλου 104.8mm με ημιγωνία κώνου 15°. Το κέλυφος ενισχύεται αφρό τύπου DOW.

➤ 2^ο Κέλυφος:

Το συγκεκριμένο κέλυφος έχει 2 στρώσεις υαλοϋφάσματος, έχει ύψος 141.6mm, πάνω διάμετρο 31.2mm και κάτω διάμετρο 80.5mm, πάχος υλικού 2.2mm. Η ημιγωνία του κώνου στην περίπτωση αυτή είναι 10°. Το κέλυφος περιέχει αφρό τύπου DOW.

➤ 3^ο Κέλυφος:

Σε αυτήν την περίπτωση έχουμε 2 στρώσεις υαλοϋφάσματος. Το ύψος του είναι 151mm, η διάμετρος του πάνω κύκλου 29.8mm, η διάμετρος του κάτω κύκλου είναι 111.2mm και το πάχος του σύνθετου υλικού 2mm. Το κέλυφος περιέχει αφρό τύπου DOW.

➤ 4^ο Κέλυφος:

Το τελευταίο δοκίμιο έχει 3 στρώσεις υαλοϋφάσματος και το πάχος του μετρήθηκε στα 2.8mm. Το ύψος του είναι 142mm, η διάμετρος του πάνω κύκλου είναι 36.7mm, ενώ του κάτω κύκλου είναι 86.3mm και η σχηματιζόμενη ημιγωνία κώνου είναι 10°. Το δοκίμιο είναι ενισχυμένο με αφρό τύπου DOW.

5.2 Διαδικασία μοντελοποίησης δοκιμίων

Οι απαραίτητες διαδικασίες για την ανάπτυξη ενός πλήρους μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, δηλαδή η εισαγωγή της γεωμετρίας, η γένεση πλέγματος, η επιβολή στηρίξεων και φόρτισης αποτελούν αυτό που συνοπτικά ονομάζεται μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων (FINITE ELEMENT MODELING), η οποία συνήθως εκτελείται με τη βοήθεια κατάλληλου επεξεργαστή.

Ο προεπεξεργαστής ξεκινάει από τη γεωμετρία του αντικειμένου ή του πεδίου ορισμού του προβλήματος. Το επόμενο στάδιο είναι η δημιουργία πλέγματος και κατανομής κόμβων. Όταν σε κάθε πλέγμα αποδίδονται κόμβοι, τότε αυτό μετατρέπεται σε πεπερασμένο στοιχείο. Η γένεση πλέγματος είναι το πλέον σημαντικό και δύσκολο στάδιο της μοντελοποίησης πεπερασμένων στοιχείων. Για τη διευκόλυνση αυτού του σταδίου όλα τα συστήματα προσφέρουν δυνατότητες αυτόματης γένεσης πλέγματος. Η τυπική προσέγγιση είναι να προσφέρουν αυτόματο πλέγμα τετραεδρικών στοιχείων για στερεή γεωμετρία και τετραπλευρικά ή τριγωνικά στοιχεία για επιφάνεια στον τρισδιάστατο χώρο. Πληθώρα συστημάτων προσφέρουν την δυνατότητα αλλαγής κάποιας παραμέτρου πλέγματος όπως η πυκνότητα του πλέγματος. Επιπλέον γίνεται δυνατή και η διασύνδεση πλέγματος με τη γεωμετρία ώστε με κάθε παρέμβαση του χρήστη στη γεωμετρία να πραγματοποιείται και άμεση αλλαγή στο πλέγμα.

Θα ήταν σκόπιμο, στις περιοχές όπου περιμένουμε απότομη μεταβολή στη συμπεριφορά των προς επίλυση αγνώστων, να διακριτοποιούνται από στοιχεία μεγαλύτερης πυκνότητας πλέγματος.

Όταν τελειώσει και η διαδικασία της πλεγματοποίησης, πρέπει να προσδιοριστεί και ο τύπος της ανάλυσης (π.χ., στατική ή δυναμική) και έπειτα οι οριακές συνθήκες.

Σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο χρειάζεται να αποδοθούν συγκεκριμένες ιδιότητες υλικού όπως το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος του Poisson. Το πάχος στοιχείων κελύφους και πλακών αποτελεί μια ιδιότητα υλικού παρά γεωμετρική ιδιότητα. Μία ακόμα δυνατότητα που μας βοηθάει στην μοντελοποίηση σύνθετων υλικών είναι ότι σε διαφορετικές περιοχές στοιχείων αποδίδονται διαφορετικές ιδιότητες υλικών.

Ακόμα, είναι απαραίτητο να ορίσουμε τις διεπιφάνειες μεταξύ των σωμάτων που πρόκειται να έρθουν σε επαφή κατά την πραγματοποίηση της προσομοίωσης, ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα εισχώρησης ενός τμήματος του μοντέλου εντός ενός άλλου.

Τέλος, καθορίζουμε τα εξωτερικά φορτία και τις αρχικές συνθήκες.

Από τη στιγμή που ορισθεί το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων επιλέγοντας όλες τις παραμέτρους του πλέγματος, το μοντέλο εισάγεται στον κώδικα που εκτελεί την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Μετά την αριθμητική επίλυση, τα αποτελέσματα είναι έτοιμα προς επεξεργασία στον μεταεπεξεργαστή (postprocessor). Όταν βρισκόμαστε σε περίπτωση δυναμικής ανάλυσης όλα τα πακέτα διαθέτουν εικονική προσημείωση (animation).

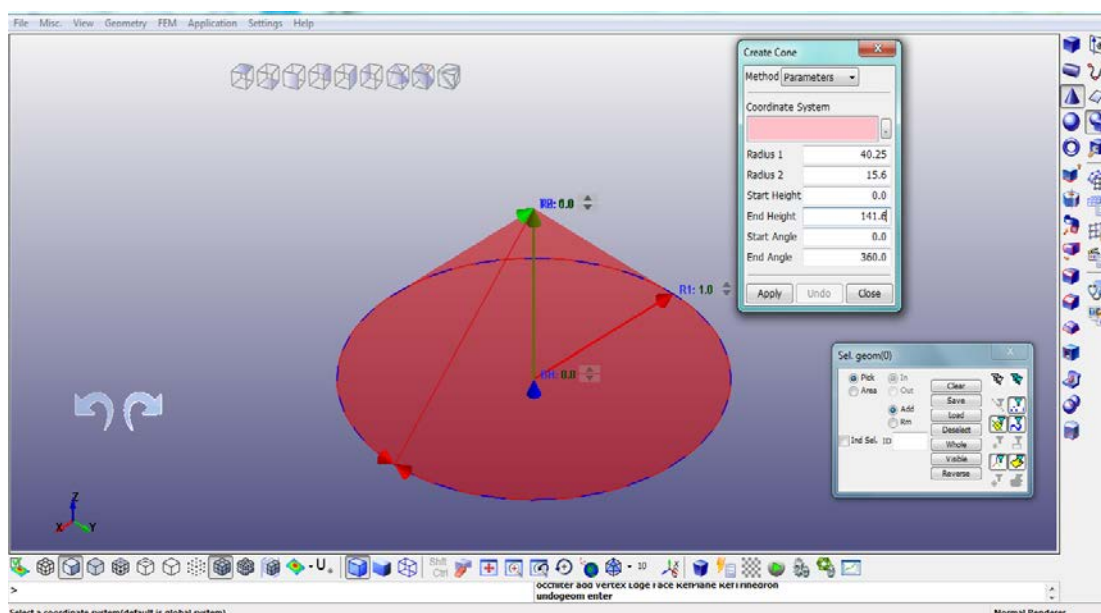
Για την προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα LS-DYNA3D το οποίο διαθέτει το εργαστήριο του τομέα τεχνολογίας των κατεργασιών. Πρόκειται για ένα υλικό που χρησιμοποιεί EXPLICIT κώδικα και ειδικεύεται στην ανάλυση μη γραμμικών δυναμικών τρισδιάστατων προβλημάτων. Η εταιρεία κατασκευής είναι η LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION.

5.3 Σχεδιασμός δοκιμίων με τον προεπεξεργαστή LS-PREPOST

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως η διαδικασία ξεκινά με τον σχεδιασμό της γεωμετρίας του μοντέλου μας και έπειτα με την διακριτοποίηση αυτού.

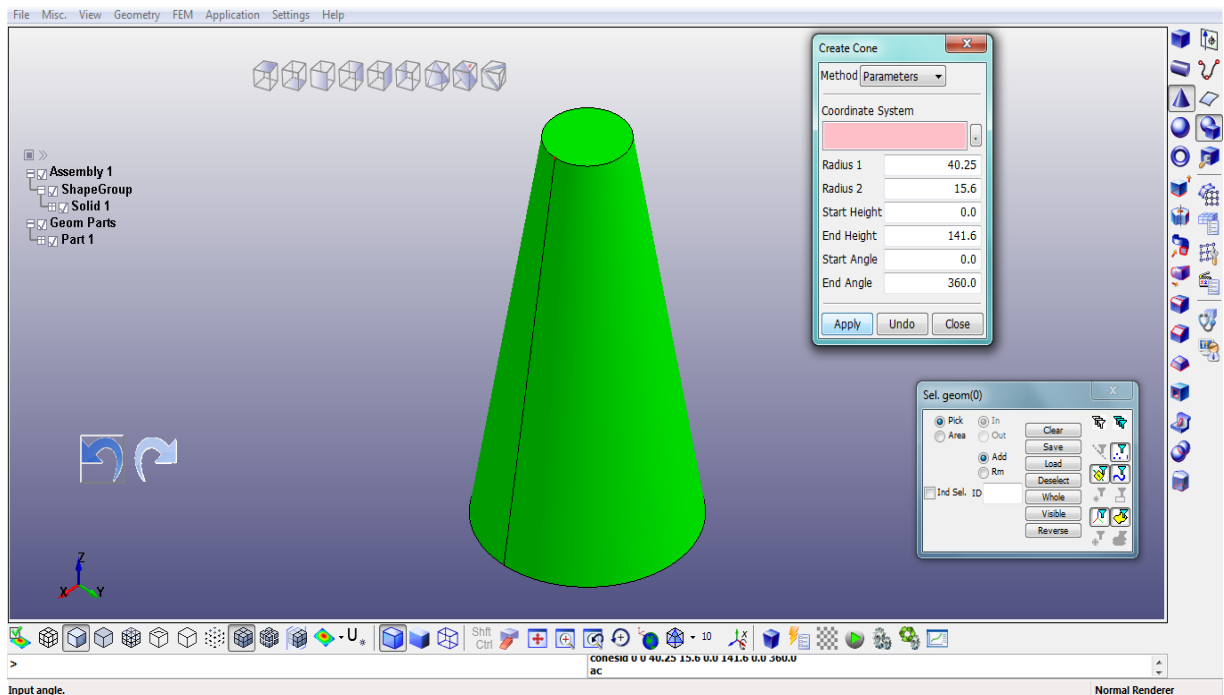
Βρισκόμαστε στο περιβάλλον του LS-PREPOST και είμαστε σε θέση να ξεκινήσουμε τον σχεδιασμό της γεωμετρίας του κελύφους.

Από την κύρια καρτέλα επιλέγουμε: SOLID→CONE



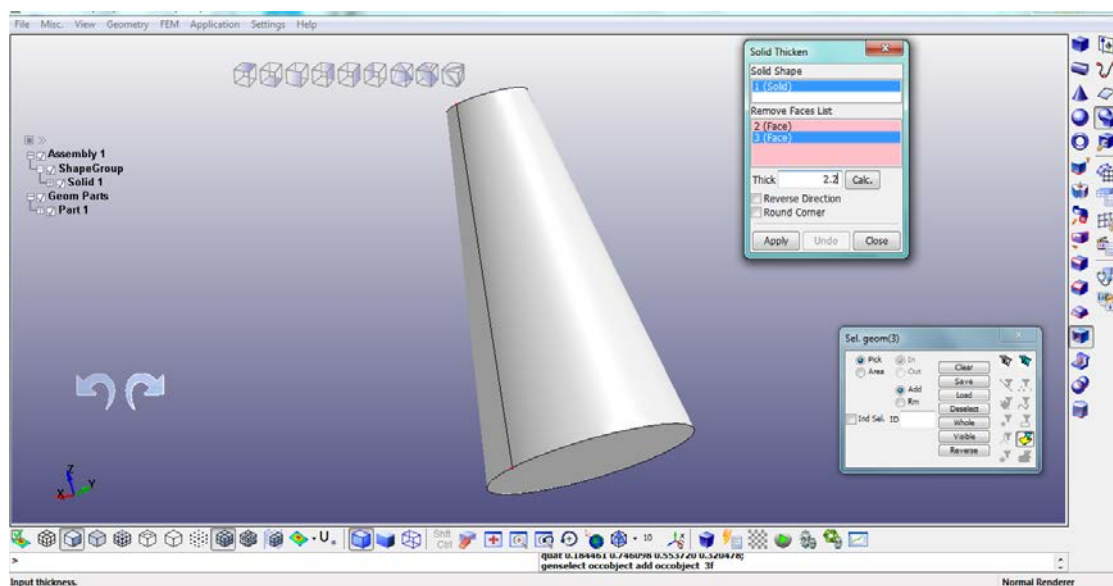
Σχήμα 5.1.

Πληκτρολογούμε τις διαστάσεις του κελύφους το οποίο θέλουμε να σχεδιάσουμε, άνω ακτίνα, κάτω ακτίνα και ύψος.



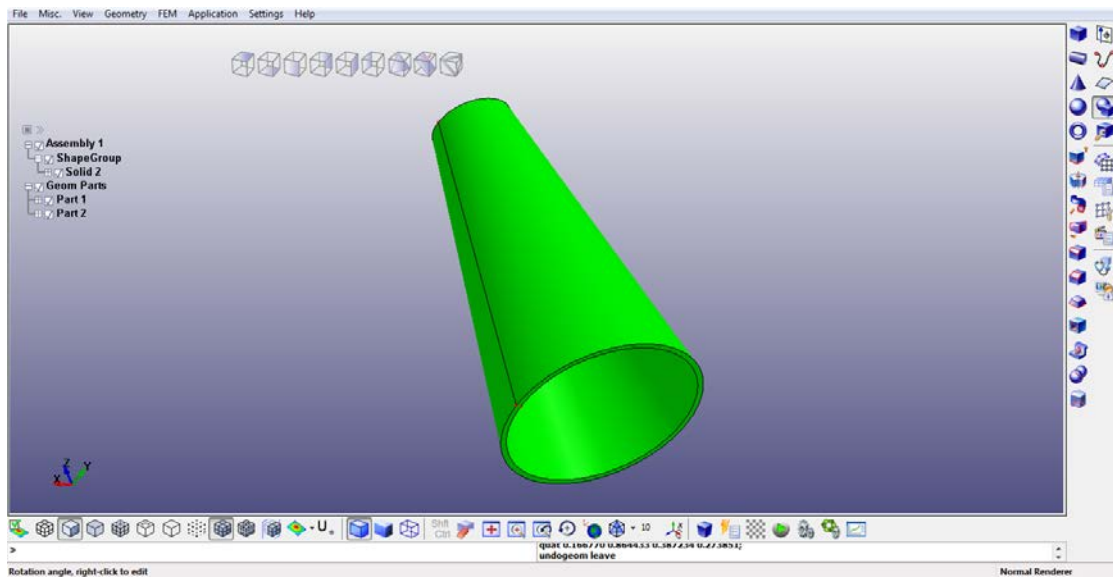
Σχήμα 5.2.

Για να δημιουργήσουμε ένα κέλυφος λεπτού πάχους αρκεί να επιλέξουμε την εντολή THICKEN και έπειτα επιλέγουμε ολόκληρο το δοκίμιο και τις επιφάνειες από τις οποίες θέλουμε να αφαιρέσουμε υλικό.



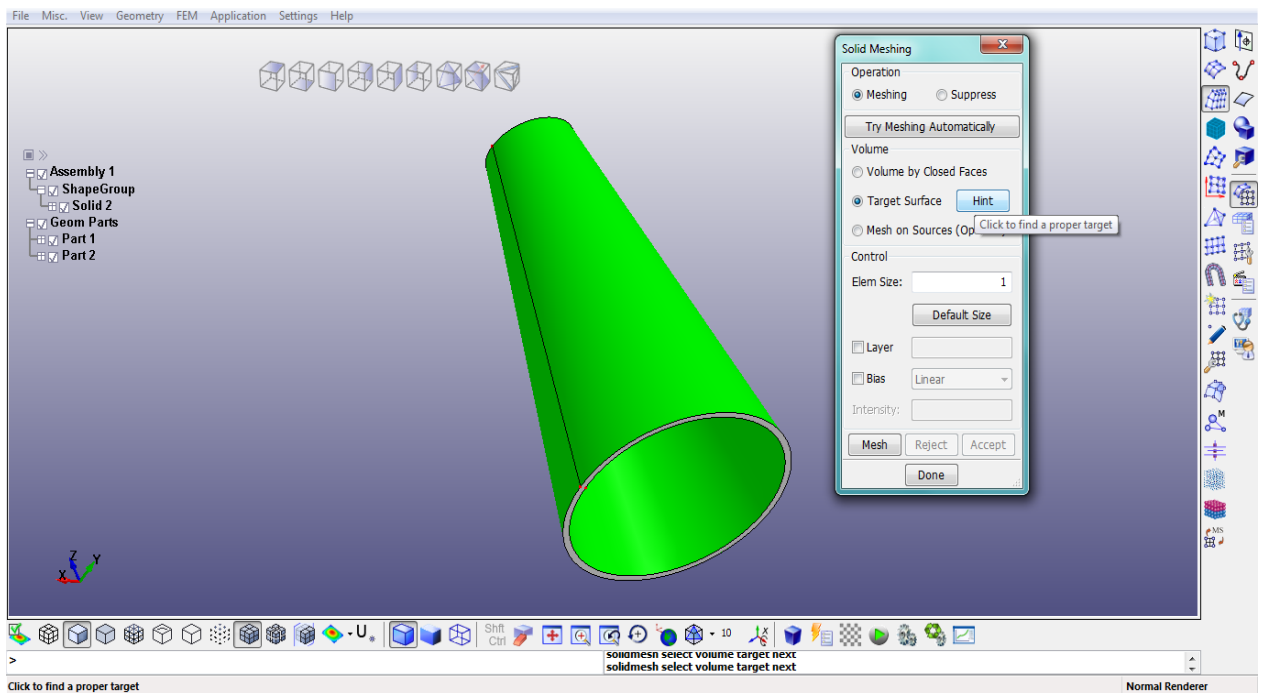
Σχήμα 5.3.

Υπολογίζουμε το επιθυμητό τελικό πάχος και το κέλυφος είναι έτοιμο.



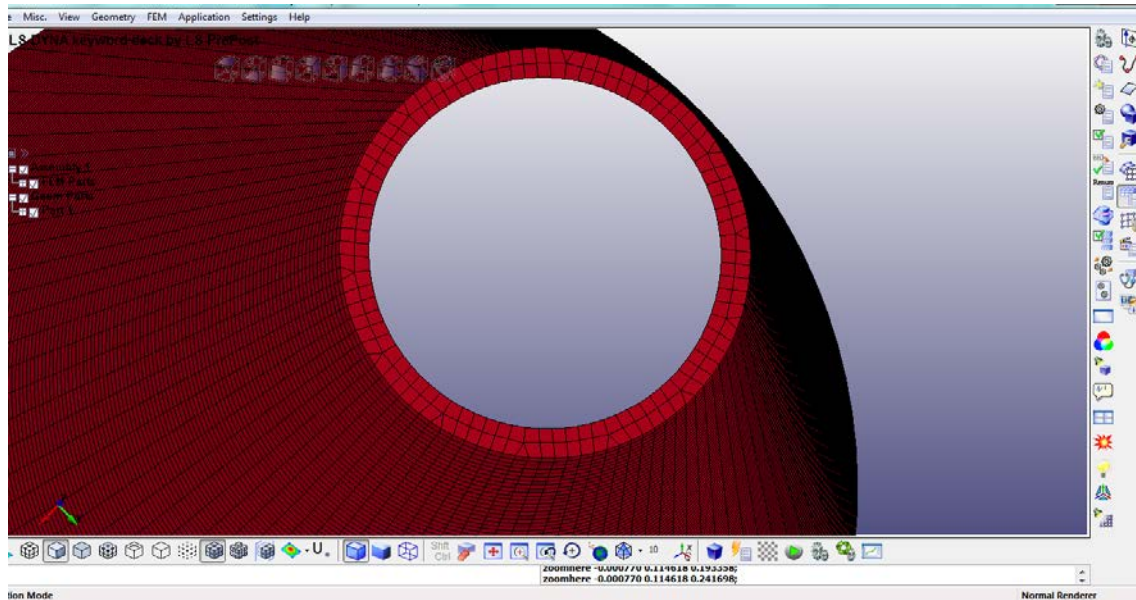
Σχήμα 5.4.

Για την δημιουργία πλέγματος επιλέγουμε ELEMENT & MESH → SOLID MESHER. Ο τρόπος με τον οποίο διαλέγουμε τις επιφάνειες δημιουργίας πλέγματος είναι ο εξής:



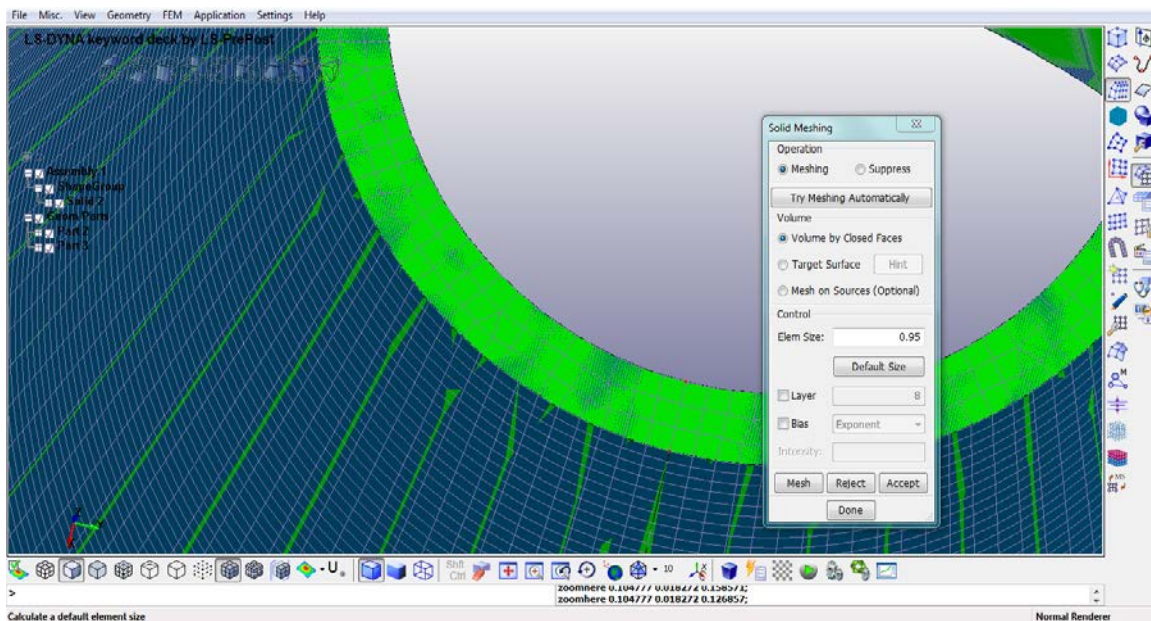
Σχήμα 5.5.

Για το συγκεκριμένο κέλυφος το οποίο αποτελείται από δύο στρώσεις υαλονημάτων υπολογίζουμε $\text{Element Size} = 1$ ώστε κατά την έννοια του πάχους του να χωρέσουν δύο πεπερασμένα στοιχεία. Όντως μόλις γίνει η πλεγματοποίηση παρατηρούμε τις δύο στρώσεις πεπερασμένων στοιχείων στην πάνω και κάτω διάμετρο.



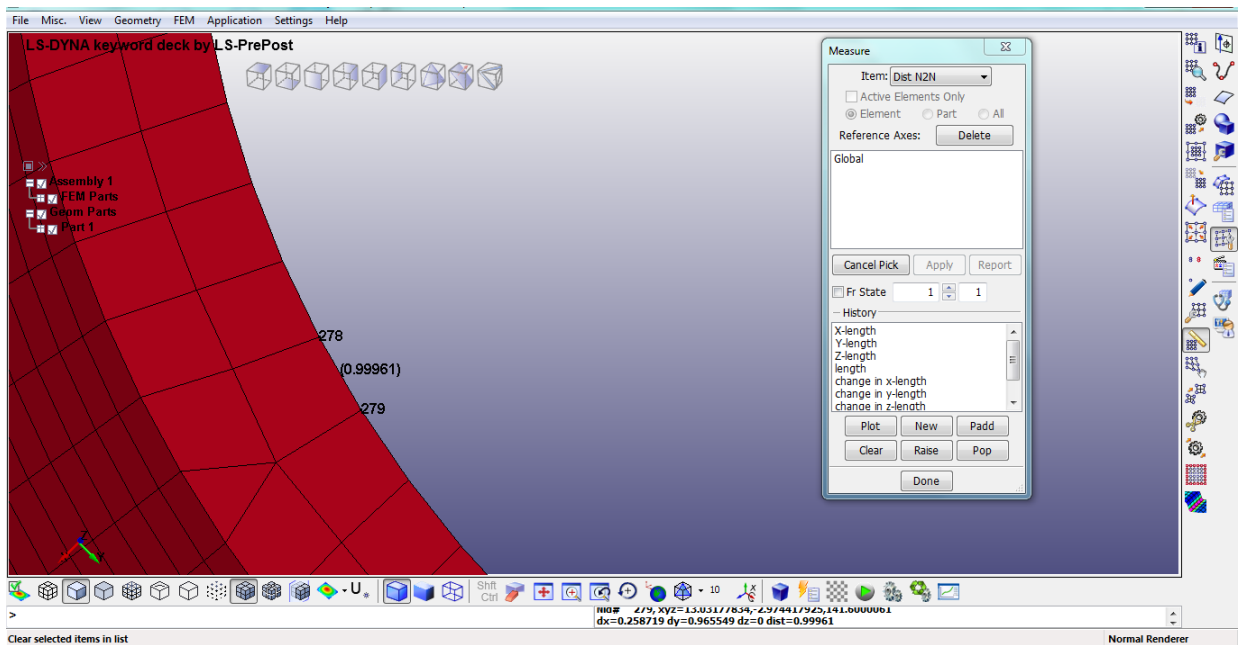
Σχήμα 5.6.

Όμως, στην περίπτωση που θέλουμε να δημιουργήσουμε πλέγμα στα κελύφη τριών στρώσεων, τότε επιλέγουμε $\text{Element Size} = 0.95$ για πάχος 2.8mm ώστε να χωρέσουν τρία πεπερασμένα στοιχεία κατά την έννοια του πάχους.

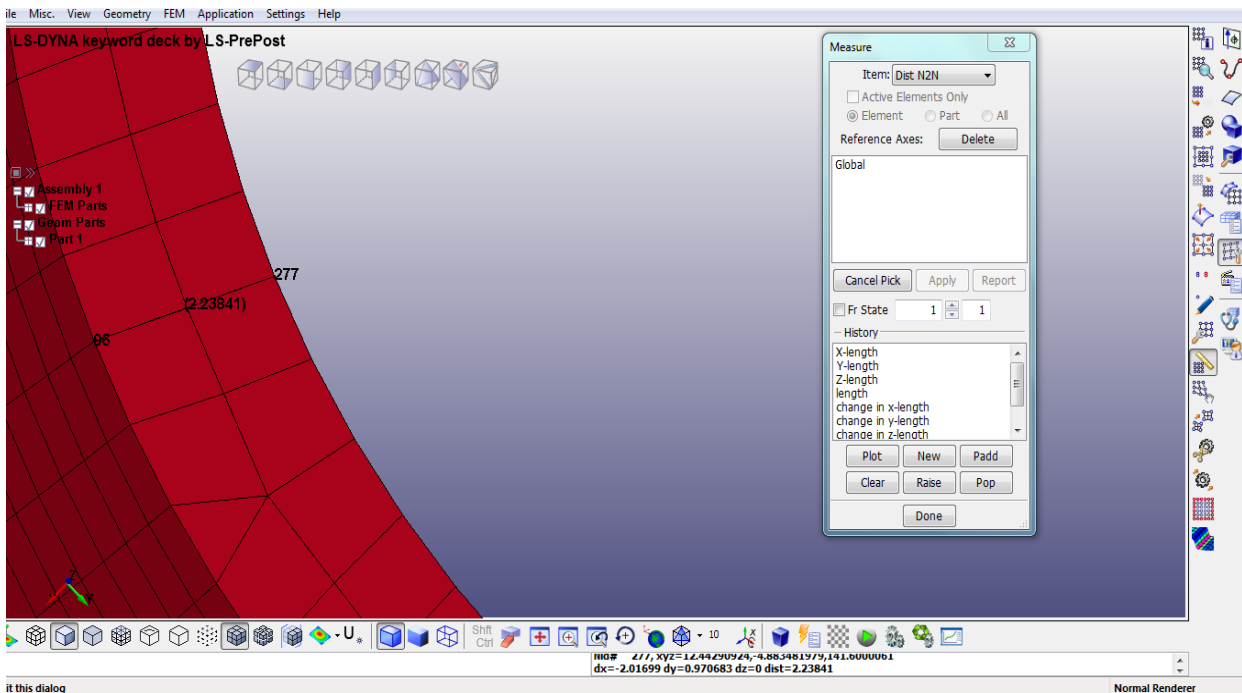


Σχήμα 5.7.

Σε αυτό το βήμα θα ήταν χρήσιμο να μετρήσουμε την απόσταση των κόμβων και το ακριβές πάχος που δημιουργήθηκε με την βοήθεια της εντολής FEM→ELEMENT TOOLS→MEASURE. Επιλέγοντας τους κόμβους που θέλουμε να μετρήσουμε το πρόγραμμα μας δίνει σαν αποτέλεσμα την μεταξύ τους απόσταση.

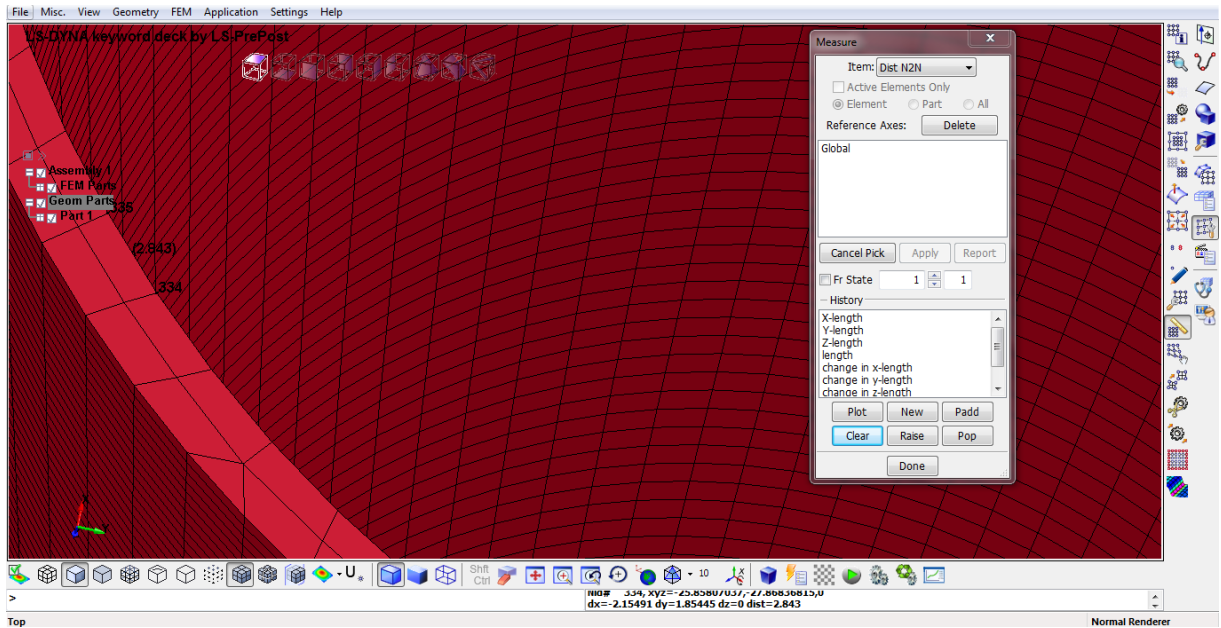


Σχήμα 5.8.



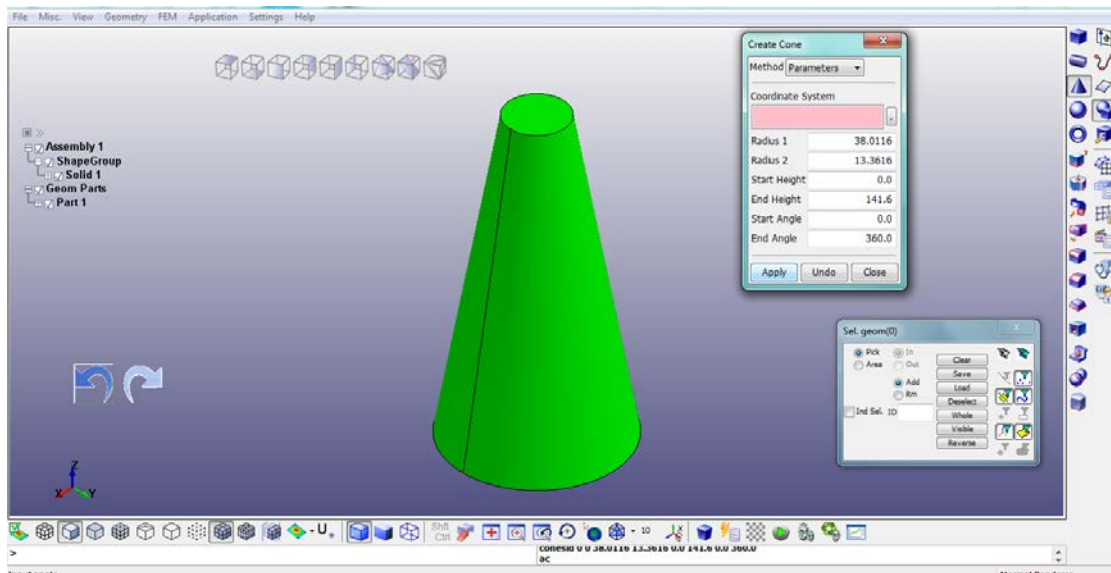
Σχήμα 5.9.

Το ίδιο ακριβώς κάνουμε και για την κάτω διάμετρο του δοκιμίου έτσι ώστε μετά να είμαστε σε θέση να δημιουργήσουμε αντίστοιχο πλέγμα και στον αφρό με τον οποίο θα πληρώσουμε το κέλυφος



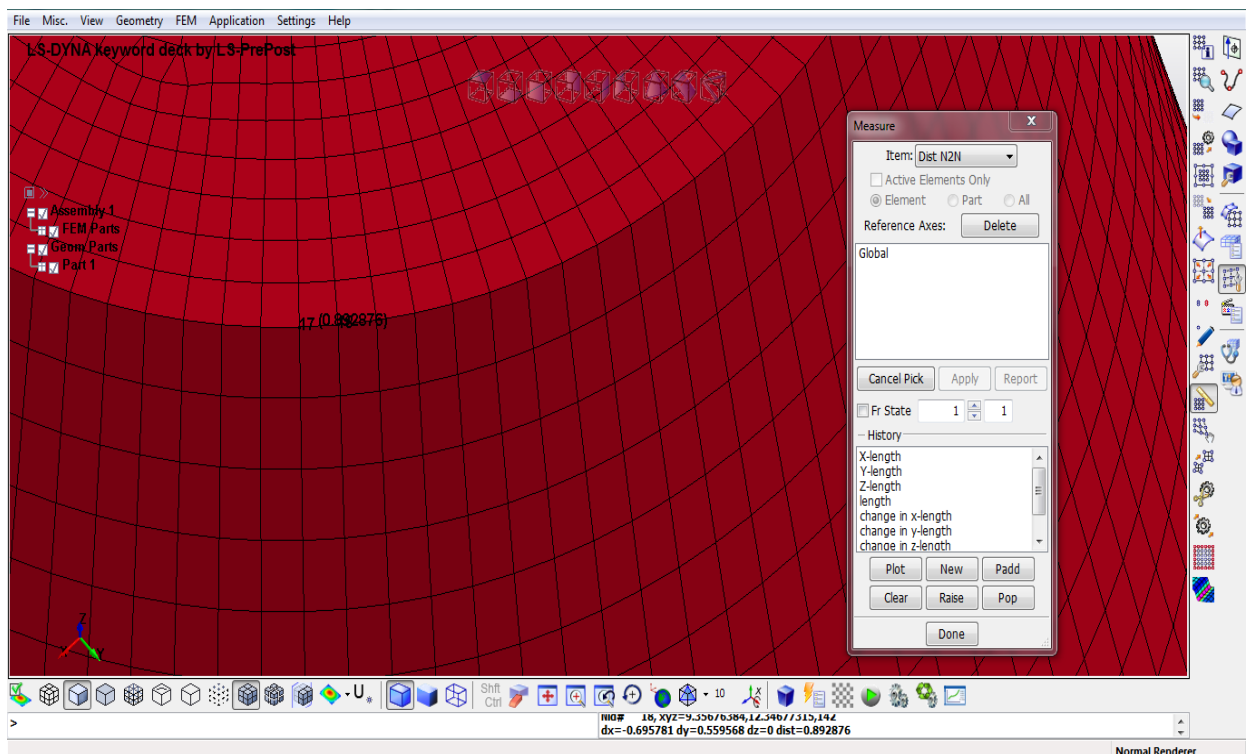
Σχήμα 5.10.

Αφού τελειώσουμε με το κέλυφος, αρχίζουμε την σχεδίαση του αφρού. Με παρόμοιο τρόπο δημιουργούμε την γεωμετρία:



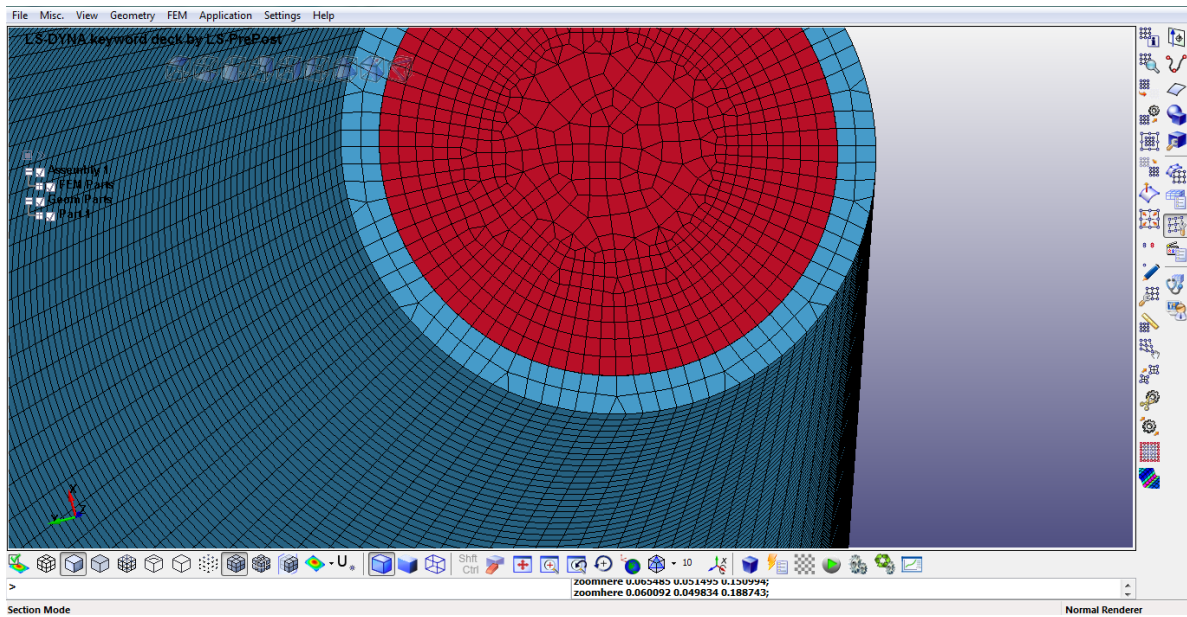
Σχήμα 5.11.

Σχετικά με την πλεγματοποίηση για ένα σωστά δομημένο συνολικό πλέγμα στόχος μας είναι να συμπέσουν οι κόμβοι του κελύφους με τους κόμβους του αφρού και η κατανομή τους στο χώρο όπως και οι διαστάσεις των πεπερασμένων στοιχείων να είναι περίπου η ίδια. Αυτό πραγματοποιείται με δοκιμές ώστε να επιτύχουμε το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.



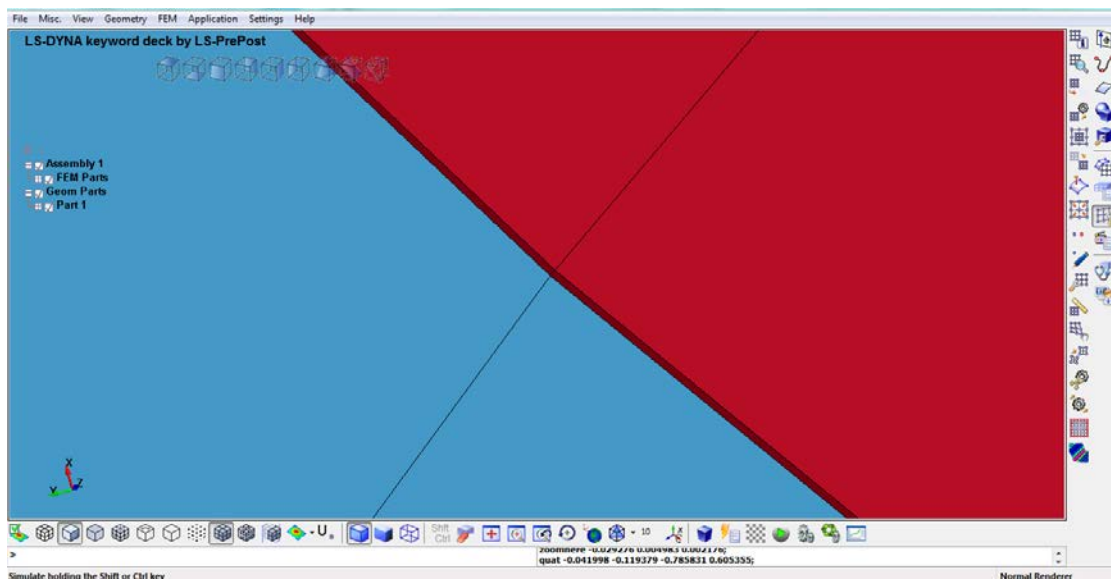
Σχήμα 5.12

Εφόσον το πλέγμα του αφρού έχει δημιουργηθεί μετράμε πάλι αποστάσεις ώστε να επιβεβαιώσουμε την ομοιομορφία των κόμβων στο κέλυφος και τον αφρό και την επιλογή FILE→IMPORT→LS-DYNA KEYWORD FILE μπορούμε πια να ενώσουμε τα δύο αρχεία σε ένα:



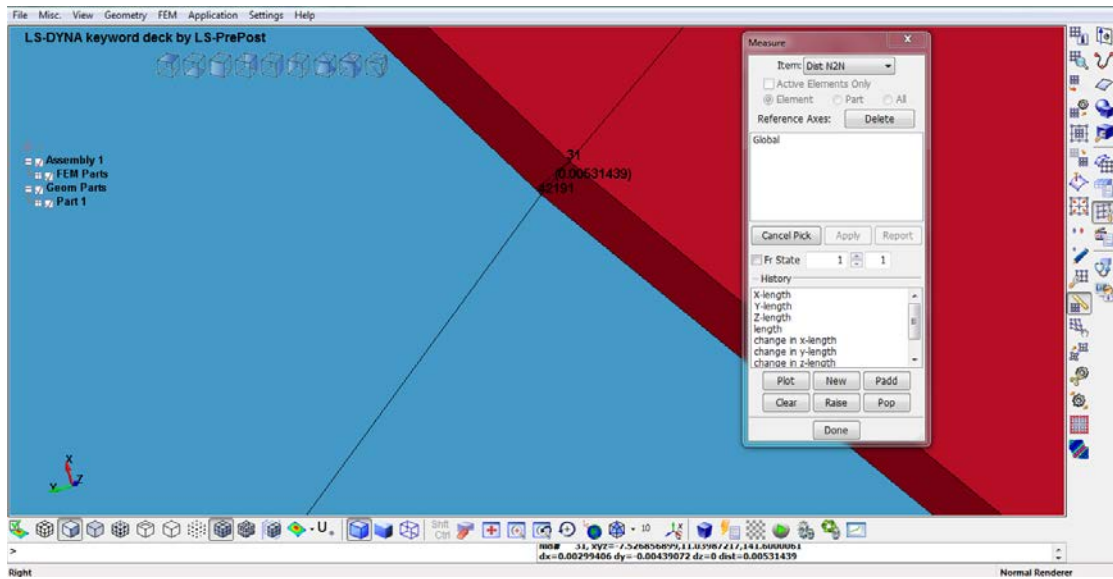
Σχήμα 5.13.

Βέβαια, από την συγχώνευση των δύο αρχείων προκύπτουν κάποιες ατέλειες που πρέπει να διορθωθούν όπως βλέπουμε στο παρακάτω σχήμα:



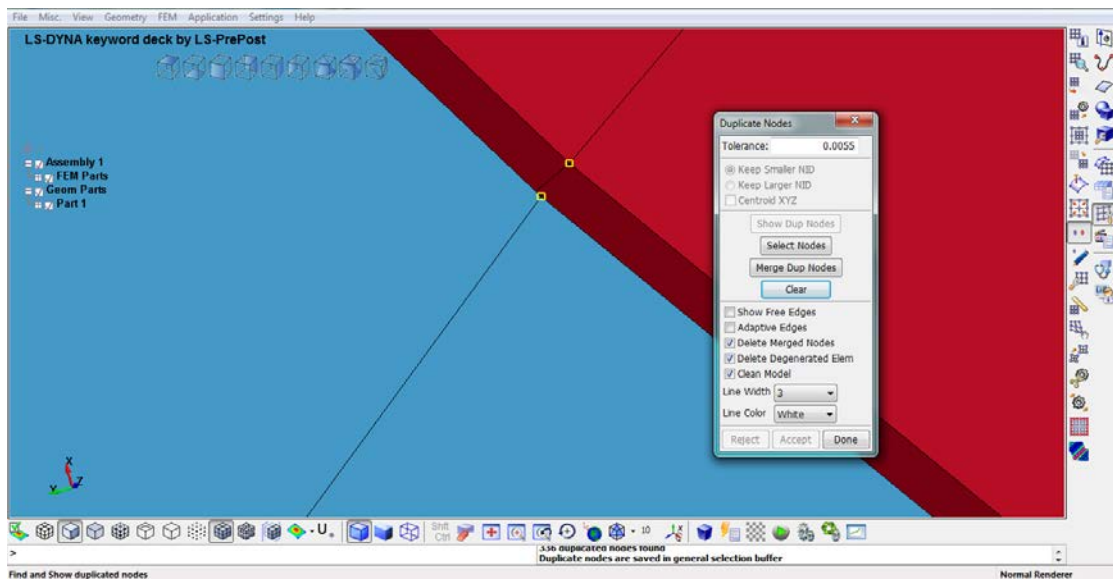
Σχήμα 5.14.

Ο τρόπος με τον οποίο τις διορθώνουμε είναι καταρχήν να μετρήσουμε την απόσταση που πρέπει να εξαλειφθεί :



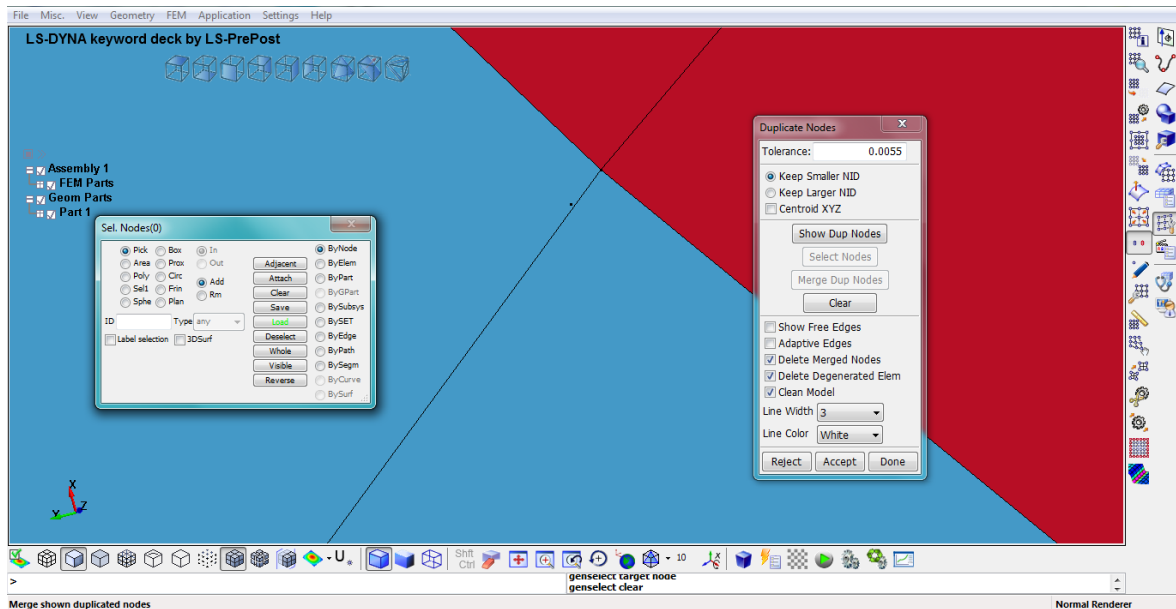
Σχήμα 5.15.

Και στη συνέχεια με την επιλογή FEM→ELEMENT TOOLS→DUPLICATE NODES εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο:



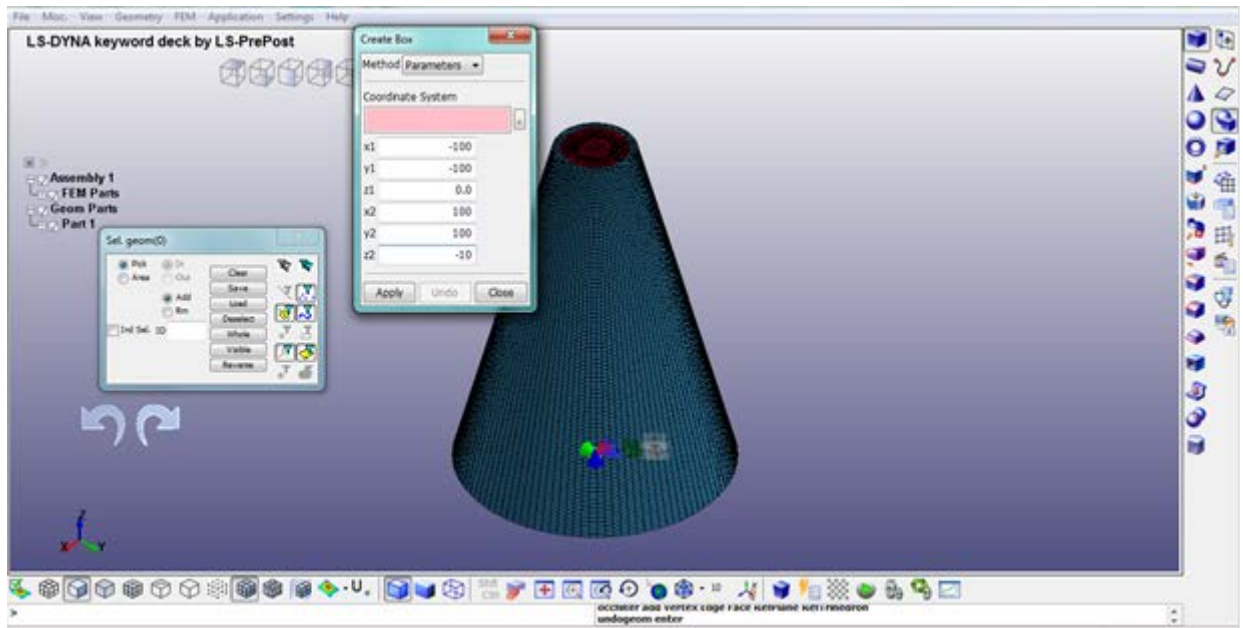
Σχήμα 5.16.

Σε αυτό το παράθυρο ορίζουμε σαν απόσταση κόμβων ένα λίγο μεγαλύτερο νούμερο από αυτό που υπολογίσαμε προηγουμένων ώστε να συμπεριληφθούν στην συγχώνευση και οι κόμβοι που θέλουμε. Αφού επιλέξουμε SHOW DUP NODES εμφανίζονται στο δοκίμιο οι κόμβοι που είναι έτοιμοι προς συγχώνευση και πατώντας το MERGE DUP NODES πραγματοποιείται η συγχώνευση και καταλήγουμε στην παρακάτω μορφή:



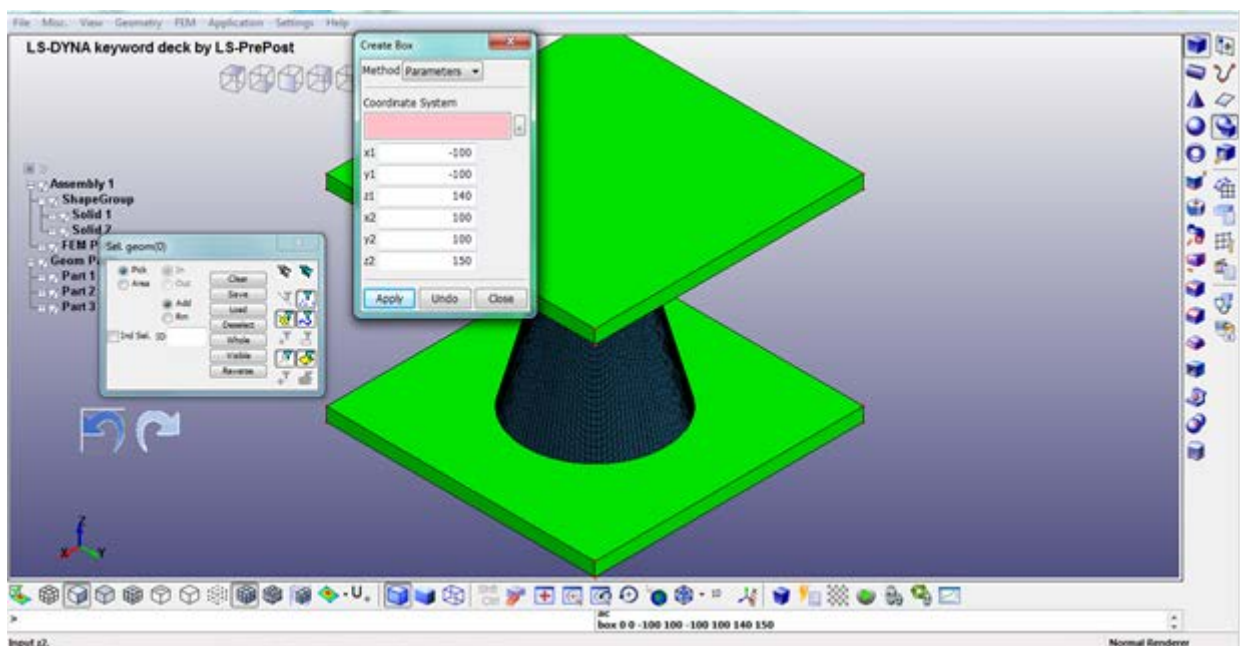
Σχήμα 5.17

Ακολουθεί ο σχεδιασμός της κάτω πλάκας, στην οποία στηρίζεται το δοκίμιο μας, και της άνω πλάκας η οποία είναι υπεύθυνη για την θλίψη του δοκιμίου. Συγκεκριμένα επιλέγουμε την καρτέλα SOLID→CREATE BOX και εμφανίζεται η παρακάτω οθόνη:



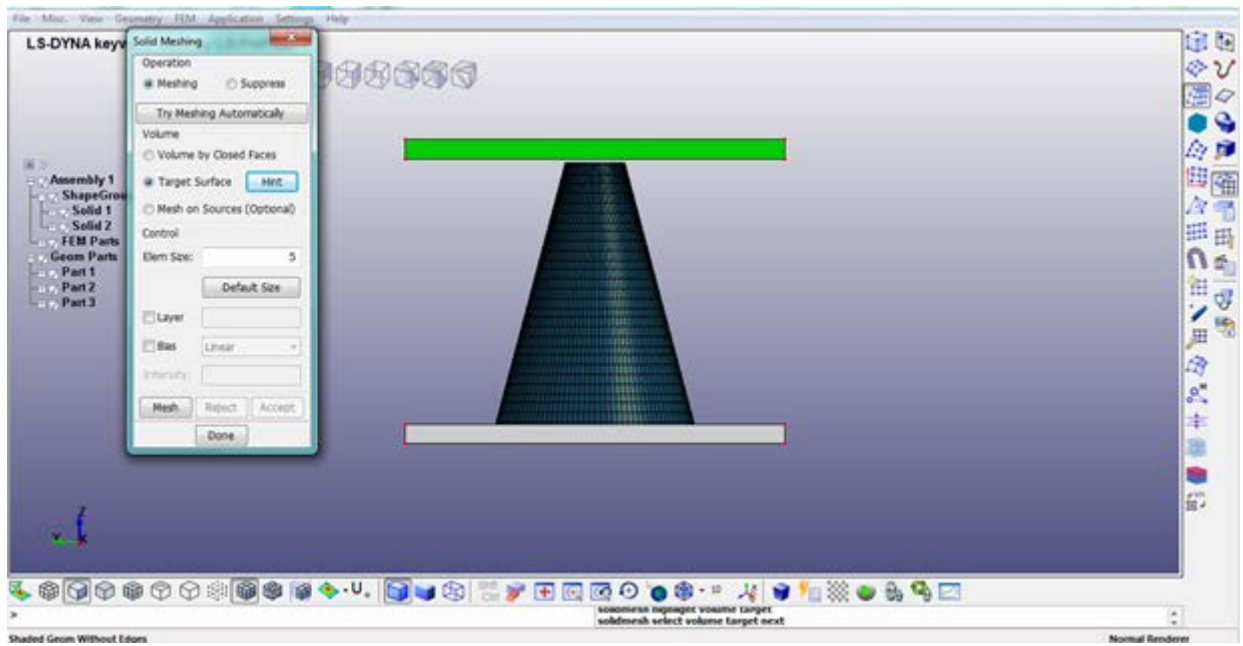
Σχήμα 5.18.

Πληκτρολογούμε τις διαστάσεις των πλακών αρκετά μεγάλες ώστε σε περίπτωση αύξησης της κάτω διαμέτρου λόγω της κατάρρευσης να μην προκύψει μεγαλύτερη από την διάσταση της πλάκας. Τελικά προκύπτει το παρακάτω σχήμα:



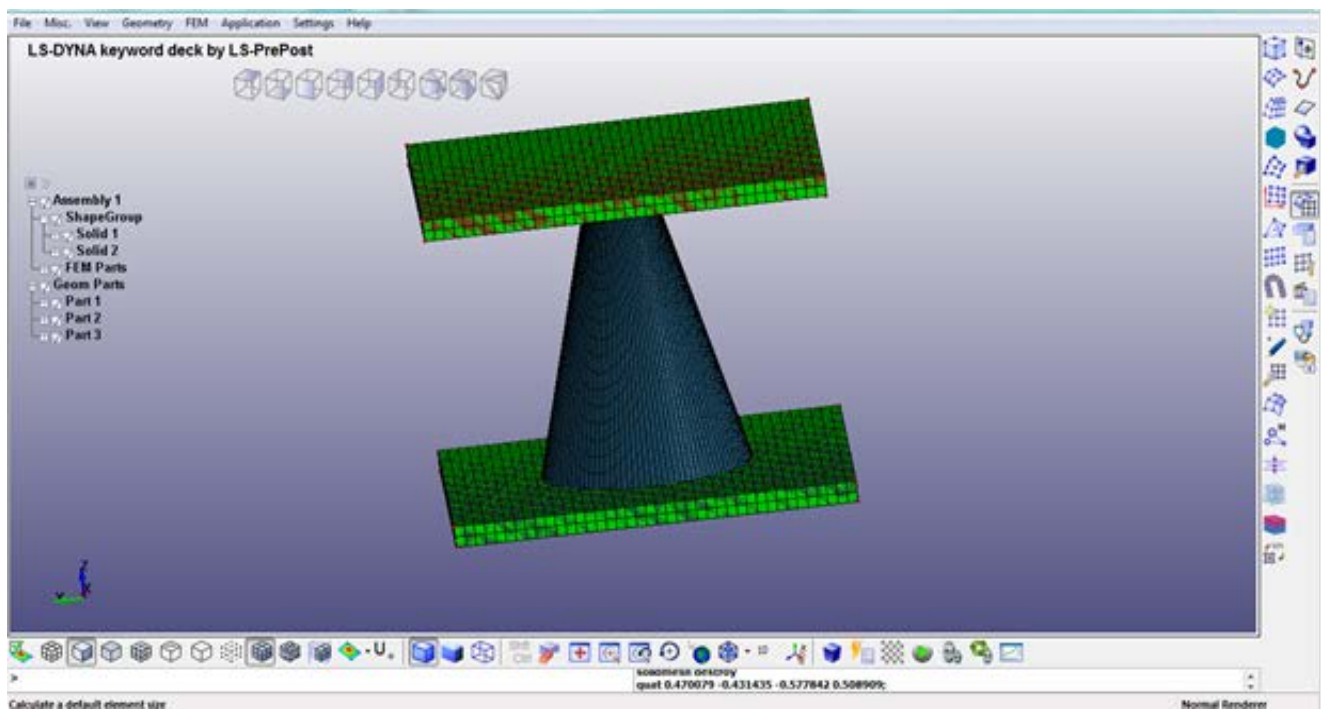
Σχήμα 5.19

Η πλεγματοποίηση των πλακών γίνεται με Element Size = 5 και σαν target surface επιλέγουμε την μπροστινή όψη της πλάκας:



Σχήμα 5.20

Τέλος αφού πραγματοποιηθεί η δημιουργία πλέγματος των πλακών έχουμε πια την τελική μορφή του δοκιμίου έτοιμο προς καθορισμό των ιδιοτήτων του:



Σχήμα 5.21.

5.3.1. Καθορισμός υλικού

Αρχικά πρέπει να οριστεί το υλικό για τα μη παραμορφώσιμα υλικά δηλαδή τις πλάκες. Από την καρτέλα FEM→MODEL AND PART→KEYWORD MANAGER→MAT επιλέγουμε το τύπο υλικού RIGID και εισάγουμε τις παρακάτω ιδιότητες:

1	MID	RO	E	PR	N	COUPLE	M	ALIAS
1	1	0.0078300	2.070e+005	0.3000000	0.0	0	0.0	
2	CMO	CON1	CON2					
	1.0	4	7					
3	LCO OR A1	A2	A3	V1	V2	V3		
	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		

Σχήμα 5.22.

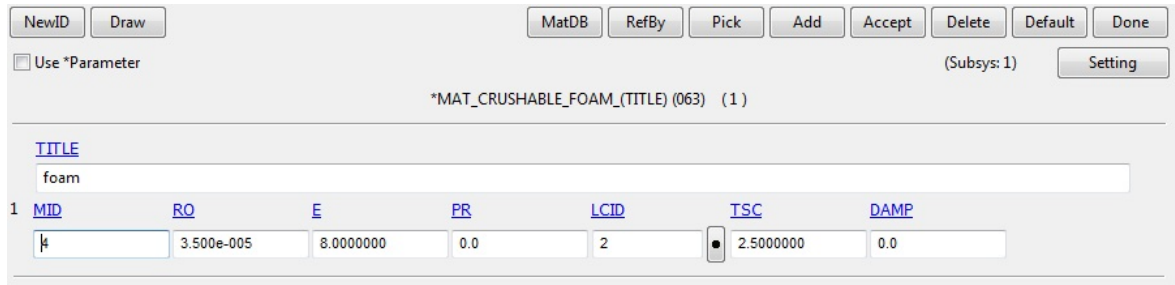
Επειδή στην καρτέλα που ορίζουμε το υλικό ορίζουμε και αν είναι σταθερό ή έχει κάποια κίνηση θα πρέπει να δημιουργήσουμε δύο καρτέλες με το ίδιο υλικό η μία για την σταθερή πλάκα και η άλλη για την κινούμενη όπως φαίνεται παραπάνω. Η εντολή που δηλώνει αν το απαραμόρφωτο υλικό θα είναι σταθερό ή κινούμενο είναι η CON1 η οποία δίνει έτοιμες επιλογές για να επιλεγθεί σε ποιούς άξονες θα είναι σταθερό το υλικό. Η κινούμενη άνω πλάκα είναι αυτή που στη θέση CON1 έχει τον αριθμό 4.

Στο κέλυφος χρησιμοποιούμε τον τύπο υλικού 024-PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY και εισάγουμε τα ανάλογα στοιχεία:

1	MID	RO	E	PR	SIGY	ETAN	FAIL	TDEL
1	3	0.0013700	1.000e+004	0.2600000	180.00000	0.0	0.1500000	0.0
2	C	P	LCSS	LCSR	VP			
	0.0	0.0	0	0	0.0			
3	EPS1	EPS2	EPS3	EPS4	EPS5	EPS6	EPS7	EPS8
	0.0	1.0000000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	ES1	ES2	ES3	ES4	ES5	ES6	ES7	ES8
	180.00000	180.00000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Σχήμα 5.23.

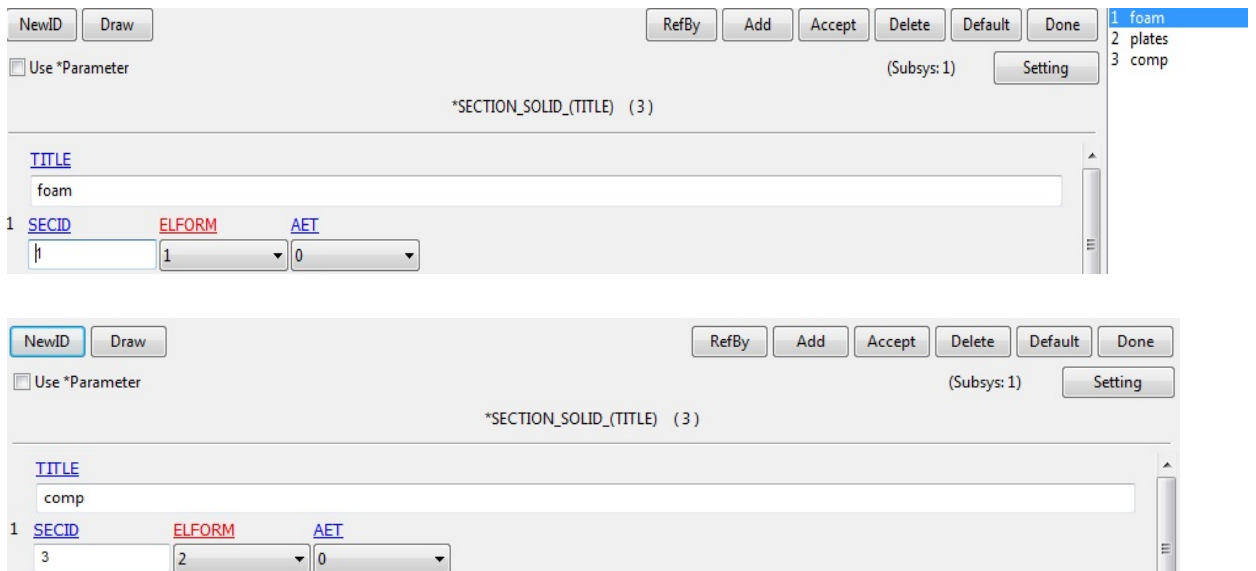
Τέλος, ο τύπος υλικού που επιλέξαμε για τον αφρό ήταν MAT CRUSHABLE FOAM. Στην εικόνα φαίνεται εκτός από τις ιδιότητες του υλικού, έχουμε εισάγει και την καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης όπως και τον TSC (tensile stress cutoff).



Σχήμα 5.24.

5.3.2 Ορισμός τεμαχίων και κόμβων

Για να ορίσουμε τα τεμάχια που θα πάρουν μέρος στη δοκιμή θλίψης επιλέγουμε KEYWORD MANAGER→SECTION→SOLID και εμφανίζεται η παρακάτω οθόνη στην οποία μπορούμε να δώσουμε όνομα σε κάθε τεμάχιο ώστε να υπάρχει πλήρης και σαφής διαχωρισμός. Ο ορισμός των στοιχείων παίζει βασικό ρόλο διότι ορίζει την αντίδραση που θα έχει το πλέγμα στην παραμόρφωση του στην κατεργασία της συμπίεσης.



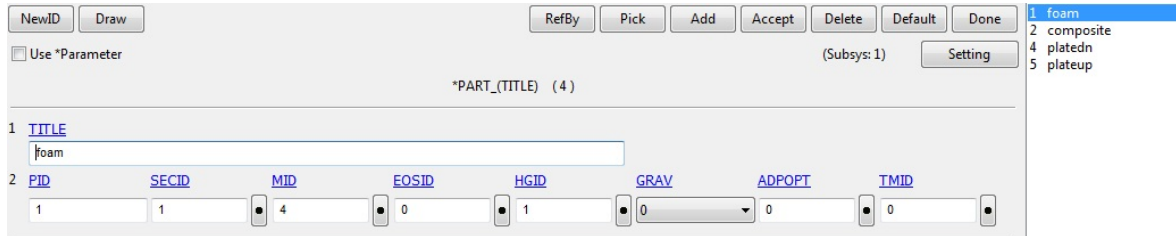
Σχήμα 5.25.

Όπου η επιλογή ELFORM αντιστοιχεί στις επιλογές διαμόρφωσης των πεπερασμένων στοιχείων.

1 = constant stress solid element (default)

2 = fully integrated S/R solid

Για να ολοκληρωθεί η διαδικασία σύνδεσης τεμαχίων με τα υλικά τους μένει ακόμα να ορίσουμε τα αντίστοιχα parts με την εντολή KEYWORD MANAGER→PART→PART



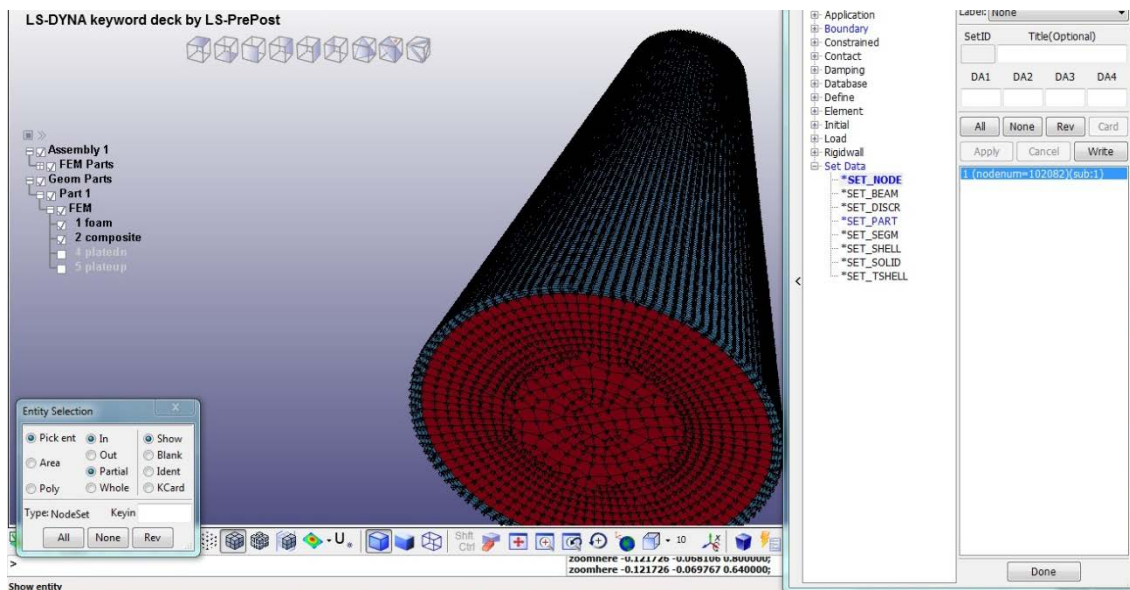
Σχήμα 5.26.

Σε αυτήν την καρτέλα λοιπόν συνδέουμε το κάθε part με το υλικό και το τεμάχιο που του αντιστοιχεί. Στον αφρό συγκεκριμένα στην εντολή HGID (Hourglass) επιλέγουμε να εισαχθούν τα δεδομένα που έχουμε ήδη προσθέσει στην καρτέλα Hourglass και αναφέρεται στην συμπεριφορά του αφρού κατά την δοκιμή θλίψης.

Για να ορίσουμε τους κόμβους του δοκιμίου μας ακολουθούμε την εντολή:

FEM→MODEL_AND_PART→CREATE_ENTITY→SET_DATA→SET_NODES

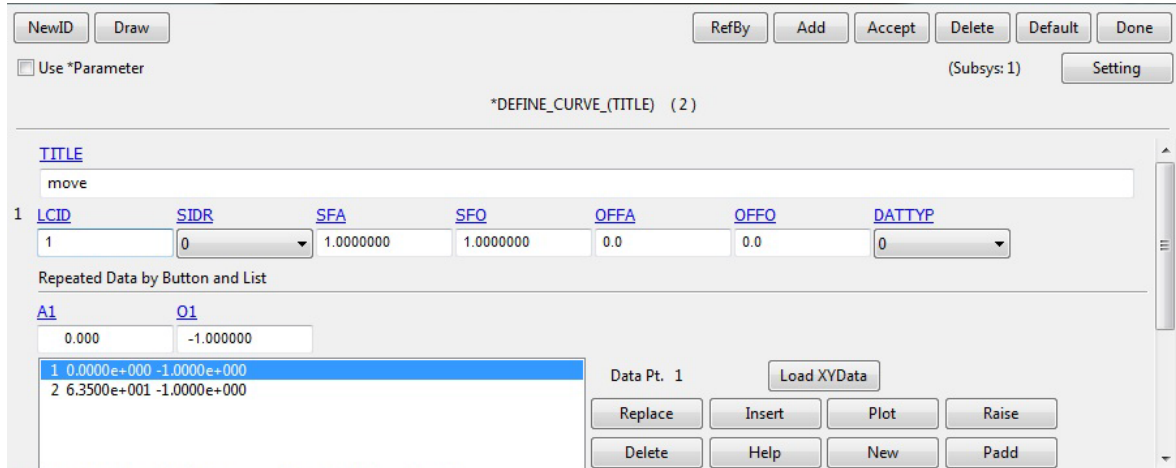
Για να δημιουργήσουμε νέους κόμβους επιλέγουμε την εντολή Cre και την εντολή area στο παράθυρο sel.Nodes, επιλέγουμε ολόκληρο το κέλυφος και τον αφρό και πατάμε apply.



Σχήμα 5.27.

5.3.3 Ταχύτητα εμβόλου

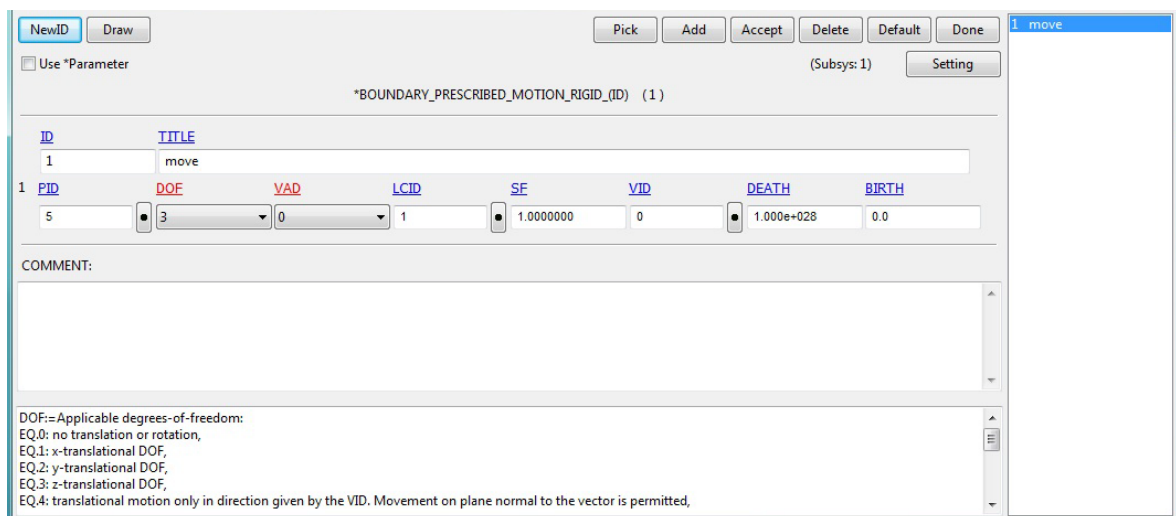
Για την ταχύτητα του εμβόλου από το παράθυρο ελέγχου Keyword Manager επιλέγουμε KEYWORD MANAGER→DEFINE→CURVE:



Σχήμα 5.28.

Σε αυτήν την καρτέλα εισάγουμε την ταχύτητα και την απόσταση που θα καλύψει η κινούμενη πλάκα.

Στην συνέχεια θα πρέπει να δηλώσουμε πιο απαραμόρφωτο σώμα κάνει την κίνηση και σε ποιον άξονα αλλά και τι είδους κίνηση κάνει. Αυτό επιτυγχάνεται με την εντολή KEYWORD MANAGER→BOUNDARY→PRESCRIBED_MOTION_RIGID:



Σχήμα 5.29

Εδώ επιλέγουμε την διεύθυνση κίνησης στον z-άξονα με την επιλογή $DOF = 3$ και στην εντολή LCID επιλέγουμε την καμπύλη *movne* που είχαμε φτιάξει προηγουμένως.

5.3.4 Καταχώρηση επαφών

Σε αυτή την καρτέλα δηλώνουμε ποιά σώματα έρχονται σε επαφή αλλά και τον συντελεστή τριβής τους. Στην εντολή SSTYP δηλώνουμε με ποιό τύπο θα δηλώσουμε το κομμάτι που θα δεχθεί την παραμόρφωση, επιλέγουμε να το καταχωρήσουμε βάση της λίστας των κόμβων που έχουμε δημιουργήσει. Με τον ίδιο τρόπο θα δηλώσουμε και τον τύπο τού *απαραμόρφωτου* σώματος στην εντολή MSTYP και θα επιλέξουμε να καταχωρήσουμε με τα τεμάχια (*segment ID*) που έχουμε καταχωρήσει. Στην εντολή SSID καταχωρούμε την λίστα των κόμβων τού δοκιμίου μας και στο MSID καταχωρούμε την πλάκα που έρχεται σε επαφή. Στις εντολές FS και FD ορίζουμε την δυναμική και την στατική τριβή της επαφής. Ακολουθούμε την διαδικασία και για τις δύο πλάκες. Για την καταχώριση των αλλαγών επιλέγουμε *Accept* αλλιώς η αλλαγές δεν θα καταχωρηθούν. Για την δημιουργία νέας καταχώρησης Επιλέγουμε *ADD*.

Για την επαφή των πλακών με το σύνολο κέλυφος-αφρός επιλέγουμε το μοντέλο επαφής με την ονομασία **KEYWORD**

MANAGER→CONTACT→AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE

ID	IGNORE	BUCKET	LCBUCKET	NS2TRACK	INITITER	PARMAX	UNUSED	CPARMB
2	0	200		3	2	1.0005		0
3	UNUSED	CHKSEGS	PENSE	GRPABLE				
		0	1.0	0				
4	SSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID	SPR	MPR
	1	5	4	3	0	0	0	0
5	FS	FD	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
	0.3000000	0.2000000	0.0	0.0	0.0	0	0.0	1.000e+020
6	SFS	SFM	SST	MST	SFST	SFMT	FSF	VSF
	20.0000000	1.0000000	0.0	0.0	1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000
9	SOFT	SOFACL	LCIDAB	MAXPAR	SBOPT	DEPTH	BSORT	FRCFRQ
	1	0.1000000	0	1.0250000	2.0	2	0	1

Σχήμα 5.30.

SFS = 20

SOFT = 1

SOFT (Softening reduction factor) είναι μια αριθμητική παράμετρος που χρησιμοποιείται για να αποφύγουμε φαινόμενα λυγισμού. Είναι ο παράγοντας μείωσης για την αντοχή υλικού στοιχείου του οποίου οι κόμβοι έχουν αστοχήσει. Η προεπιλεγμένη τιμή είναι 1 που σημαίνει ότι τα στοιχεία συγκρατούν το 100% από την αντοχή τους. Όταν η αξία του SOFT είναι 0,5, αυτό σημαίνει ότι η σειρά των στοιχείων, τα οποία έχουν κοινούς κόμβους των προηγούμενων στοιχείων που μόλις αστόχησαν, θα έχουν μόνο το 50% της αρχικής τους αντοχής. Ο SOFT είναι από τις πιο ισχυρές αριθμητικές παραμέτρους που είναι ικανή να αλλάζει το σχήμα της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης, ώστε να ταιριάζει απόλυτα με τα πειραματικά αποτελέσματα. Αυτή η παράμετρος πρέπει να αλλάξει για κάθε γεωμετρική δομή, με τη μέθοδο δοκιμής και σφάλματος, για να παραχθεί αποτελέσματα τα οποία είναι σε συμφωνία με την πειραματική καμπύλη φορτίου-μετατόπισης.

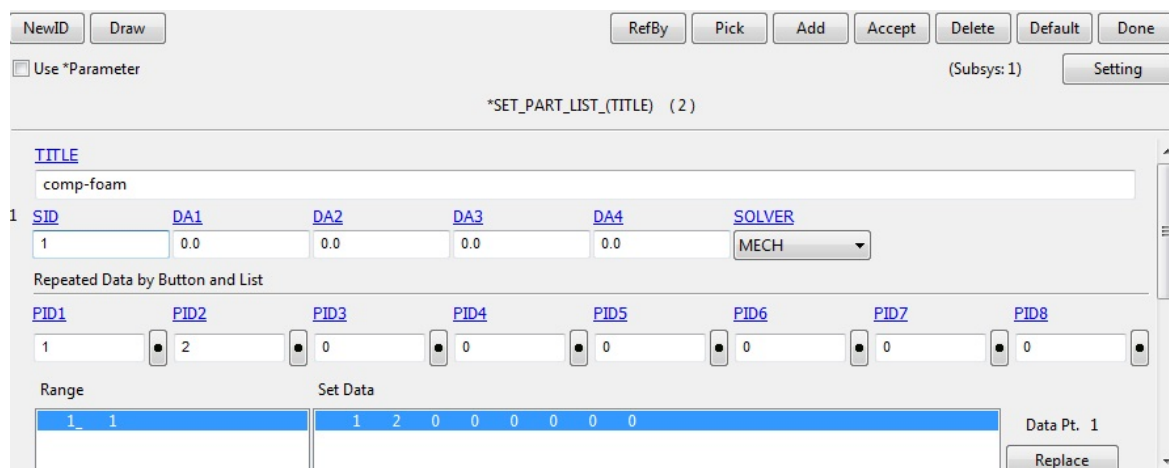
Άλλη μία επαφή την οποία πρέπει να ορίσουμε είναι αυτή του κελύφους με τον αφρό. Για να πραγματοποιηθεί αυτό χρησιμοποιούμε το μοντέλο επαφής

CONTACT_ERODING_SINGLE_SURFACE

4	SSID	MSID	SSTYP	MSTYP	SBOXID	MBOXID	SPR	MPR
	1	0	2	0	0	0	0	0
5	ES	ED	DC	VC	VDC	PENCHK	BT	DT
	0.3000000	0.2000000	0.0	0.0	0.0	0	0.0	1.000e+020
6	SFS	SFM	SST	MST	SFST	SFMT	ESE	VSF
	1.0000000	1.0000000	0.0	0.0	1.0000000	1.0000000	1.0000000	1.0000000
7	ISYM	EROSOP	IADJ					
	0	1	1					
8	SOFT	SOFSCL	LCIDAB	MAXPAR	SBOPT	DEPTH	BSORT	FRCFRQ
	2	0.1000000	0	1.0250000	2.0	2	0	1

Σχήμα 5.31

Σε αυτήν την καρτέλα ορίζουμε σαν SSID το SET_PART_LIST που έχουμε φτιάξει το οποίο αποτελείται από τον αφρό και το κέλυφος:



Σχήμα 5.32.

Τέλος για την αποφυγή αρνητικού όγκου κατά το τρέξιμο του solver χρειάζεται να ορίσουμε ένα νέο μοντέλο επαφής στο εσωτερικό του αφρού. Επιλέγουμε KEYWORD MANAGER→CONTACT→INTERIOR:



Σχήμα 5.33

Εισάγουμε το μονομελές part set που δημιουργήσαμε και αποτελείται από τον αφρό και μόνο.

5.3.5 Ορισμός χρονικής λήξης της κατεργασίας

Με αυτήν την εντολή ορίζουμε πόσο θα διαρκέσει η προσομοίωση

KEYWORD→CONTROL→TERMINATION

	ENDTIM	ENDCYC	DTMIN	ENDENG	ENDMAS
1	63.500000	0	0.0	0.0	0.0

Σχήμα 5.34.

5.3.6 Ορισμός εμφάνισης αποτελεσμάτων

Σε αυτό το βήμα χρειάζεται να ορίσουμε τι αποτελέσματα θέλουμε να μας εμφανίσει αλλά και το βήμα στο οποίο θα υπολογίζει αυτά τα αποτελέσματα κάθε φορά. Αυτό πραγματοποιείται με την ακολουθία εντολών:

KEYWORD→DATABASE→ASCII_OPTION

	DT	BINARY	LCUR	IOOPT
<input type="checkbox"/> RBDOU	0.0	0	0	1
<input checked="" type="checkbox"/> RCFORC	0.05	0	0	1
<input type="checkbox"/> RWFORC	0.0	0	0	1
<input type="checkbox"/> SBTOUT	0.0	0	0	1

Σχήμα 5.35.

KEYWORD→DATABASE→BINARY_D3PLOT

	DT	LCDT	BEAM	NPLTC	PSETID
1	1.0000000	0	0	0	0

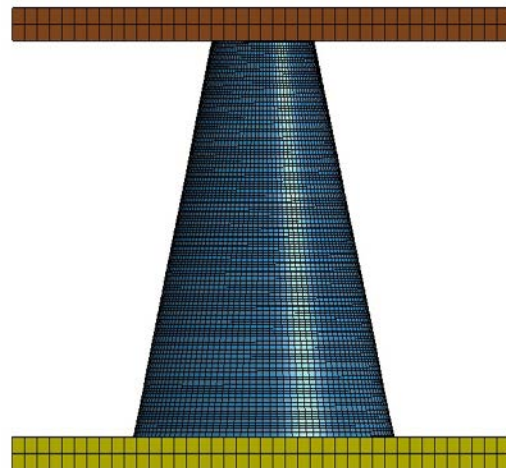
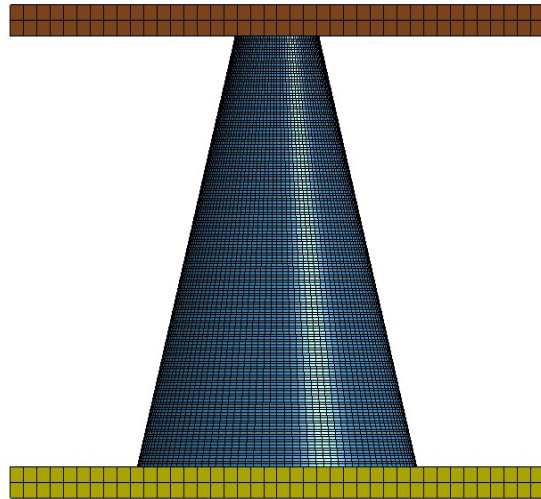
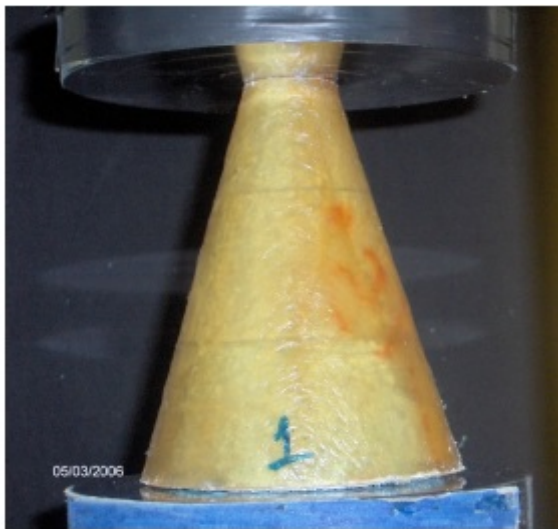
2 IOOPT: 0

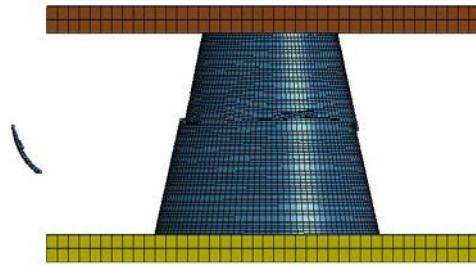
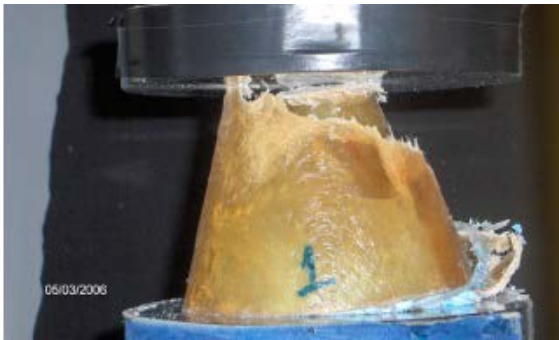
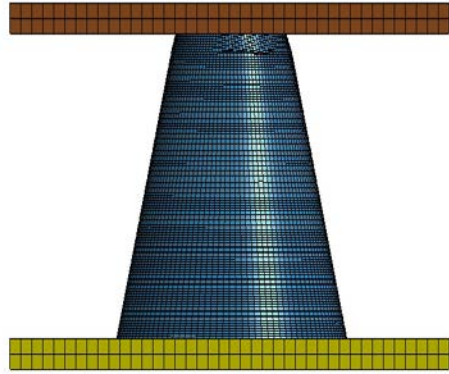
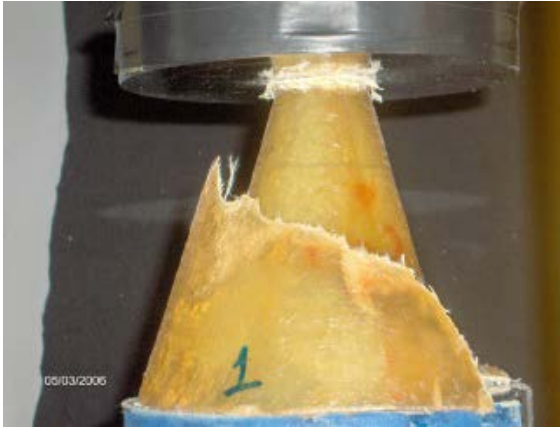
Σχήμα 5.36.

5.4 Συμπίεση κελυφών και σύγκριση με την πειραματική διαδικασία

5.4.1 Δοκίμιο 1^ο

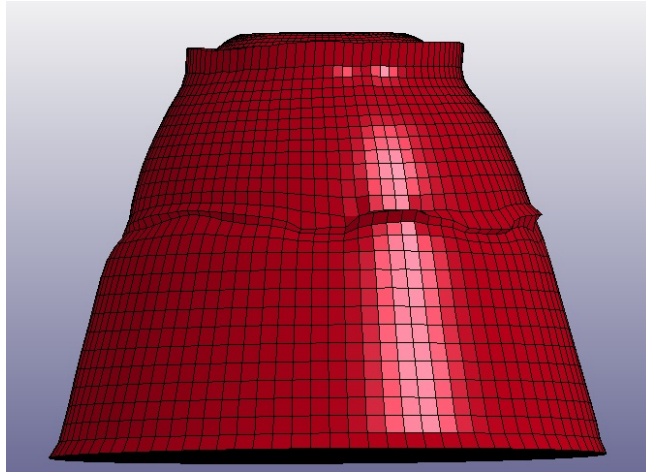
Από την προσομοίωση της θλίψης του πρώτου κελύφους μέσω του προγράμματος LS-DYNA και τη πειραματική αξονική καταπόνηση του σε πείραμα που εκτελέστηκε για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας του Γκαγκαδέλη Ερωτόκριτου ελήφθησαν φωτογραφίες των δοκιμίων σε διαδοχικές φάσεις συμπίεσης, οι οποίες παρουσιάζουν τον μηχανισμό παραμόρφωσης αυτών.



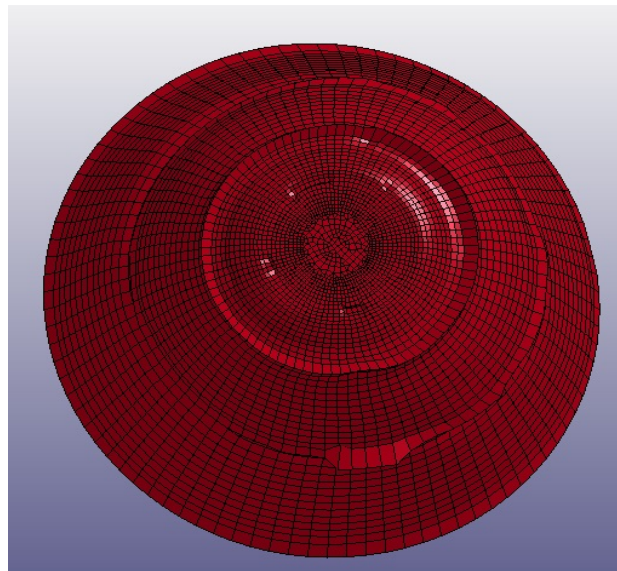


Σχήμα 5.37: Εικόνες από την κατάρρευση του δοκιμίου κατά την πειραματική διαδικασία και κατά την προσομοίωση στο LS-DYNA

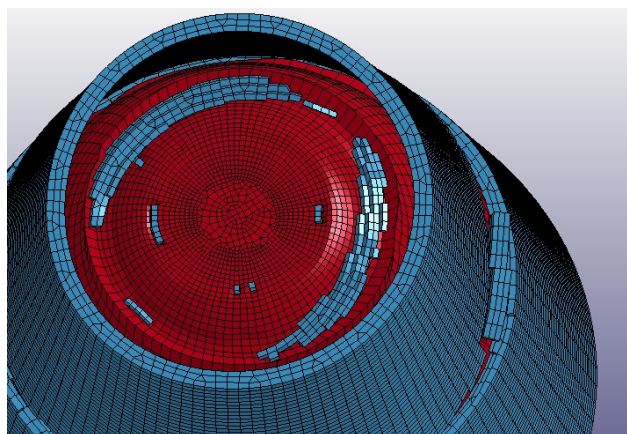
Από τις δοκιμές που έγιναν και στο πείραμα και στην προσομοίωση προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα φορτίου – μετατόπισης τα οποία συγκρίνουμε ώστε να κρίνουμε κατά πόσο αποτελεσματική ήταν η προσομοίωση που κάναμε και ποιοι παράμετροι είναι υπεύθυνοι για τις τυχόν διαφορές τους.



Σχήμα 5.38: Πλάγια όψη του συμπιεσμένου αφρού



Σχήμα 5.39: Άνω όψη συμπιεσμένου αφρού



Σχήμα 5.40: Άνω όψη δοκιμίου σε μέγιστη παραμόρφωση

Κατά το τρέξιμο του προγράμματος από τον επιλυτή του LS-DYNA εμφανίστηκε πρόβλημα αρνητικού όγκου σε πεπερασμένο στοιχείο του αφρού με αποτέλεσμα την διακοπή του προγράμματος. Υπάρχουν συγκεκριμένοι μέθοδοι για να αποφύγουμε το φαινόμενο αυτό σε αφρώδη υλικά.

Ένα τυπικό λάθος που αντιμετωπίζουμε κατά την διαδικασία μοντελοποίησης ενός αφρώδους υλικού το οποίο υπόκειται σε μεγάλες δυνάμεις και ισχυρές πιέσεις είναι η εμφάνιση αρνητικού όγκου ενός πεπερασμένου στοιχείου.

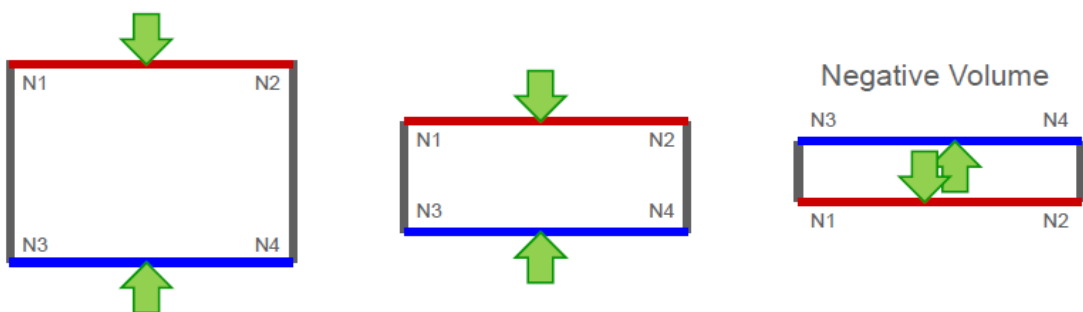
Το πρόβλημα εμφανίζεται στην οθόνη μας ως εξής:

```
110000 t 2.7432E-02 dt 4.38E-09 flush i/o buffers
115000 t 2.7454E-02 dt 5.81E-09 flush i/o buffers

*** Error negative volume in solid element # 3719 cycle 119373
*** Error complex sound speed in solid element # 3719 cycle 119373
```

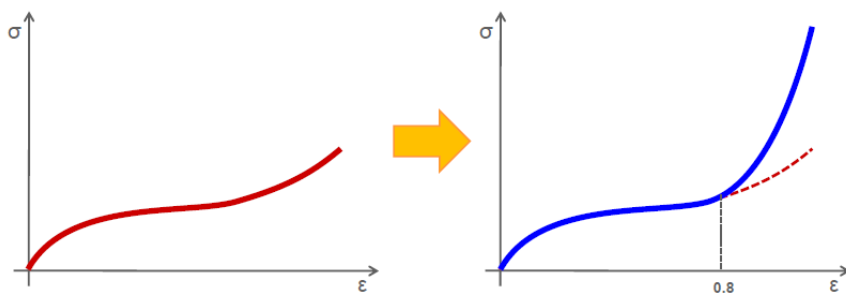
Σχήμα 5.41

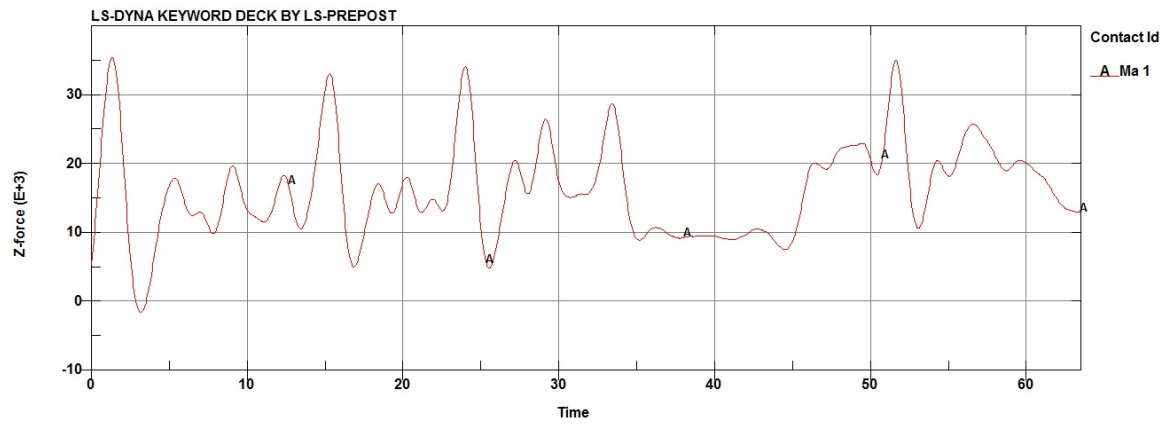
Και ουσιαστικά συμβαίνει κάτι αντίστοιχο με την παρακάτω εικόνα:



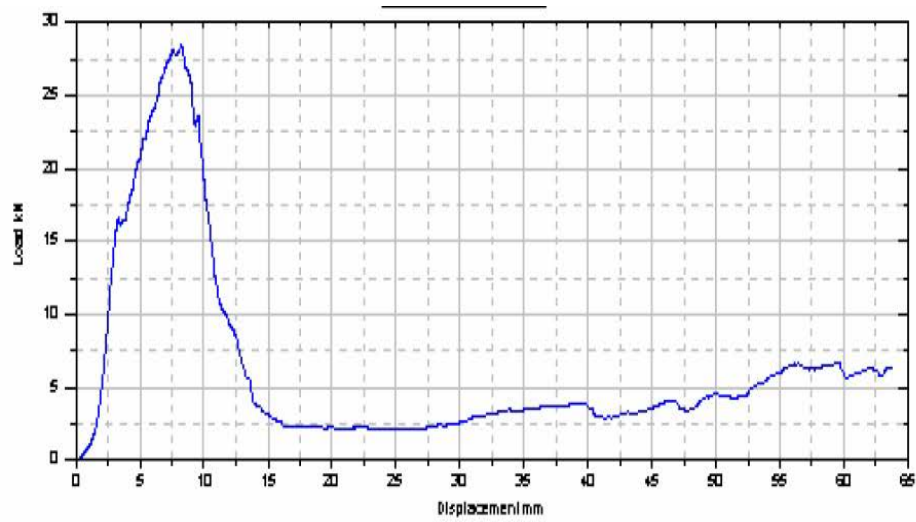
Σχήμα 5.42

Η μέθοδος που χρησιμοποιήσαμε στο συγκεκριμένο μοντέλο για να αντιμετωπίσουμε το φαινόμενο των αρνητικών όγκων είναι να αυξήσουμε την δυσκαμψία του αφρού επεκτείνοντας το διάγραμμα σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις:





Σχήμα 5.41: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης από την προσομοίωση στο LS-DYNA



Σχήμα 5.42: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης από την πειραματική διαδικασία

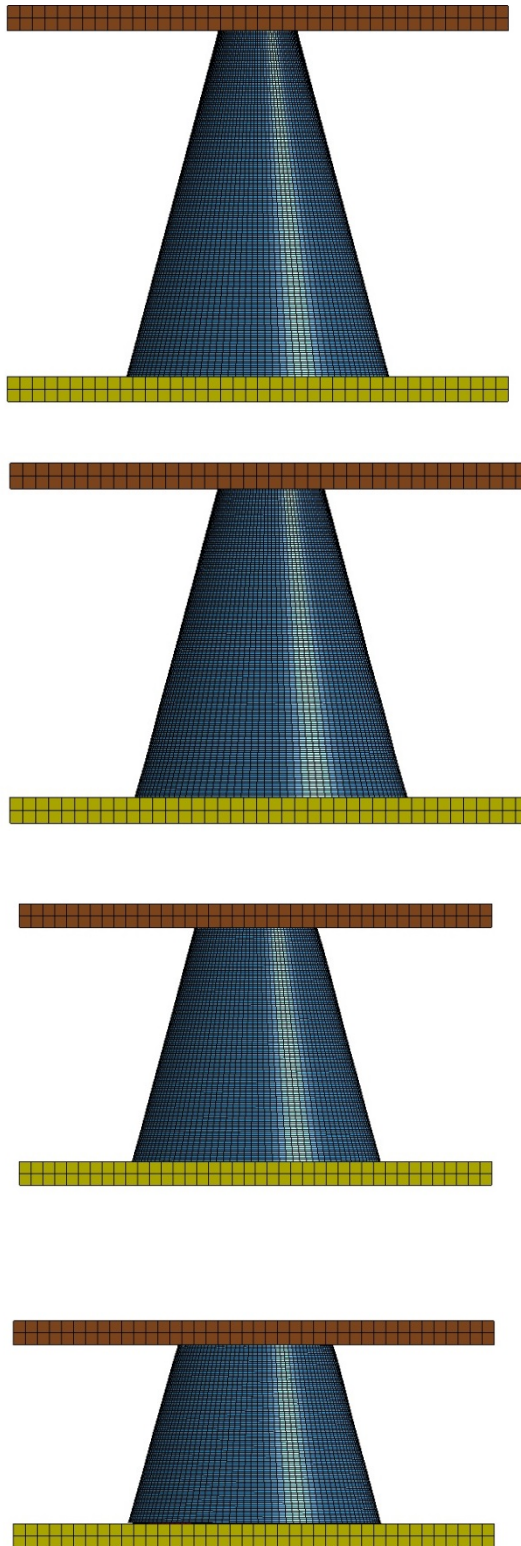
Τύπος	Μήκος συμπίεσης	Αρχικό μέγιστο φορτίο	Μέσο φορτίο	Ολική απορροφούμενη ενέργεια
Πειραματικό	63,5mm	28,39 kNt	6,39 kNt	405,85 J
Αριθμητικό	63,5mm	35 kNt	16,22 kNt	1030 J

Πίνακας 5.43

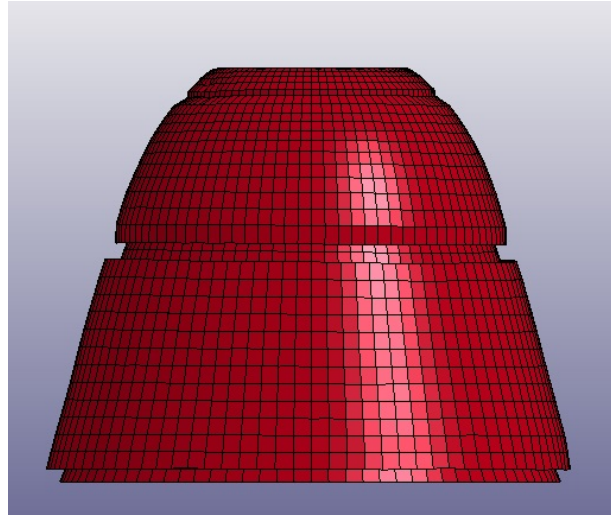
- Βασική διαφορά στα διαγράμματα αποτελεί η διαφορετική συμπεριφορά μετά την μεγάλη θραύση του σύνθετου κελύφους όπου στην προσομοίωση οι μετρήσεις εξακολουθούν να κουβαλάνε το φορτίο σε αρκετά υψηλότερη τιμή με μία διακύμανση από αυτήν των πειραματικών
- Παρατηρούμε ότι η καμπύλη που προέκυψε από την αριθμητική προσομοίωση ξεκινά σχηματίζοντας ένα τοπικό μέγιστο. Αυτό οφείλεται στην τέλεια γεωμετρική συμμετρία που είχε το αριθμητικό μας μοντέλο και αναπαριστά το στιγμιαίο φορτίο που μπορεί να αντέξει το κέλυφος.
- Οι αποκλίσεις στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις οφείλονται κυρίως σε μικροελαττώματα της κατασκευής, αδυναμίες του κώδικα αλλά και σε παραδοχές που έγιναν στην διαδικασία σχεδιασμού του δοκιμίου.
- Ξεχωρίζει μία συνεχώς πριονωτή ταλάντωση του φορτίου μικρού εύρους και υψηλής συχνότητας, λόγω κυρίως των μηχανισμών μικροθραύσεων που αναπτύσσονται στο εσωτερικό των δοκιμίων.
- Κύριο χαρακτηριστικό της αστοχίας και του τρόπου κατάρρευσης των λεπτότοιχων κελυφών από σύνθετο υλικό όταν καταπονούνται αξονικά είναι η θραύση και ο θρυμματισμός του υλικού τους λόγω της μεγάλης ψαθυρότητας που εμφανίζει,
- Στην περίπτωση μας, ο τρόπος κατάρρευσης που χαρακτηρίζεται από εκτεταμένη ψαθυρή θραύση η οποία οδηγεί σε καταστροφική αστοχία του κελύφους. Η αστοχία στα κωνικά κελύφη αναγνωρίζεται από την ανάπτυξη μιας ελικοειδούς διαμήκους ρωγμής διαδιδόμενης στην περιφέρεια του κελύφους.

Οι προκλήσεις που αντιμετωπίζουμε στην ακριβή προσομοίωση της θλίψης σύνθετου δοκιμίου βρίσκονται στην επακριβώς αναπαραγωγή των φυσικών μεθόδων αστοχίας του πραγματικού μοντέλου. Για αυτό και η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η 'trial and error' δηλαδή πειραματιζόμαστε με διάφορες παραμέτρους που είναι πιθανόν να συνεισφέρουν στο καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Στο συγκεκριμένο δοκίμιο δοκιμάσαμε να εισάγουμε την εντολή που βρίσκεται στην καρτέλα των υλικών και ονομάζεται MAT_ADD_EROSION. Κατά την εκτέλεση της δοκιμής θλίψης εμφανίζονταν κάποια πεπερασμένα στοιχεία του αφρού που δέχονταν μεγάλες πιέσεις και έτσι ο αφρός κατέληγε να αστοχήσει και να διακοπεί το πρόγραμμα. Με την βοήθεια της εντολής αυτής όταν ένα πεπερασμένο φτάσει αυτήν την μέγιστη τάση που ορίζουμε εμείς αυτομάτως διαγράφεται και το πρόγραμμα συνεχίζει να τρέχει.

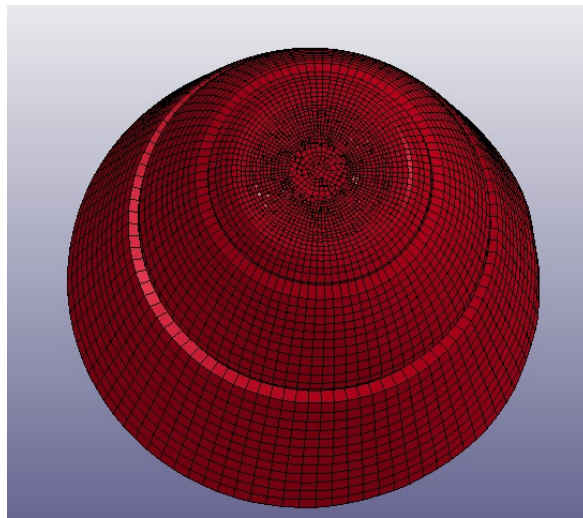
Δοκίμιο 1^ο με την παράμετρο MAT_ADD_EROSION



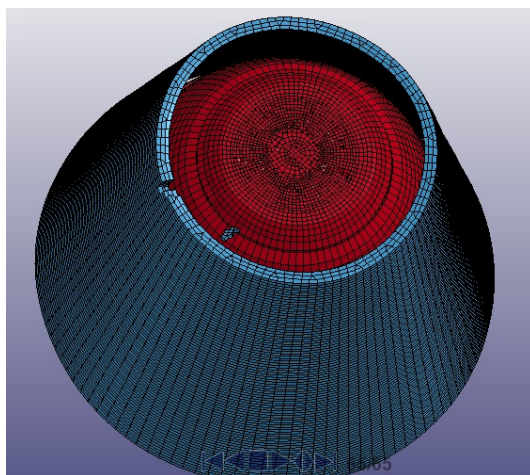
Σχήμα 5.44: Εικόνες από την δοκιμή θλίψης του 1^ο δοκιμίου με MAT_ADD_EROSION



Σχήμα 5.45: Εικόνα του συμπιεσμένου αφρού με MAT_ADD_EROSION

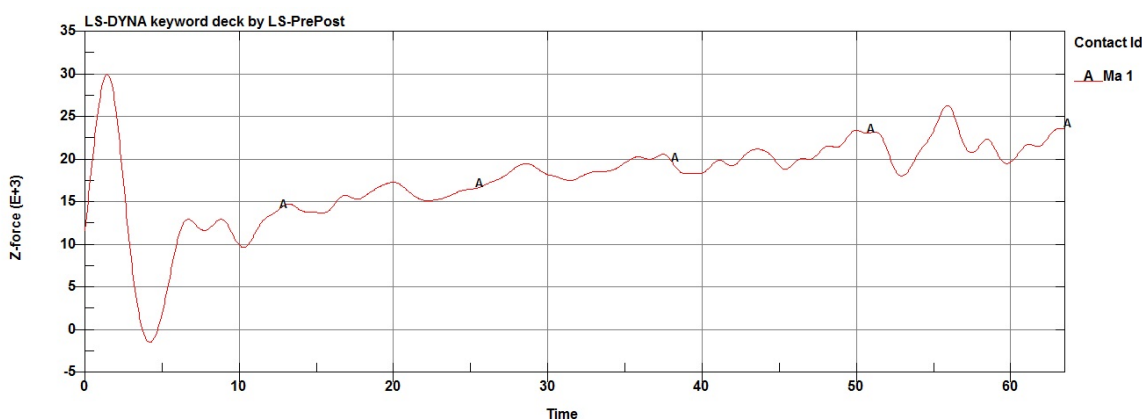


Σχήμα 5.46: Άνω όψη του συμπιεσμένου αφρού



Σχήμα 5.47: Άνω όψη του συμπιεσμένου δοκιμίου

Από τις εικόνες που αφορούν την συμπίεση του αφρού μεμονωμένα παρατηρούμε ότι σε σύγκριση με την προηγούμενη προσομοίωση με την εντολή MAT_ADD_EROSION έχουμε μία πιο ομαλή παραμόρφωση του αφρού και πιο κοντινή στην πραγματική εικόνα αν και φαίνεται καθαρά η σειρά των πεπερασμένων στοιχείων που έχουν διαγραφεί. Ας δούμε και πως διαφέρει αυτή η προσομοίωση ως προς το διάγραμμα φορτίου μετατόπισης και την απορροφούμενη ενέργεια.



Σχήμα 5.48: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης για το 1^ο δοκίμιο με mat_add_erosion

Σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα:

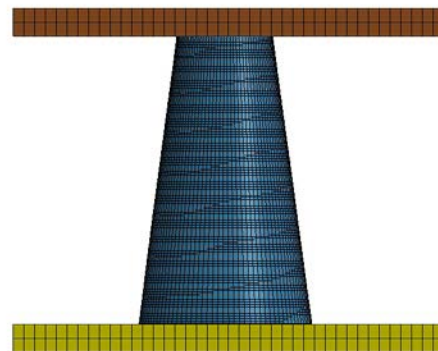
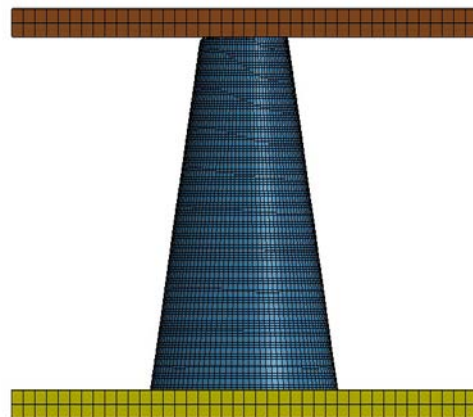
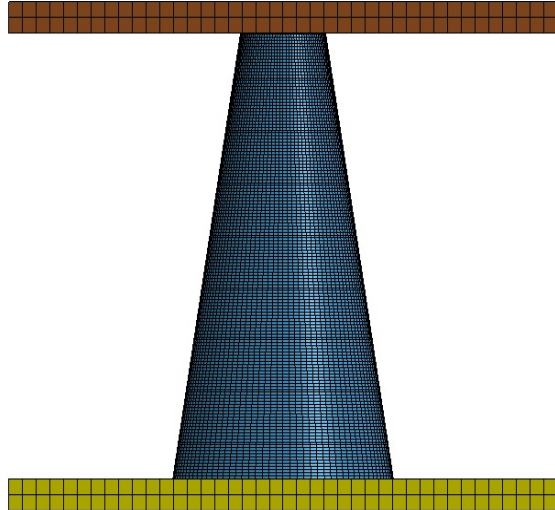
Τύπος	Μήκος συμπίεσης	Αρχικό μέγιστο φορτίο	Μέσο φορτίο	Ολική απορροφούμενη ενέργεια
Πειραματική	63.5mm	28.39 kNt	6.39 kNt	405.85 J
Αριθμητική με mat_add_erosion	63.5mm	30 kNt	17.6 kNt	1120 J

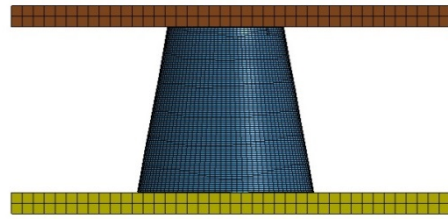
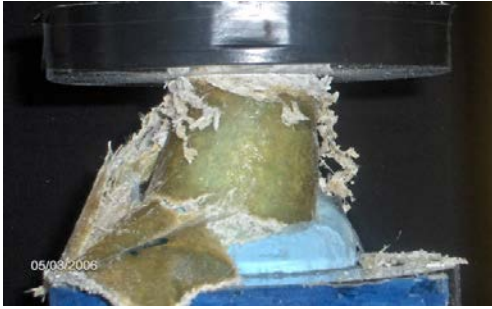
Πίνακας 5.49

Βλέπουμε ότι η μορφή της κατάρρευσης σε αυτήν την περίπτωση δεν συμφωνεί απόλυτα με την αντίστοιχη της πειραματικής διάταξης αφού ο κώδικας LS-DYNA δεν δύναται να λάβει υπόψη του τυχόν μικροελαττώματα του δοκιμίου (ασυνέχειες, ασυμμετρίες)

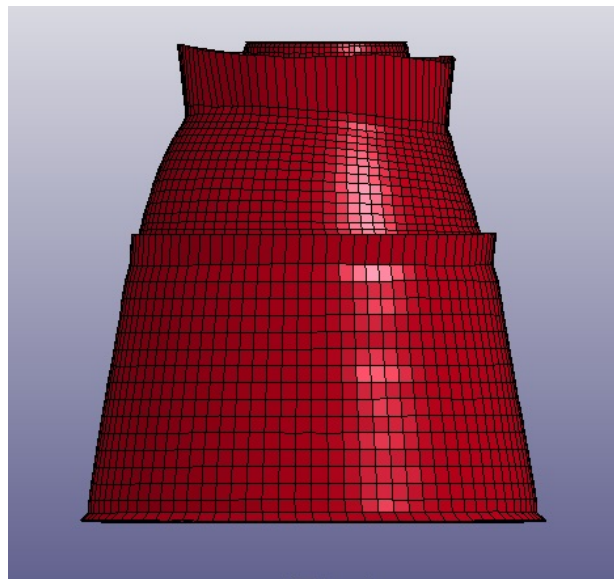
5.4.2 Δοκίμιο 2^ο

Παρακάτω εμφανίζονται οι διαδοχικές εικόνες που προδίδουν τον τρόπο κατάρρευσης συγκριτικά με την πειραματική διαδικασία που έχει προηγηθεί για τα συγκεκριμένα δοκίμια.

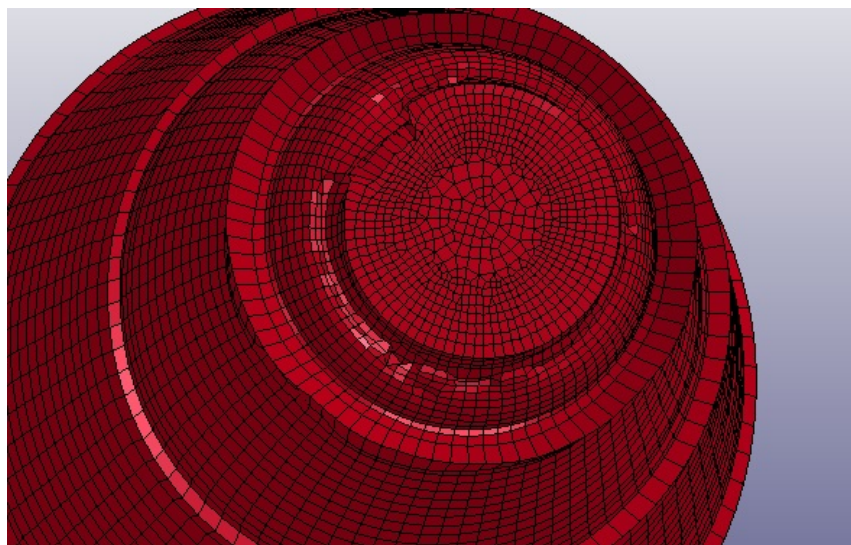




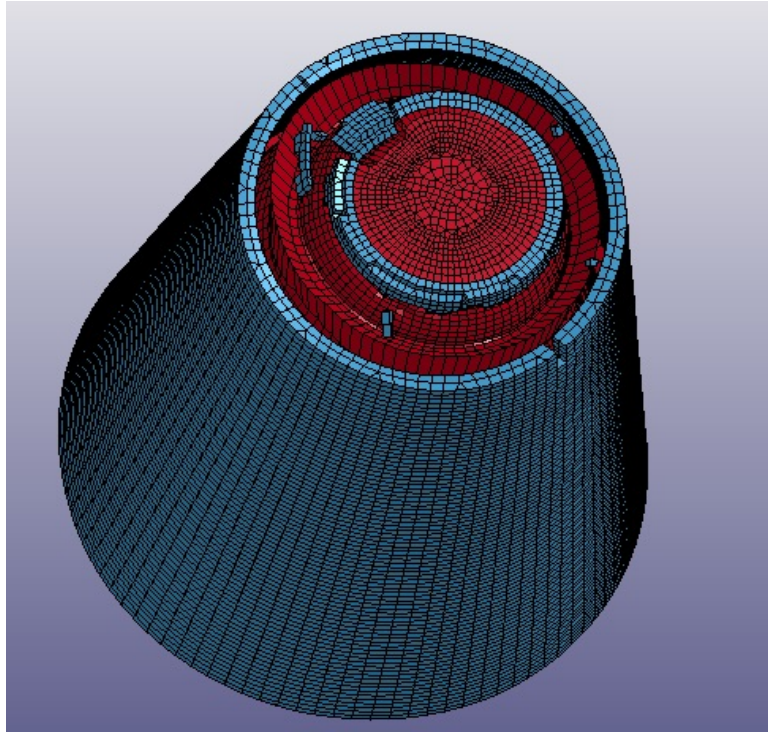
Σχήμα 5.50: Εικόνες από την συμπίεση του δοκιμίου σε πειραματική και αριθμητική διαδικασία



Σχήμα 5.51: Πλάγια όψη συμπιεσμένου αφρού

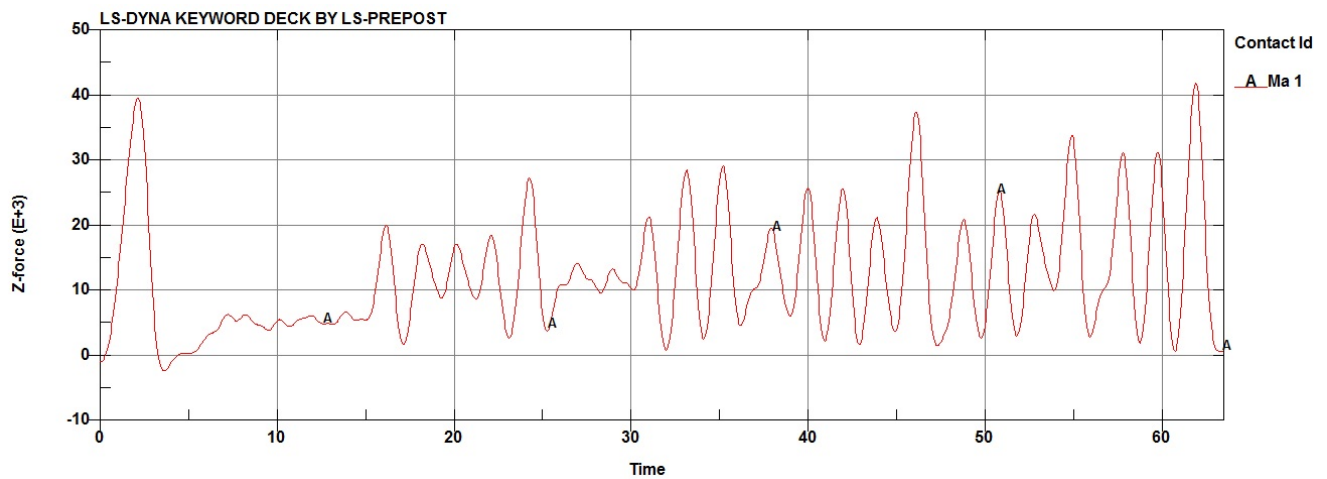


Σχήμα 5.52: Άνω όψη συμπιεσμένου αφρού

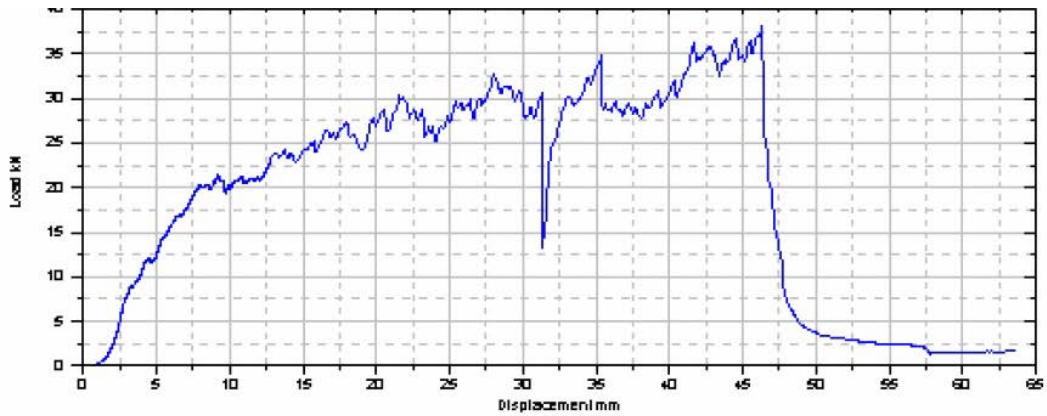


Σχήμα 5.53: Άνω όψη συμπιεσμένου δοκιμίου

Από τις δοκιμές που έγιναν και στο πείραμα και στην προσομοίωση προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα φορτίου – μετατόπισης τα οποία συγκρίνουμε ώστε να κρίνουμε κατά πόσο αποτελεσματική ήταν η προσομοίωση που κάναμε.



Σχήμα 5.54: Διάγραμμα φορτίου μετατόπισης προσομοίωσης



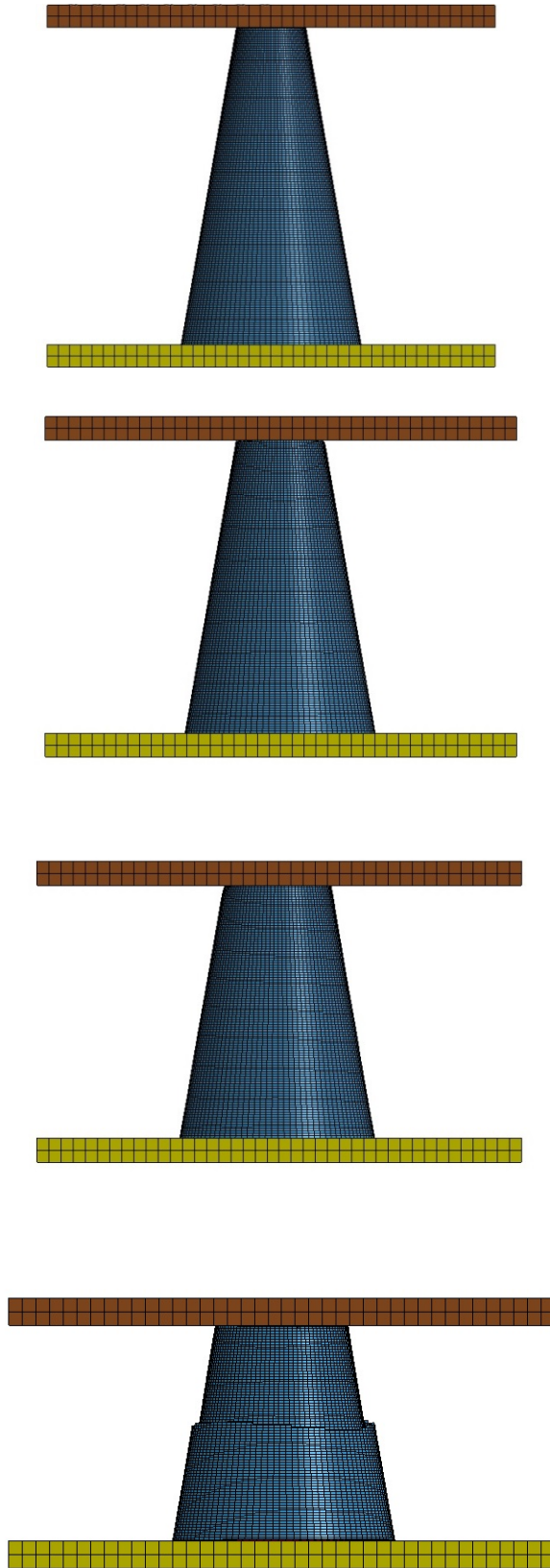
Σχήμα 5.55: Καμπύλη φορτίου μετατόπισης πειράματος

Σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα:

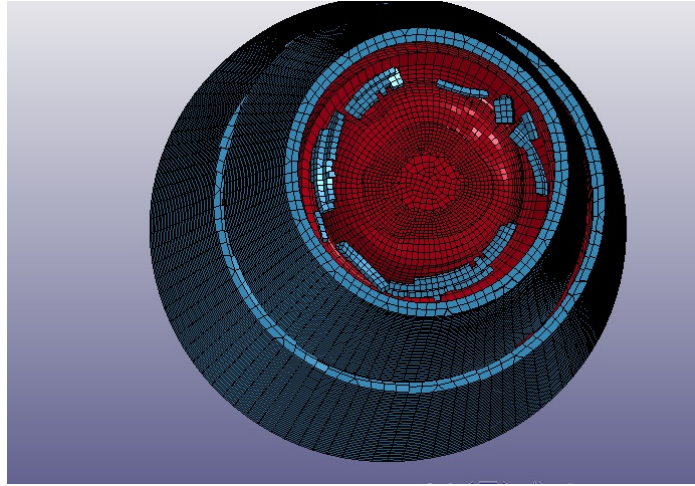
Τύπος	Μήκος συμπίεσης	Αρχικό Μέγιστο φορτίο	Μέσο φορτίο	Ολική απορροφούμενη ενέργεια
Πειραματικό	63,5mm	38,12 kNt	19,46 kNt	1235,7 J
Αριθμητικό	63,5mm	38 kNt	12,3 kNt	780 J

Πίνακας 5.56

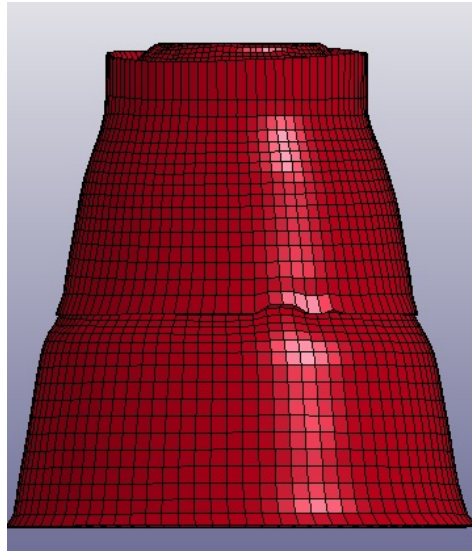
Από τις εικόνες του συμπιεσμένου αφρού παρατηρούμε κάποιες ατέλειες στην παραμόρφωση του οι οποίες ήταν και η αιτία για να σταματήσει αρκετές φορές το τρέξιμο του προγράμματος. Επίσης αυτή η εικόνα δεν είναι απόλυτα αντιπροσωπευτική της πραγματικής. Ακόμα παρατηρούμε ότι στην προσομοίωση το κέλυφος δεν φτάνει σε ολική θραύση με την χαρακτηριστική ελικοειδή ρωγμή. Δοκιμάζουμε λοιπόν να τρέξουμε τον κώδικα με την προηγούμενη μέθοδο δηλαδή με το επαυξημένο διάγραμμα σ-ε του αφρού.



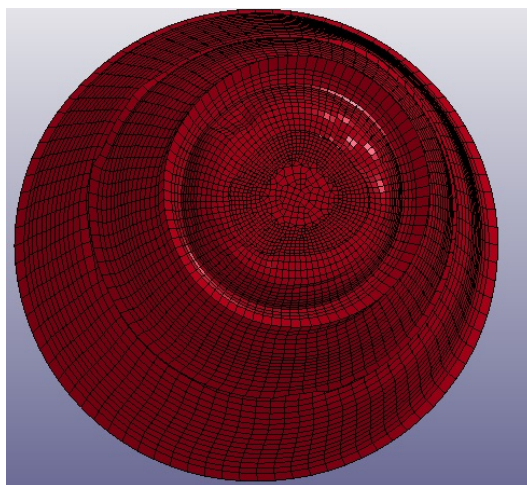
Σχήμα 5.57: Εικόνες από την συμπίεση του 2^{ου} δοκιμίου με παραλλαγή στο σ - ϵ του αφρού



Σχήμα 5.58: Άνω όψη συμπιεσμένου δοκιμίου



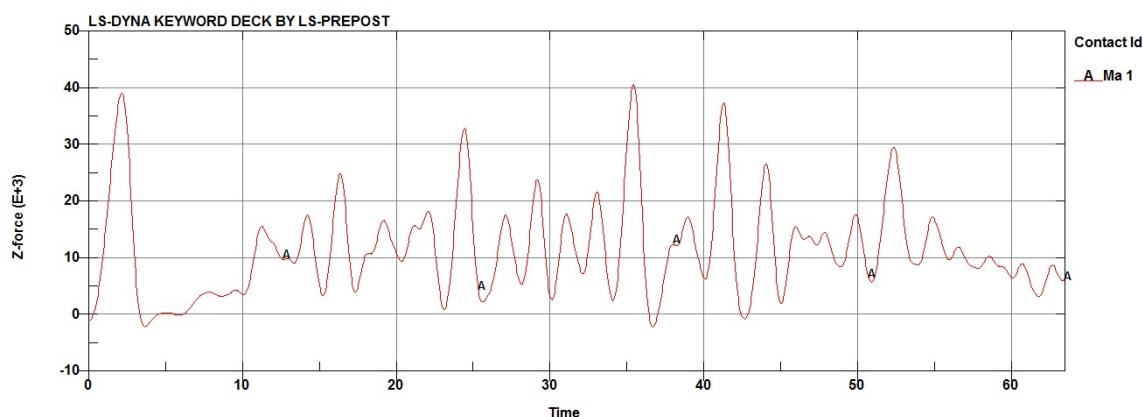
Σχήμα 5.59: Πλάγια όψη του συμπιεσμένου αφρού



Σχήμα 5.60: Άνω όψη του συμπιεσμένου αφρού

Παρατηρώντας τις εικόνες του δοκιμίου και του αφρού ξεχωριστά βλέπουμε ότι όντως η προσομοίωση αντικατοπτρίζει πιο ρεαλιστικά την πραγματικότητα και η συμπίεση του αφρού πια εμφανίζει λιγότερες ατέλειες, επίσης η κατάρρευση του δοκιμίου ακολουθεί τον ίδιο τρόπο του πειράματος εμφανίζοντας πλήρη αστοχία του κελύφους απλά σε διαφορετικό ύψος για τους λόγους που αναφέραμε και στο προηγούμενο δοκίμιο.

Προέκυψε το παρακάτω διαγράμματα φορτίου – μετατόπισης τα οποία συγκρίνουμε ώστε να κρίνουμε κατά πόσο αποτελεσματική ήταν η προσομοίωση που κάναμε:



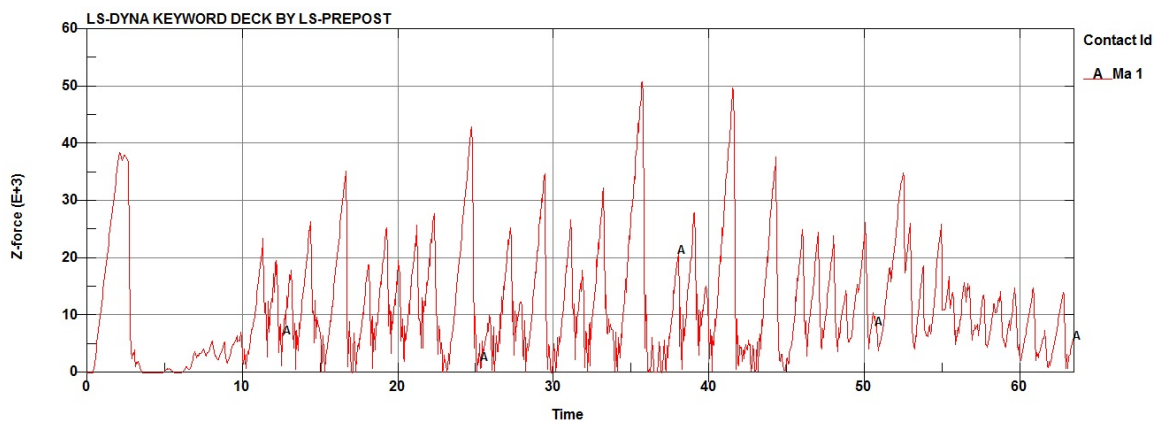
Σχήμα 5.61: Διάγραμμα φορτίου μετατόπισης για την προσομοίωση

Τύπος	Μήκος συμπίεσης	Μέγιστο φορτίο	Μέσο φορτίο	Ολική απορροφούμενη ενέργεια
Πειραματικό	63,5mm	38,12 kNt	19,46 kNt	1235,7 J
Αριθμητικό	63,5mm	38 kNt	11,8 kNt	750 J

Πίνακας 5.62

Σχετικά με τις τιμές δεν υπάρχει κάποια διαφορά στις δύο προσομοιώσεις. Ο λόγος για τον οποίο το μέσο φορτίο όπως και η ολική απορροφούμενη ενέργεια έχει μεγάλη απόκλιση είναι επειδή στο διάγραμμα φορτίου μετατόπισης που προκύπτει από το ls- dyna εμφανίζονται μεγάλες διακυμάνσεις του φορτίου το οποίο μηδενίζεται αρκετές φορές και κρατάει το μέσο φορτίο σε χαμηλά επίπεδα. Ουσιαστικά τα πεπερασμένα στοιχεία λόγω διαγραφής τους αναγκάζουν τις πλάκες να χάνουν στιγμιαία την επαφή με το δοκίμιο και έτσι μειώνεται και η συνολική απορροφούμενη ενέργεια και έχουμε μεγάλη απόκλιση.

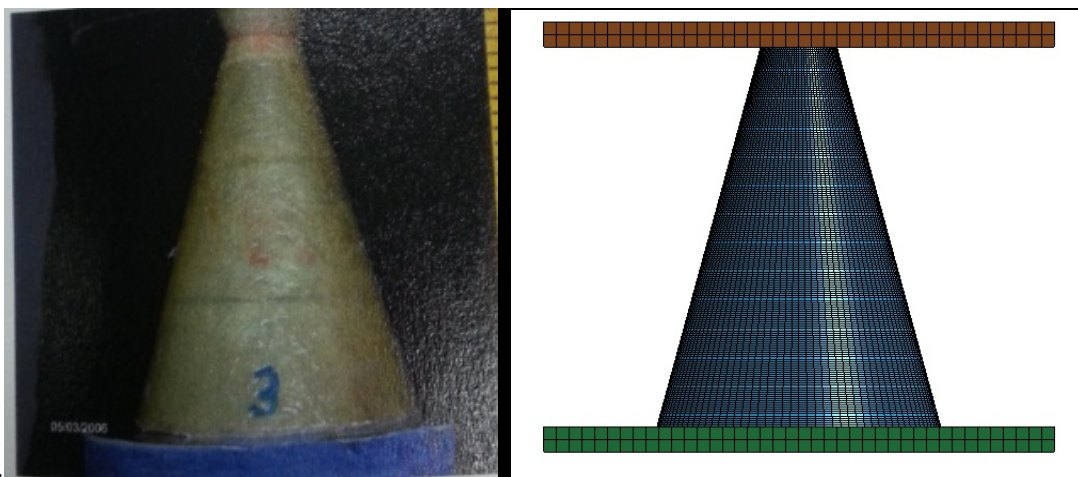
Αυτό γίνεται λόγω της πυκνότητας του πλέγματος η οποία δεν είναι τόσο πυκνή όσο θα έπρεπε αλλά είναι αναγκαίο να κρατήσουμε κάποια όρια γιατί αλλιώς χρειαζόμαστε τεράστια υπολογιστική ισχύ ώστε να τρέξει ο κώδικας σε ένα λογικό χρονικό όριο.

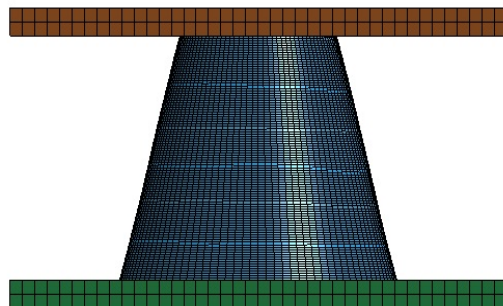
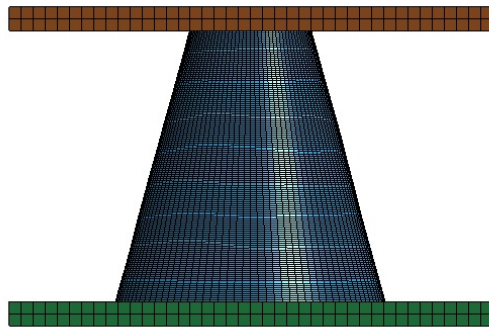
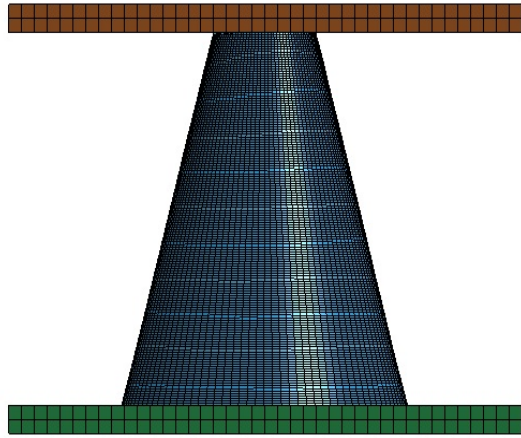


Σχήμα 5.63: Γράφημα φορτίου-μετατόπισης χωρίς φίλτρο. Εδώ φαίνεται η διακύμανση του φορτίου γύρω από το μηδέν.

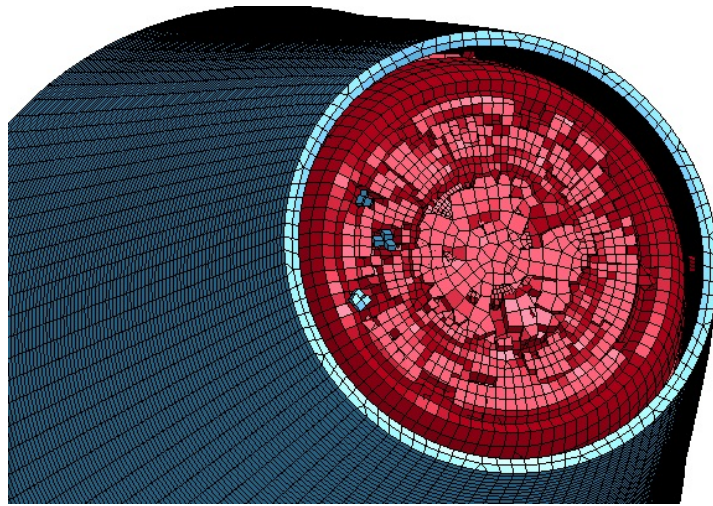
5.4.3 Δοκίμιο 3^ο

Παρακάτω εμφανίζονται οι διαδοχικές εικόνες που προδίδουν τον τρόπο κατάρρευσης και την σύγκριση με την δοκιμή προσομοίωσης:

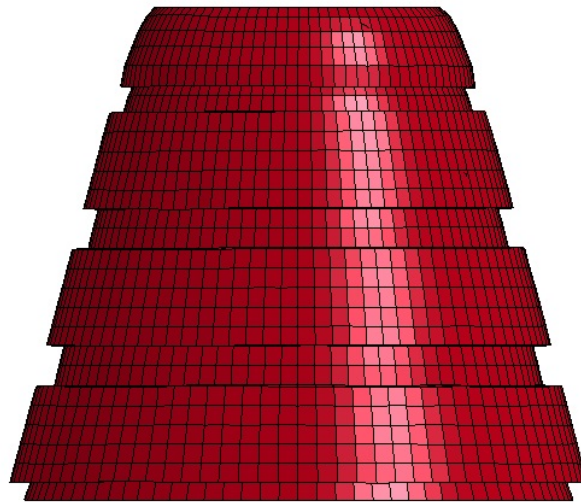




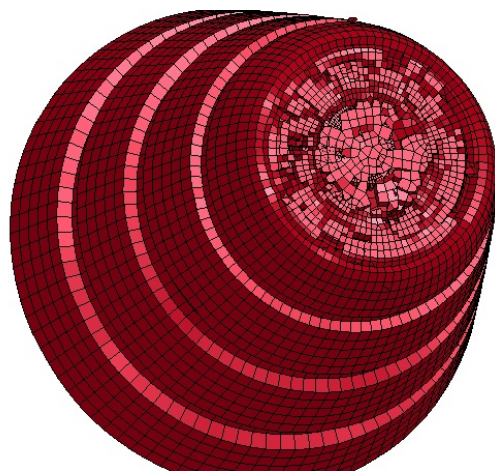
Σχήμα 5.64: Συγκριτικές εικόνες συμπίεσης δοκιμίου σε προσομοίωση και σε πείραμα



Σχήμα 5.65: Άνω όψη δοκιμίου σε συμπίεση



Σχήμα 5.66: Πλάγια όψη αφρού σε συμπίεση

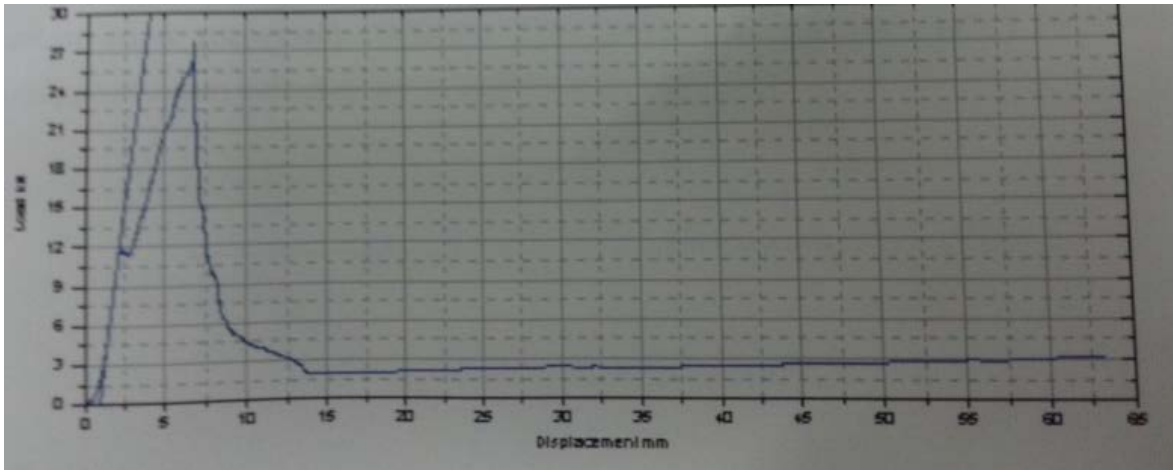


Σχήμα 5.67: Άνω όψη αφρού σε συμπίεση

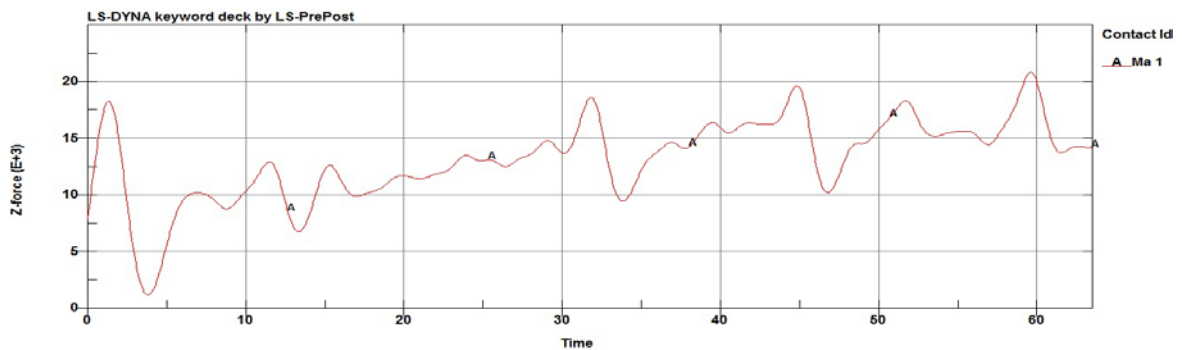
Από τις εικόνες του αφρού κατά την συμπίεση φαίνεται καθαρά ότι χρησιμοποιήσαμε την παράμετρο `mat_add_erosion` αφού βλέπουμε καθαρά σειρές πεπερασμένων στοιχείων που έχουν διαγραφεί και σε αυτό οφείλεται η μη ομαλή εικόνα συμπίεσης του αφρού.

Η κύρια διαφορά βρίσκεται στην αστοχία του κελύφους όπου δεν υφίσταται στην προσομοίωση λόγω του `mat_add_erosion` το οποίο ουσιαστικά αποτρέπει την άσκηση μεγάλης πίεσης του αφρού στο κέλυφος. Για αυτό τον λόγο θα τρέξουμε την ίδια προσομοίωση χωρίς αυτήν την πρόσθετη παράμετρο.

Τα διαγράμματα που προέκυψαν και από τις δύο διαδικασίες είναι τα ακόλουθα:



Σχήμα 5.68: Γράφημα φορτίου-μετατόπισης από το πείραμα



Σχήμα 5.69: Γράφημα φορτίου-μετατόπισης από την προσομοίωση

Εξαιτίας της διαφορετικής κατάρρευσης βλέπουμε ότι στην προσομοίωση συνεχίζει η καμπύλη να αυξάνει αφού το κέλυφος δεν έχει αστοχήσει τελείως. Μπορούμε όμως να συγκρίνουμε τις δύο καμπύλες μέχρι το σημείο που αστοχεί το κέλυφος στο πείραμα γιατί μέχρι εκεί έχουν παρόμοια συμπεριφορά.

Στο πίνακα που ακολουθεί φαίνονται τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις στο πείραμα και στο ls-dyna:

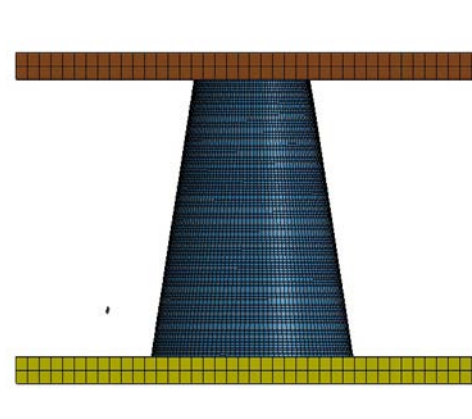
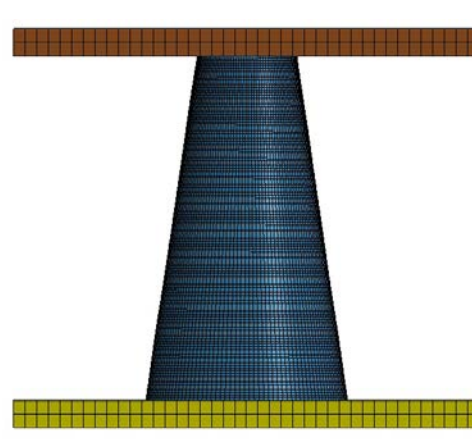
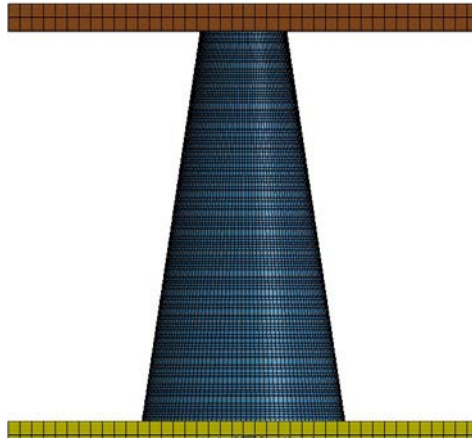
Τύπος	Μήκος συμπίεσης	Μέγιστο φορτίο	Μέσο φορτίο	Ολική απορροφούμενη ενέργεια
Πειραματικό	63,5mm	26,32 kNt	4,92 kNt	312,4 J
Αριθμητικό	63,5mm	22 kNt	13,4 kNt	850 J

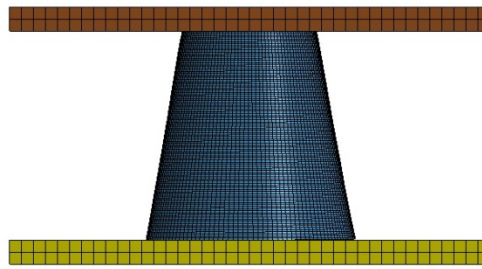
Πίνακας 5.70

Η μεγάλη απόκλιση εδώ οφείλεται κυρίως στο ότι το πραγματικό δοκίμιο αστόχησε αρκετά νωρίς προκαλώντας την μείωση του μέσου φορτίου και άρα της ενέργειας που θα απορροφήσει από αυτό το σημείο και έπειτα ενώ στην προσομοίωση δεν συνέβη κάτι τέτοιο διατηρώντας την απορροφούμενη ενέργεια σε υψηλά επίπεδα.

5.4.4 Δοκίμιο 4^ο

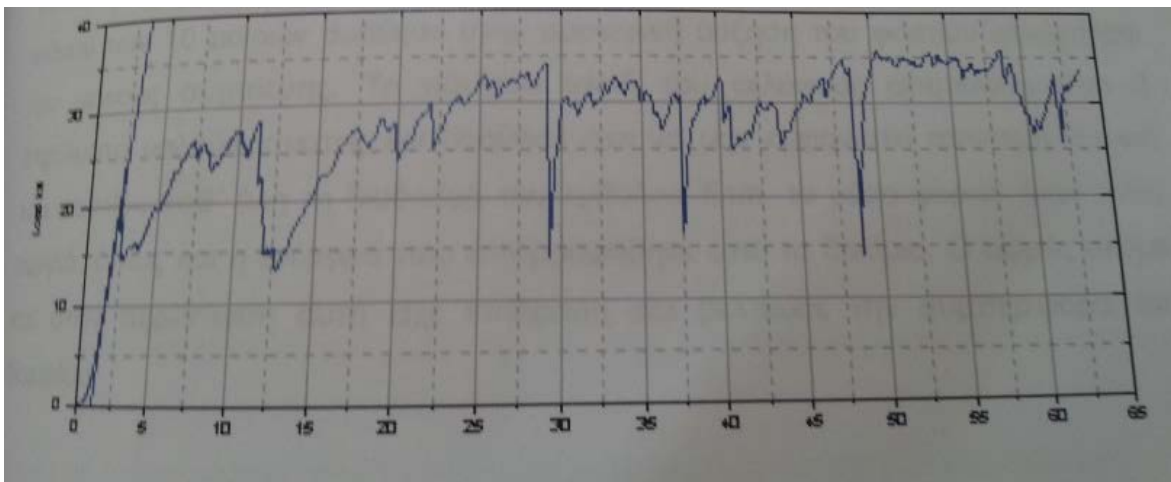
Παρακάτω εμφανίζονται οι διαδοχικές εικόνες που συγκρίνουν τον τρόπο κατάρρευσης του δοκιμίου σε πειραματικό και αριθμητικό επίπεδο:



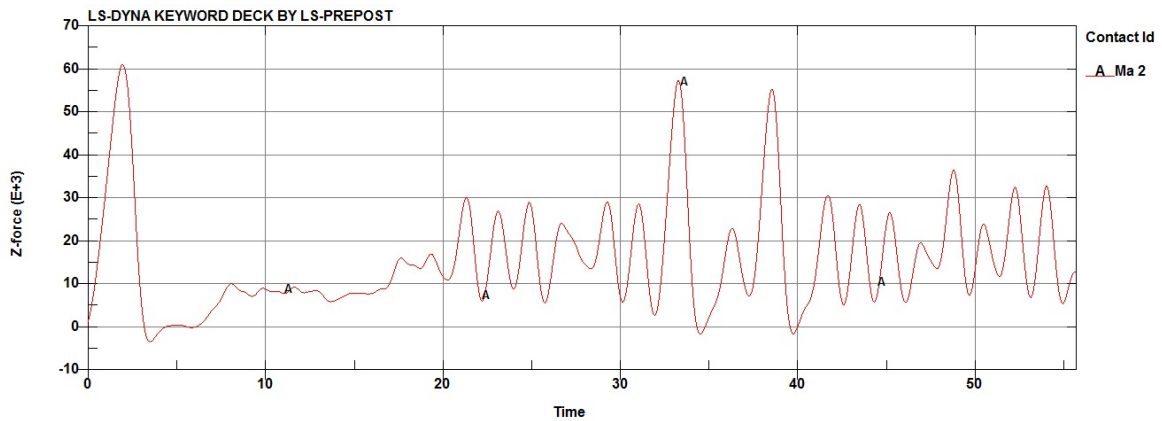


Σχήμα 5.71

Στην περίπτωση αυτή βλέπουμε ότι ο τρόπος κατάρρευσης είναι σταθερός και σταδιακός με συνεχή θρυμματισμό του υλικού χωρίς όμως το κέλυφος να φτάσει στην ολική θραύση του όπως ακριβώς γίνεται και στην προσομοίωση. Η ημιγωνία του κώνου των 10 μοιρών βοήθησε στην ομοιογενή αύξηση του φορτίου όπως και ότι αυτό το κέλυφος αποτελείται από 3 στρώματα υαλοφάσματος το οποίο αποτρέπει να εμφανιστεί απότομη πτώση του φορτίου καθ' όλη την διάρκεια της συμπίεσης. Το μέσο φορτίο ήταν υψηλό όπως και η ενέργεια που απορροφήθηκε από το δοκίμιο.



Σχήμα 5.72: Γράφημα φορτίου-μετατόπισης από την πειραματική διαδικασία



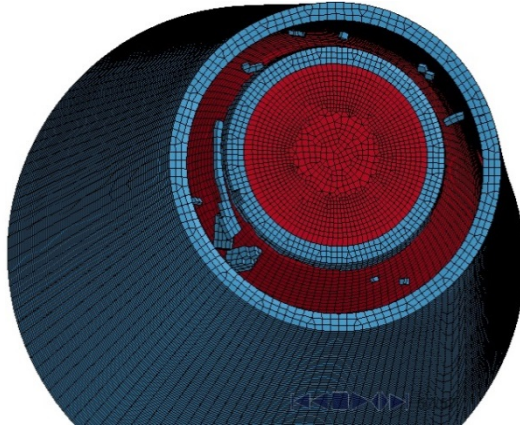
Σχήμα 5.73: Γράφημα φορτίου μετατόπισης από την προσομοίωση

Από τα δύο γραφήματα παίρνουμε και συγκρίνουμε τις παρακάτω τιμές:

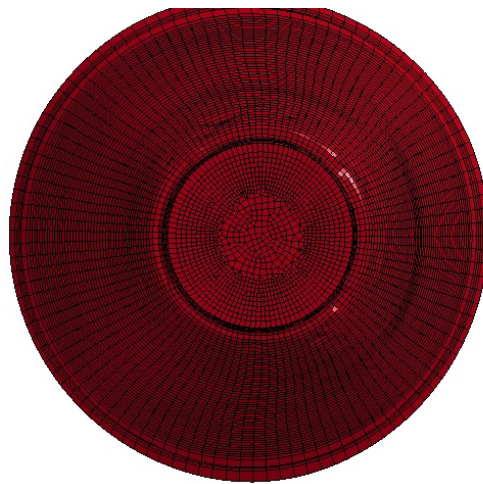
Τύπος	Μήκος συμπίεσης	Μέγιστο φορτίο	Μέσο φορτίο	Ολική απορροφούμενη ενέργεια
Πειραματικό	63,5mm	35,69 kNt	26,8 kNt	1701 J
Αριθμητικό	63,5mm	61 kNt	17,8 kNt	1050 J

Παρατηρούμε ότι στο 4^ο δοκίμιο συμφώνησε και ο τρόπος κατάρρευσης και οι τιμές δεν έχουν μεγάλη απόκλιση. Αν και το μέγιστο φορτίο της προσομοίωσης είναι μεγάλο λόγω της τέλει γεωμετρίας και επαφής κατά την εκκίνηση το μέσο φορτίο είναι πιο χαμηλό διότι κατά τον θρυμματισμό του κελύφους η άνω πλάκα χάνει στιγμιαία την επαφή με τα πεπερασμένα στοιχεία που διαγράφονται μηδενίζοντας το φορτίο. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί με ένα πυκνότερο πλέγμα που όμως χρειάζεται τεράστια υπολογιστική ισχύς για την επίλυση του.

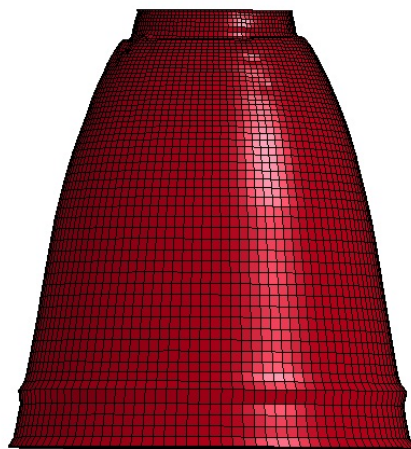
Στις παρακάτω εικόνες βλέπουμε επίσης την ομαλή συμπίεση του αφρού σε σχέση με τα προηγούμενα δοκίμια. Εδώ χρησιμοποιήσαμε την μέθοδο του επαυξημένου διαγράμματος σ-ε του αφρού για την αποφυγή αρνητικού όγκου στον αφρό.



Σχήμα 5.74: Άνω όψη δοκιμίου μετά την συμπίεση



Σχήμα 5.75: Άνω όψη του αφρού μετά την συμπίεση



Σχήμα 5.76: Πλάγια όψη αφρού μετά την συμπίεση

6. Συμπεράσματα

Η στατική αντοχή και η ακαμψία είναι χαρακτηριστικά των σύνθετων υλικών που μπορούν να υπολογιστούν επαρκώς με τις μεθόδους αριθμητικής προσομοίωσης, όμως η ανάλυση της κρούσης των οχημάτων στα οποία χρησιμοποιούμε σύνθετα υλικά απαιτεί όχι μόνο υπολογισμό της αντοχής αλλά και μία κατάλληλη πρόβλεψη του φορτίου μετατόπισης, της απορροφούμενης ενέργειας και την κατανομή του φορτίου σε όλα τα δομικά στοιχεία του οχήματος.

Οι προκλήσεις που αντιμετωπίζουμε στην ακριβή προσομοίωση της θλίψης του σύνθετου δοκιμίου βρίσκονται στην επακριβώς αναπαραγωγή των φυσικών μεθόδων αστοχίας του πραγματικού μοντέλου για αυτό και βασιζόμαστε στην μέθοδο δοκιμής-σφάλματος για την προσέγγιση καλύτερων αποτελεσμάτων.

Συγκεκριμένα, οι παρατηρήσεις που καταλήξαμε κατά την διάρκεια της προσομοίωσης παρουσιάζονται παρακάτω:

- Οι αλγόριθμοι επαφής σε σχέση με τους παραμέτρους προσαρμογής παίζουν ένα πολύ βασικό ρόλο στην τελική εικόνα του διαγράμματος φορτίου-μετατόπισης. Παρατηρήθηκε ότι στα περισσότερα μοντέλα επαφών του ls-dyna όπως το `automatic_surface_to_surface` έχουν πρόβλημα με το τελικό ποσό ενέργειας του συστήματος, επειδή η κινητική ενέργεια δεν αναλύεται κατάλληλα.
- Η μορφή της κατάρρευσης σε κάποιες περιπτώσεις δεν συμφώνησε απόλυτα με την αντίστοιχη της πειραματικής διάταξης. Εκτός από τα μικροελαττώματα του δοκιμίου που ο κώδικας δεν μπορεί να λάβει υπόψη δεν γνωρίζαμε και ακριβείς ιδιότητες του σύνθετου υλικού και έτσι περιοριστήκαμε στην επιλογή ενός συγκεκριμένου τύπου μοντελοποίησης του σύνθετου κελύφους το `mat_24`.
- Ακόμα μία αιτία που οδηγεί σε διαφορετικά διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης αποτελεί η ύπαρξη ατελειών στην επαφή δοκιμίου με έμβολο.

- Παρατηρούμε ότι η καμπύλη που προέκυψε από την αριθμητική προσομοίωση ξεκινά σχηματίζοντας ένα τοπικό μέγιστο. Αυτό οφείλεται στην τέλεια γεωμετρική συμμετρία που είχε το μοντέλο μας.
- Μετά την μετατόπιση των 30mm παρατηρούμε μία παράλληλη αύξηση των καμπυλών που οφείλεται στο γεγονός ότι η παραμόρφωση του αφρού πλησιάζει την μέγιστη τιμή της.
- Ο σχηματισμός των κυματώσεων στο μοντέλο αντιστοιχεί σε αυτούς του πραγματικού απλά η διαφορά είναι στην θέση της αστοχίας καθώς το μοντέλο ξεκινά την θραύση του.
- Αδυναμία των κελυφών αυτών να απορροφήσουν σημαντικά ποσά ενέργειας κατά την εξέλιξη του μηχανισμού κατάρρευσης
- Ο αφρός έχει επίδραση αυξάνοντας το αρχικό μέγιστο φορτίο
- Βασικό ρόλο παίζουν και οι κατασκευαστικές αδυναμίες του πραγματικού δοκιμίου που πιθανότατα εξανάγκασαν την πιο γρήγορη αστοχία του κελύφους σε σχέση με την αριθμητική προσομοίωση

7. Βιβλιογραφία – σχετικά άρθρα

➤ Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

1. LS-Dyna for crashworthiness of composite structures. Priyanjali Chatla, 2008, JNTU, India
2. Simulating laminated composites using LS-Dyna material model MAT54 part I: [0] and [90] ply single-element investigation. Bonnie wade, Paolo Feraboli, Morgan Osborne, Seattle
3. Prediction of structural response of FRP composites for conceptual design of vehicles under impact loading. 8th European LS-DYNA Conference, Strasbourg, 2011
4. Crashworthiness analysis with enhanced composite material models in LS-Dyna – Merits and limits. K. Schweizerhof, K. Weimar, Th. Munz, Th. Rottner, 1998, Michigan, Detroit
5. A.G. Mamalis *, D.E. Manolakos, M.B. Ioannidis, D.P. Papapostolou (2005). The static and dynamic axial collapse of CFRP square tubes: Finite element modelling

6. Hamidreza Zarei, Matthias Kroger , Henrik Albertsen (2007). An experimental and numerical crashworthiness investigation of thermoplastic composite crash boxes
7. A.G. Mamalis *, D.E. Manolakos, M.B. Ioannidis, D.G. Chronopoulos, P.K. Kostazos (2009). On the crashworthiness of composite rectangular thin-walled tubes internally reinforced with aluminum or polymeric foams: Experimental and numerical simulation
8. A.G. Mamalis, D.E. Manolakos, G.A. Demosthenous and M.B. Ioannidis (1996). The static and dynamic axial crumbling of thin walled fiberglass composite square tubes
9. FARLEY G.L (1983). Energy absorption of composite materials
10. FARLEY G.L (1986). Effect of fiber and matrix maximum strain rate on the energy absorption of composite materials
11. FARLEY G.L (1991). The effects of crushing speed on the energy absorption capability of composite tubes
12. FARLEY G.L (1986). Effect of specimen geometry on the energy absorption of composite materials
13. ASHBY M.F (1992). Materials selection in mechanical design
14. BERRY J. AND HULL D. (1984). Effect of speed on progressive crushing of epoxy-glass cloth tubes
15. CARRISON L.A AND PIPES R.B. (1987). Experimental characterization of advanced composite materials

16. S.J BEARD AND CHANG F.K (2002). Energy absorption of braided composite tubes
17. AGARWAL B.D AND BROUTMAN L.J. (1990). Analysis and performance of fiber composites
18. W. JOHNSON, P.D. SODEN and S.T.S. AL-HASSANI, Inextensional collapse of thin walled tubes under axial compression, (1977)
19. W. ABRAMOVICZ and T. WIERZBICKI, A kinematic approach to crushing of shell structures, (1979)
20. J.M ALEXANDER, An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading, (1960)
21. P. H. THORNTON, H. F. MAHMOOD AND C. L. MAGEE, Energy absorption by structural collapse. Structural crashworthiness, (1983)
22. H. F. MAHMOOD AND A. PALUZYNY, Design of thin walled columns for crash energy management- their strength and mode of collapse, (1981)
23. AGARWAL B.D AND BROUTMAN L.J. (1990), Analysis and performance of fiber composites
24. MAMALIS A.G., MANOLAKOS D.E., DEMOSTHENOUS G.A AND IANNIDIS M.B (1996), Analysis of failure mechanisms observed in axial collapse of thin walled circular fiberglass composite tubes
25. MAMALIS A.G., MANOLAKOS D.E., DEMOSTHENOUS G.A AND IANNIDIS M.B (1994), Crashworthy characteristics of fiberglass composite automotive frame rails subjected to axial collapse and bending

26. MAMALIS A.G., MANOLAKOS D.E., DEMOSTHENOUS G.A AND IANNIDIS M.B (1996), On the bending of automotive fiber-reinforced composite thin-walled structures

27. MAMALIS A.G., MANOLAKOS D.E., DEMOSTHENOUS G.A AND IANNIDIS M.B (1992), Collapse of thin walled composite sections subjected to high speed axial loading

➤ **Ελληνική βιβλιογραφία**

1. Αξονική καταπόνηση κελυφών λεπτού πάχους κυκλικής διατομής ενισχυμένων εσωτερικά με αφρό. Ερωτόκριτος Γκαγκαδέλης, Αθήνα, 2008, Διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π

2. Καταστροφική καταπόνηση κελυφών λεπτού πάχους ορθογωνικής διατομής ενισχυμένων εσωτερικά με αφρό. Πειραματική και αριθμητική προσομοίωση. Στυλιανός Κουτρομπάκης, Αθήνα, 2005, Διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π

3. http://www.redstar.gr/Foto_red/Other/Compozit.html

4. Επίδραση της διαμόρφωσης άκρου κυλινδρικών κελυφών λεπτού πάχους στην ικανότητα απορρόφησης ενέργειας σε αξονική καταπόνηση: Πειραματική και αριθμητική προσομοίωση. Γεώργιος Διαλεκτός, Αθήνα, 2008, Διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π

5. Αξονική κατάρρευση κυλινδρικών κελυφών, μελέτη της επίδρασης κυκλικών ατελειών στα τοιχώματα του κελύφους: Πειραματική και αριθμητική προσομοίωση. Λεωνίδα Φεύγας, Αθήνα, 2007, Διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π

6. Συστήματα απορρόφησης ενέργειας: Ανάλυση κατασκευών λεπτού πάχους από σύνθετα υλικά. Πρωτεσίλαος Κωστάζος, Αθήνα, 2011, Διδακτορική διατριβή Ε.Μ.Π

7. Στατική και δυναμική παραμόρφωση κατασκευών λεπτού πάχους από σύνθετα υλικά, Γιώργος Δημοσθένους, Αθήνα, 1996, Διδακτορική διατριβή Ε.Μ.Π