



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη της επίδρασης μικρο-
ρηγματώσεων στο άκρο συνθέτου
κελύφους λεπτού πάχους με
εσωτερικό πυρήνα πολυμερικού
αφρού έναντι κρουστικής
καταπόνησης

Συγγραφή:

ΚΟΥΒΑΡΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

Επιβλέπων καθηγητής: Μανωλάκος Δημήτριος
ΑΘΗΝΑ (Φεβρουάριος 2020)

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ABSTRACT	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο	5
1.1 Εισαγωγή	5
1.2 Θεωρητικό υπόβαθρο	5
1.3 Ίνες γυαλιού	8
1.4 Παραγωγή ινών γυαλιού	10
1.5 Χρήσεις σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες γυαλιού	11
1.6 Ταξινόμηση των υαλονημάτων	12
1.7 Μηχανισμοί αστοχίας	14
1.7.1 Προοδευτική σύνθλιψη	14
1.7.2 Μηχανισμός κατάρρευσης μέσου μήκους	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο	15
2.1 Πειραματική διαδικασία	16
2.2 Πειραματικός εξοπλισμός - Πρέσα INSTRON 4482	16
2.3 Γεωμετρικά στοιχεία δοκιμών	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο	21
3.1 Εισαγωγή	21
3.2 Δοκίμιο 1	21
3.3 Δοκίμιο 2	23
3.4 Δοκίμιο 3	26
3.5 Δοκίμιο 4	29
3.6 Δοκίμιο 5	31
3.7 Δοκίμιο 6	34
3.8 Δοκίμιο 7	36
3.9 Δοκίμιο 8	39
3.10 Δοκίμιο 9	41
3.11 Δοκίμιο 10	44
3.12 Δοκίμιο 11	47
3.13 Δοκίμιο 12	49
3.14 Δοκίμιο 13	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο	53
4.1 Μελέτη αποτελεσμάτων	53
4.2 Συνολικά αποτελέσματα	53
4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων για δοκίμια με πυρήνα αφρού και χωρίς πυρήνα αφρού	56

4.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων για επίδραση γεωμετρίας εγκοπών	59
4.5 Συμπεράσματα	62
4.5.1 Γενικές παρατηρήσεις - συμπεράσματα	62
4.5.2 Αποτελέσματα σχετικά με την επίδραση των εγκοπών.....	67
4.5.3 Αποτελέσματα σχετικά με την επίδραση του αφρού στον πυρήνα.....	68
4.5.4 Συμπεράσματα σχετικά με την διασπορά των αποτελεσμάτων – μελλοντική μελέτη..	69
4.6 Φωτογραφικό υλικό δοκιμίων μετά την ολοκλήρωση του πειράματος	70
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	75

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η συμπεριφορά κατά την δυναμική θλίψη και οι τιμές των δεικτών crashworthiness, δέκα τριών δοκιμίων κατασκευασμένων από σύνθετο υλικό GFRP. Σε καθένα από αυτά τα δοκίμια δημιουργήθηκαν εγκοπές σε διαφορετικές γεωμετρίες στα άκρα τους, και σε κάθε ομάδα δοκιμίων τα οποία είχαν τις ίδιες εγκοπές, υπήρχε ένα δοκίμιο το οποίο είχε πυρήνα αφρού. Σκοπός της διπλωματικής ήταν η μελέτη της επίδρασης των ανωτέρω εγκοπών αλλά και της παρουσίας αφρού στον πυρήνα, στην συμπεριφορά των δοκιμίων κατά την θλίψη και στην μεταβολή των δεικτών crashworthiness.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στους δείκτες crashworthiness και παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο του πειράματος που εκτελέστηκε. Ακολούθως στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση της πειραματική διάταξης και των επιμέρους μηχανικών συστημάτων τα οποία την απαρτίζουν. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται παράθεση όλων των αποτελεσμάτων (διαγράμματα – πίνακες και φωτογραφίες) για το σύνολο των δοκιμίων που μελετήθηκαν. Τέλος στο τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας εξάγονται τα συμπεράσματα του πειράματος μέσω συγκρίσεων των αποτελεσμάτων.

ABSTRACT

TITLE : *The effect of micro cracking on the crashworthy ability of thin – walled composite tubes with polymer foam core*

In the present thesis, the behavior during dynamic compressive stress and also the values of the crashworthiness indices were studied, of thirteen specimens made of GFRP composite material. Each of these specimens had notches of different geometries at their ends, and in each set of specimens that had the same notches, there was one specimen which had a foam core. The purpose of the thesis was to study the effect of the geometry of the notches and the presence of foam on the core, to the behavior of the specimens during compression and to the alteration of values of the crashworthiness indices.

The first chapter introduces the crashworthiness indicators and presents the theoretical background of the experiment performed. The following chapter presents the experimental setup and the individual mechanical systems that made up it. The third chapter lists all the results (diagrams - tables and photographs) for all the samples studied. Finally, in the last chapter of this thesis, the conclusions of the experiment are drawn through comparisons of results.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

1.1 Εισαγωγή

Σύμφωνα με την ένωση Association for Safe International Road Travel (ASIRT), περίπου 1,25 εκατομμύρια άνθρωποι πεθαίνουν κάθε χρόνο λόγω αυτοκινητιστικών δυστυχημάτων, το οποίο μεταφράζεται κατά μέσο όρο σε 3.287 θανάτους την ημέρα. Εκτός του ανωτέρου στατιστικού στοιχείου αξίζει να αναφερθεί πως, μεταξύ 20 και 50 εκατομμυρίων ατόμων κάθε χρόνο τραυματίζονται σοβαρά ή και μένουν παράλυτοι [1].

Λόγω των υψηλών στατιστικών των συγκρούσεων σε όλο τον κόσμο, οι κύριες μεταφορικές βιομηχανίες (αεροδιαστημική, αυτοκινητοβιομηχανία και σιδηροδρομική βιομηχανία) αναζητούν μεθοδολογίες για τη βελτίωση του crashworthiness των οχημάτων το οποίο με την σειρά του θα μειώσει και τον αριθμό των ατυχημάτων.

Ως «Crashworthiness» νοείται η ικανότητα ενός οχήματος να προστατεύει τους επιβάτες από τραυματισμούς ή θανάτους σε περίπτωση απότομης σύγκρουσης. Αυτή η έννοια συνδέεται με την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας με ελεγχόμενους τρόπους αστοχίας [2].

Η ικανότητα Crashworthiness των αυτοκινήτων και άλλων μεταφορικών συστημάτων αποτελεί ζήτημα που αφορά την ασφάλεια και την επιβίωση των επιβατών άρα είναι ένα θέμα πολύ μεγάλης σημασίας το οποίο θα πρέπει συνεχώς να μελετάται και να βελτιώνεται.

1.2 Θεωρητικό υπόβαθρο

Η έννοια Crashworthiness συνίσταται σε διάφορους παράγοντες, όπως:

- Η ικανότητα του οχήματος να αποφύγει μια καταστροφή
- Η αντίδραση του οχήματος κατά τη διάρκεια και μετά το συμβάν σύνθλιψης
- Η κίνηση του επιβάτη εντός του οχήματος
- Οι ενδεχόμενοι τραυματισμοί κλπ.

Όλοι αυτοί οι παράγοντες αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους αλλά σε κάποιο βαθμό, μπορούν να μελετηθούν και ξεχωριστά. Σε μια σοβαρή σύγκρουση, το κινούμενο όχημα επιβραδύνεται απότομα, χτυπώντας ένα άλλο αντικείμενο ή το έδαφος.

Η παρακάτω σχέση παρουσιάζει την κινητική ενέργεια την οποία έχει οποιοδήποτε κινούμενο σώμα:

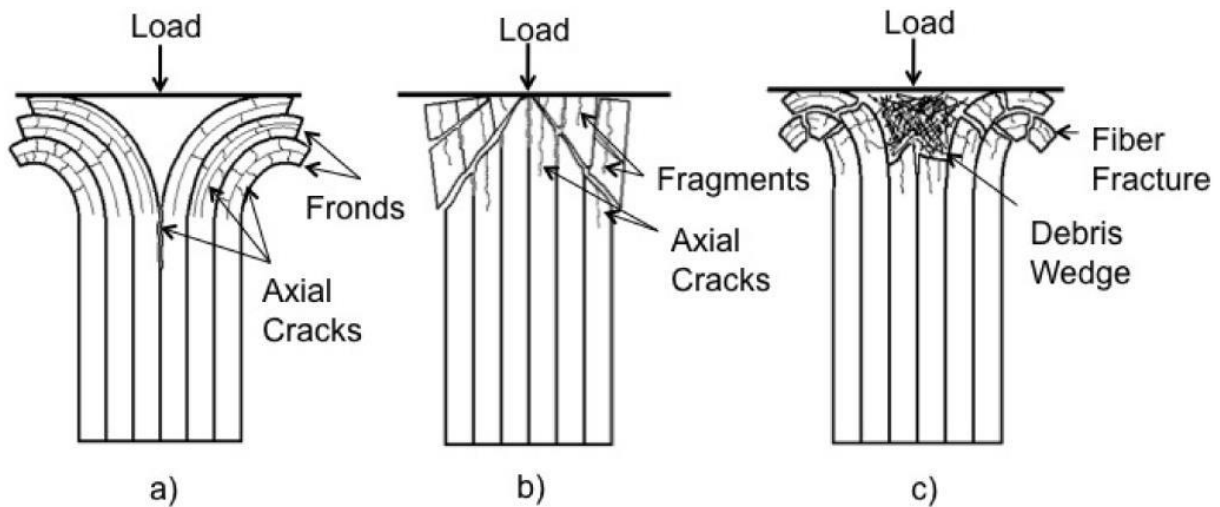
$$K \cdot E = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

Όπου $K.E.$ είναι η κινητική ενέργεια πριν από την πρόσκρουση, m είναι η μάζα του σώματος και v είναι η ταχύτητα πριν από την πρόσκρουση.

Η αρχική $K.E.$ πρέπει να μετατραπεί σε κάποια άλλη μορφές ενέργειας σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας.

Σχετικά με την κατανομή της κατάρρευσης σε κάποιο συμβάν κρούσης, το μεγαλύτερο μέρος της παραμόρφωσης θα πρέπει να συμβεί στα στοιχεία του οχήματος τα οποία «απορροφούν ενέργεια», τα οποία είναι το τμήμα του οχήματος το οποίο θρυμματίζεται. Οι επιβαίνοντες και άλλα ευάλωτα περιεχόμενα, όπως το καύσιμο, πρέπει να περιβάλλονται από μια ζώνη που ονομάζεται Survival Space ο οποίος δεν καταρρέει και στην οποία δεν υπάρχει διείσδυση.

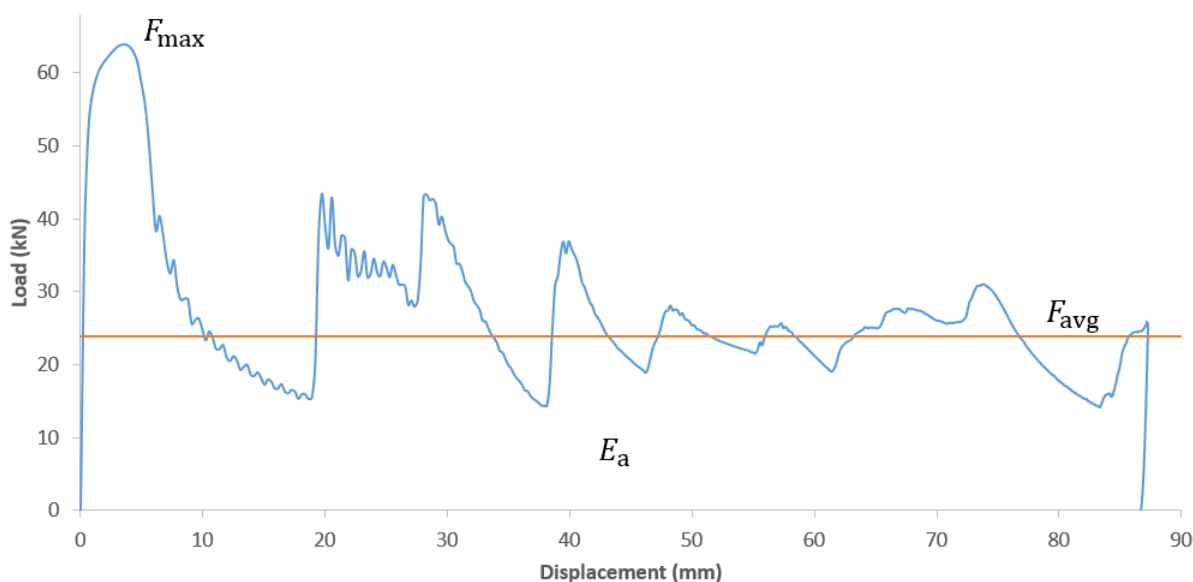
Η μελέτη Crashworthiness σύνθετων υλικών πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά στις αεροπορικές βιομηχανίες. Έχουν εκτελεστεί πολλά πειράματα για τη διερεύνηση του μηχανισμού βλάβης των σύνθετων υλικών υπό αξονική και πλάγια συμπίεση. Η συμπεριφορά σύγκρουσης των σύνθετων απορροφητών ενέργειας δεν είναι εύκολο να προβλεφθεί λόγω των σύνθετων μηχανισμών αποτυχίας που προκύπτουν από την φύση των σύνθετων υλικών. Αυτοί οι μηχανισμοί αποτυχίας μπορούν να εμφανιστούν σε απλή ή και σε συνδυασμένη μορφή κάτι το οποίο δυσκολεύει ακόμα περισσότερο τους υπολογισμούς [3].



Εικ. 1-1. Μορφές αστοχίας σύνθλιψης για σύνθετα υλικά: α) fibre splaying, b) fragmentation, and c) brittle fracture [4].

1.2 Χαρακτηριστικά Crashworthiness

Η μελέτη της ικανότητας των υλικών στην απορρόφηση ενέργειας μέσω της παραμόρφωσης ή ολοκληρωτικής τους θραύσης, βαθμονομείται βάσει μίας σειράς μεγεθών (crashworthiness characteristics). Τα εν λόγω μεγέθη προσδιορίζονται βάσει της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης, κατά την πειραματική δοκιμή των υλικών.



Διάγραμμα 1-1. Τυπική καμπύλη μετατόπισης φορτίου χαλύβδινου σωλήνα σε αξονική συμπίεση.

Τα μεγέθη που αναφέρθηκαν ανωτέρω είναι τα ακόλουθα :

➤ Ενέργεια απορρόφησης- Energy absorption (E_{abs})

Η ενέργεια απορρόφησης (E_{abs}) εκφράζει την συνολική ενέργεια που απορροφήθηκε από το υλικό μέσω πλαστικής παραμόρφωσης σε συνθήκες πρόσκρουσης. Η τιμή του εν λόγω μεγέθους, προκύπτει μέσω του υπολογισμού του εμβαδού που εμπεριέχεται κάτω από την καμπύλη ασκούμενου φορτίου-μετατόπισης του προς μελέτη υλικού.

$$E_{abs} = \int_0^x F(x)dx$$

Όπου: E_{abs} (Joule), F (KN), X (mm)

Για τον υπολογισμό αυτού του εμβαδού στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του τραπεζίου της αριθμητικής ολοκλήρωσης ως κάτωθι:

$$E_{abs} = \sum_2^n (P_i + P_{i-1}) \frac{(\delta_i - \delta_{i-1})}{2}$$

➤ Μέσο φορτίο (P mean)

Αντιστοιχεί, στον λόγο της ενέργειας απορρόφησης προς την μετατόπιση (βράχυνση) που υπέστη το δοκίμιο κατά την διάρκεια επιβολής φορτίου. Υψηλή τιμή του μέσου φορτίου, αντιστοιχεί σε μεγάλη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας για δεδομένη παραμόρφωση.

➤ Μέγιστο φορτίο- Peak crush force (PCF) ή Pmax

Αντιστοιχεί στην υψηλότερη τιμή φορτίου κατά την διάρκεια μίας δοκιμής.

➤ Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου Crush Force Efficiency (CFE)

Προκύπτει μέσω του λόγου του μέσου φορτίου (**P_{mean}**) προς το μέγιστο φορτίο (**P_{max}**). Στόχο αποτελεί, ο δείκτης ομοιομορφίας φορτίου να τείνει στο ένα. Ο λόγος εντοπίζεται στο ότι, μια πολύ υψηλή τιμή μεγίστου φορτίου (σε σχέση με το μέσο) σε πραγματικές συνθήκες πρόσκρουσης θα μπορούσε να αποβεί μοιραίο για τους επιβαίνοντες ενός οχήματος, ασχέτως με την συνολική ενεργειακή απορρόφηση της κατασκευής.

➤ Ειδική ενέργεια απορρόφησης-Specific Energy Absorption (SEA) ή W_s

Ορίζεται ως, ο λόγος της ενέργειας που απορροφά ένα υλικό (**E_{abs}**), κατά την κατάρρευσή του προς το τμήμα της καταρρέουσας μάζας (**m_c**) του υλικού που έχει αστοχήσει. Η μάζα **m_c** (gr) υπολογίζεται γνωρίζοντας την πυκνότητα του υπό μελέτη υλικού μέσω του τύπου:

$$m_c = \rho \times V$$

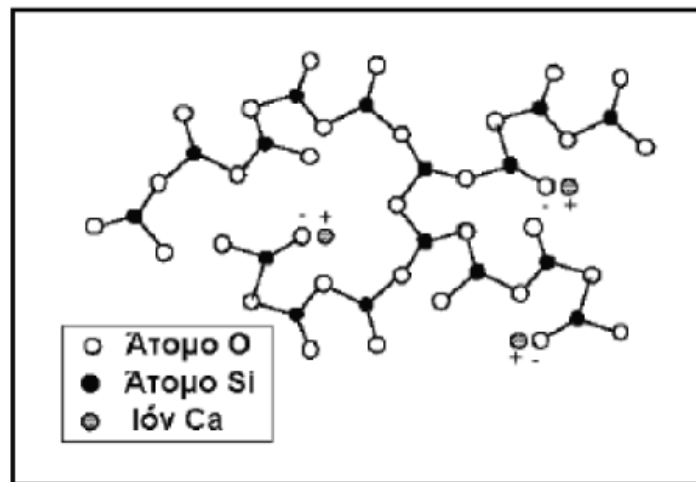
➤ Μέγιστη τάση θλίψης (σmax)

Αυτή η παράμετρος ορίζεται ως ο λόγος της αρχικής μέγιστης δύναμης **F_{max}** προς την καθαρή περιοχή εγκάρσιας τομής του σωλήνα.

1.3 Ίνες γυαλιού

Τα υαλονήματα εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στο εμπόριο το 1939. και η χρήση τους συνεχίζεται επιτυχώς μέχρι και σήμερα. Είναι από τους πλέον διαδεδομένους τύπους

ενισχυτικών ινών στα σύνθετα πολυμερικής μήτρας. Η δομική τους βάση είναι τα οξείδια πυριτίου, ασβεστίου, βορίου, αλουμινίου, κ.α.. Θεωρούνται από τα πιο φθηνά ενισχυτικά υλικά. Χαρακτηριστική δομή του γυαλιού παρουσιάζεται στην εικόνα 1-2 [5]. Οι ίνες γυαλιού παράγονται με μηχανικό τρόπο από ύαλο που τήκεται. Το κύριο χαρακτηριστικό της υάλου είναι ότι δεν παρουσιάζει ούτε πλήρως κρυσταλλική δομή, αλλά ούτε και ιδιότητες ρευστού. Ανάλογα με το είδος της εφαρμογής για το οποίο αναπτύχθηκαν, υπάρχουν έξι διαφορετικοί τύποι υαλονημάτων με μικρές διαφορές στη χημική τους σύσταση, τα τρία από τα οποία είναι τα κάτωθι.



Εικ. 1-2 Η άμορφη δομή του κοινού γυαλιού

- E-glass (E = electrical): Πρόκειται για τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα υαλονήματα με καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, αντοχή και δυσκαμψία, καθώς και πολύ καλή συμπεριφορά στην αλλαγή των καιρικών συνθηκών, αλλά με μέτρια αντοχή σε χημικά αντιδραστήρια.
- C-glass (C=corrosion): Υαλονήματα με υψηλή αντίσταση στη χημική διάβρωση, αλλά και με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τις ίνες τύπου E, από τις οποίες όμως είναι ακριβότερες.
- S-glass (S=stiffness): Ακριβότερο υλικό από το E-glass, αλλά με υψηλότερη δυσκαμψία και θερμική αντοχή. Χρησιμοποιείται κυρίως στην αεροπορική βιομηχανία.

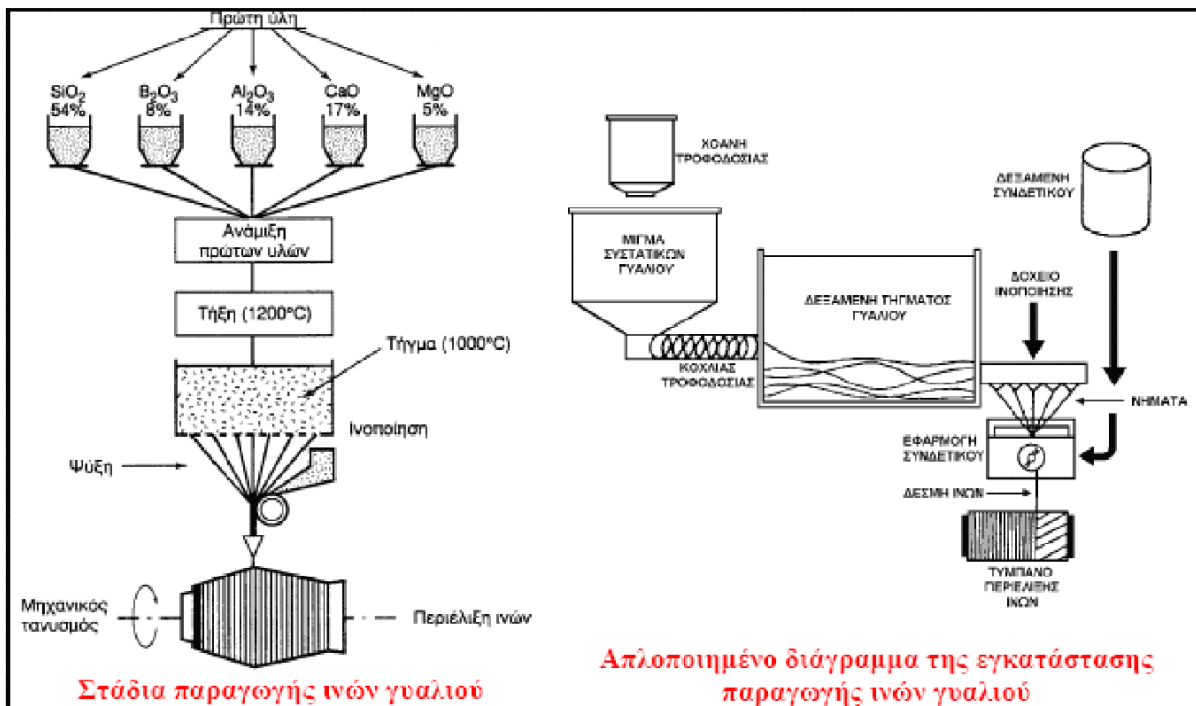
Οι δύο τύποι που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση κατασκευών είναι η ύαλος-E και η ύαλος-S. Αν και η ύαλος-S έχει μεγαλύτερη αντοχή και μέτρο ελαστικότητας από την ύαλο-E, λόγω του υψηλού της κόστους έχει η ύαλος-S περιορισμένη εφαρμογή σε σχέση με την ύαλο-E. Τα βασικά πλεονεκτήματα των υάλων αυτών είναι το σχετικά χαμηλό κόστος και η υψηλή αντοχή, ενώ στα κύρια μειονεκτήματα τους εντάσσονται το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας και η μικρή αντοχή τους έναντι φθοράς από τριβή (λύση της συνέχειας της επιφάνειάς τους). Όταν περιέχονται μεγάλα ποσοστά SiO₂ (99,5%) παρατηρούνται αυξημένες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων της ίνας και της μέγιστης θερμοκρασίας χρήσης του συνθέτου. Γι' αυτό το λόγο, σε ειδικές εφαρμογές, όπου απαιτούνται υψηλές μηχανικές ιδιότητες σε υψηλή θερμοκρασία,

χρησιμοποιούνται ίνες από 100% καθαρή πυριτία. Οι ίνες υάλου, αν και ανθεκτικές στους περισσότερους διαλύτες, αντιδρούν με ορισμένες αλκαλικές ενώσεις και ισχυρά οξέα. Η ύαλος παρέχει εξαιρετική θερμική και ηλεκτρική μόνωση. Τα φύλλα υάλου έχουν μικρότερη αντοχή σε κόπωση από τα φύλλα άνθρακα ή πολύ-αραμιδίου, αλλά μεγαλύτερη από τα περισσότερα μέταλλα. Όπως και ο άνθρακας, η ύαλος δεν παρουσιάζει ερπυσμό, είναι όμως ευπαθής σε διάβρωση. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω ιδιότητες επηρεάζονται σημαντικά από τις περιβαλλοντικές συνθήκες καθώς, και τη μήτρα που επιλέγεται για την παραγωγή του σύνθετου υλικού.

1.4 Παραγωγή ινών γυαλιού

Η παραγωγή ινών γυαλιού γίνεται με εκβολή τήγματος γυαλιού μέσα από μήτρα με διάτρητο πυθμένα (Εικ. 1-3) και περιλαμβάνει τις ακόλουθες φάσεις:

- Η πρώτη ύλη τοποθετείται σε δεξαμενή, όπου και τήκεται.
- Το τήγμα τροφοδοτείται σε σειρά κυλινδρικών δοχείων με διάτρητο πυθμένα (διάμετρος οπών 1-2 mm). Το γυαλί ρέει μέσα από τις οπές του πυθμένα υπό την επίδραση της βαρύτητας.
- Οι παραγόμενες ίνες συγκεντρώνονται σε ένα σύνολο και τανύζονται μηχανικά μέχρι να αποκτήσουν την κατάλληλη διάμετρο και ακολουθεί η ψύξη τους.
- Ακολουθώς οι ίνες διέρχονται από ιμάντα που επιβάλλει σε αυτές προστατευτικό λιπαντικό συνδετικό υλικό (binder) ή ειδικά κολλοειδή πρόσθετα (sizings) που δρουν ως προστατευτικές επικαλύψεις για την καλύτερη πρόσφυση στη διεπιφάνεια ινών-μήτρας,
- Τέλος περιτυλίσσονται ανά δέσμες γύρω από τύμπανο που περιστρέφεται και τα ρολά ινών υφίστανται ξήρανση πριν υποβληθούν σε οποιαδήποτε περαιτέρω διεργασία μορφής.



Εικ. 1-3: Διεργασίες παραγωγής υαλονημάτων [5]

1.5 Χρήσεις σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες γυαλιού

➤ Ναυπηγική: Ο τομέας της ναυπηγικής αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα ενός τομέα όπου τα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (GRP, glass reinforcement plastics) έχουν αντικαταστήσει σχεδόν πλήρως τα παραδοσιακά υλικά και ιδιαίτερα το ξύλο. Η χαμηλή πυκνότητα, η μεγάλη αντίσταση σε διάβρωση και η ευκολία παραγωγής ολόσωμων τμημάτων του σκάφους με χύτευση σε καλούπια, είναι οι παράμετροι που οδήγησαν στην ανάπτυξη μικρών βιομηχανιών κατασκευής σκαφών αναψυχής ενώ η μείωση του κόστους των επισκευών οδήγησε στην χρήση των υλικών αυτών στον ευρύτερο τομέα της ναυπηγικής [6].

➤ Μεταφορές Περίπου 60.000 tn/year GRP σε διάφορες μορφές χρησιμοποιούνται στις χερσαίες μεταφορές στη δυτική Ευρώπη, ενώ στις ΗΠΑ η αντίστοιχη συνολική κατανάλωση GRP στον τομέα των χερσαίων μεταφορών είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη. Ο λόγος της χρήσης των GRP στις χερσαίες μεταφορές οφείλεται κατά ένα μέρος στην μείωση του βάρους και άρα στην εξοικονόμηση ενέργειας (καυσίμων). Η χρήση ενισχυμένων πλαστικών πλαισίων για την κατασκευή αμαξωμάτων (αυτοκινήτων), περιορίζεται προς το παρόν σε μικρή κλίμακα και ιδιαίτερα για την κατασκευή αμαξωμάτων αγωνιστικών αυτοκινήτων. Εκτός όμως από την Παρασκευή αμαξωμάτων, τα GRP χρησιμοποιούνται και για την κατασκευή καμπινών στα φορτηγά αυτοκίνητα, στην κατασκευή προφυλακτήρων και σε πολλά άλλα εξαρτήματα της αυτοκινητοβιομηχανίας [6].

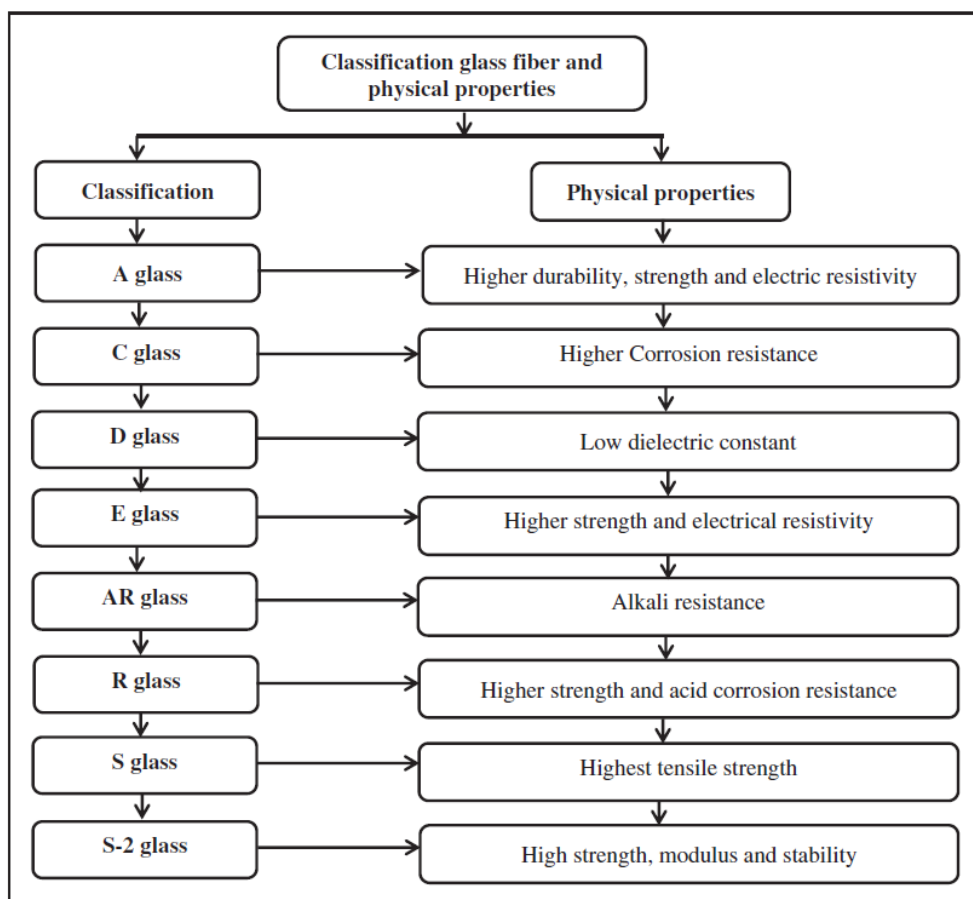
➤ Ηλεκτρικά είδη: Οι ίνες γυαλιού παράγονται σε διάφορους τύπους. Ένας από αυτούς είναι ο τύπος E-glass, όπου το πρόθεμα E αναφέρεται στον όρο electrical. Ο τύπος αυτός έχει

κατασκευασθεί ειδικά για ηλεκτρικές εφαρμογές και ιδιαίτερα για εφαρμογές όπου απαιτείται ηλεκτρική μόνωση. Έτσι, αυτός ο τύπος γυαλιού όταν αναμιχθεί με πλαστική μήτρα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή ηλεκτρικών εξαρτημάτων πολύπλοκου σχήματος που να είναι ηλεκτρικά μονωμένα. Τέτοια είδη είναι οι ηλεκτρικοί διακόπτες, οι ηλεκτρικοί διανομείς, οι υποδοχείς ηλεκτρικών λαμπτήρων και άλλα προϊόντα. Καλωδιακοί αγωγοί σταθερής διατομής και σχήματος για μόνωση μετασχηματιστών κατασκευάζονται από GRP με τη μέθοδο Pultrusion [7].

➤ Αντιδιαβρωτικές κατασκευές: Εφαρμογές στην παραγωγή κατασκευών ανθεκτικών σε χημική διάβρωση. Γενικά, οι εφαρμογές των GRP στην γεωργία και στην κατασκευή δεξαμενών και σωλήνων για βιομηχανικούς σκοπούς (χημική βιομηχανία) βασίζεται στον συνδυασμό του χαμηλού ειδικού βάρους και την αντίσταση σε διάβρωση του υλικού αυτού. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των GRP είναι η κατασκευή δεξαμενών και αναρροφητήρων για την αποθήκευση τοξικών χημικών ουσιών, σωλήνων για την μεταφορά νερού και αποχετευτικών λυμάτων, δεξαμενών νερού και κρασιού καθώς και στην κατασκευή εγκαταστάσεων για τη παραγωγή χημικών ουσιών, όπως στην παραγωγή χλωρίου [7].

1.6 Ταξινόμηση των υαλονημάτων

Η κύρια ταξινόμηση των υαλονημάτων και οι φυσικές ιδιότητες παρουσιάζονται στην Εικ.1-4. Επίσης, οι χημικές συνθέσεις των GF σε % κ.β. παρουσιάζονται στον Πίνακα 1-1. Οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των GF φαίνονται στον Πίνακα 1-2



Εικ. 1-4. Ταξινόμηση και φυσικές ιδιότητες διαφόρων υαλονημάτων.

Πίνακας 1-1 Χημικές συνθέσεις υαλονημάτων σε % κ.β.

Τύπος	(SiO ₂)	(Al ₂ O ₃)	TiO ₂	B ₂ O ₃	(CaO)	(MgO)	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Ref.
E-glass	55.0	14.0	0.2	7.0	22.0	1.0	0.5	0.3	–	[8]
C-glass	64.6	4.1	–	5.0	13.4	3.3	9.6	0.5	–	
S-glass	65.0	25.0	–	–	–	10.0	–	–	–	
A-glass	67.5	3.5	–	1.5	6.5	4.5	13.5	3.0	–	
D-glass	74.0	–	–	22.5	–	–	1.5	2.0	–	
R-glass	60.0	24.0	–	–	9.0	6.0	0.5	0.1	–	
EGR-glass	61.0	13.0	–	–	22.0	3.0	–	0.5	–	
Basalt	52.0	17.2	1.0	–	8.6	5.2	5.0	1.0	5.0	

Πίνακας 1-2 Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των υαλονημάτων.

Τύπος	Ποκνότητα (g/cm ³)	Αντοχή εφελκυσμού GPa	Μέτρο του Young (GPa)	Συντελεστής θερμικής διαστολής / Επιμήκυνση (%) (10 ⁻⁷ /°C)	Λόγος Poisson	Δείκτης διάθλασης	Αναφ.
E-glass	2.58	3.445	72.3	4.8 /54	0.2	1.558	[8]
C-glass	2.52	3.310	68.9	4.8 /63	–	1.533	
S ₂ -glass	2.46	4.890	86.9	5.7 /16	0.22	1.521	
A-glass	2.44	3.310	68.9	4.8 /73	–	1.538	
D-glass	2.11–2.14	2.415	51.7	4.6 /25	–	1.465	
R-glass	2.54	4.135	85.5	4.8 /33	–	1.546	
EGR-glass	2.72	3.445	80.3	4.8 /59	–	1.579	
AR glass	2.70	3.241	73.1	4.4 /65	–	1.562	

1.7 Μηχανισμοί αστοχίας

Όταν εφαρμόζεται φορτίο στις άκρες του σωλήνα, λαμβάνει χώρα τοπική αστοχία υλικού και σχηματίζονται μικρές εσωτερικές ρωγμές. Το μήκος των ρωγμών αυτών καθορίζουν αν ο τρόπος σύνθλιψης που προκύπτει είναι εγκάρσια διάτμηση, κάμψη ή συνδυασμός αυτών των τρόπων. [9].

Δύο διαφορετικοί τρόποι κατάρρευσης, παρατηρήθηκαν σε όλες τις αξονικές δυναμικές δοκιμές. Από το σύνολο των 15 δοκιμών τα 14 ακολούθησαν τον προοδευτικό τρόπο κατάρρευσης (τρόπος I), ενώ ένα (το δοκίμιο 13) χαρακτηρίζονται παρουσίασε αστοχία στο μέσο του μήκους του.

1.7.1 Προοδευτική σύνθλιψη

Η αστοχία με προοδευτική σύνθλιψη, (mushroom failure), χαρακτηρίζεται από προοδευτική κατάρρευση μέσω του σχηματισμού συνεχόμενων φύλλων που εξαπλώνονται προς τα έξω και προς τα μέσα [10, 11, 12, 13]. Καθώς η παραμόρφωση συνεχίζεται περαιτέρω, τα εξωτερικά σχηματισμένα μέτωπα στρέφονται προς τα κάτω, με την ταυτόχρονη ανάπτυξη αξονικού διαχωρισμού. Σημειώνεται ότι οι διαχωρισμοί βρίσκονται πάντα στις τέσσερις γωνίες του κελύφους, πιθανώς λόγω της τοπικής συγκέντρωσης τάσης κατά τη διάρκεια του πολύ πρώιμου σταδίου της θλίψης. Στο αρχικό στάδιο της θλίψης, το κέλυφος αρχικά συμπεριφέρθηκε ελαστικά και, μόλις το φορτίο πέτυχε μια μέγιστη τιμή, ανάλογα με τη γεωμετρία του κελύφους, τα χαρακτηριστικά του υλικού και την ακαμψία των γωνιών, δημιουργήθηκαν ρωγμές σε κάθε μια από τις τέσσερις γωνίες και πολλαπλασιάστηκαν προς τα κάτω κατά μήκος

του άξονα του σωλήνα. Οι ρωγμές συνδέονται με το σχηματισμό μιας κύριας κεντρικής ρωγμής στο εσωτερικό του κελύφους δίπλα στην περιοχή φορτίου.

Μετά την ολοκλήρωση της θλίψης παρατηρούμε τον σχηματισμό δύο ίσων δεσμίδων ελασμάτων που κάμπτονται προς τα μέσα και προς τα έξω λόγω της αστοχίας η οποία λαμβάνει χώρα σε απόσταση από την επιφάνεια επαφής ίση με το πάχος τοιχώματος.

Σε αυτό το στάδιο αρχίζει να σχηματίζεται μια τριγωνική σφήνα κονιοποιημένου υλικού. Ο σχηματισμός της μπορεί να αποδοθεί στην τριβή μεταξύ του υλικού που έχει υποστεί κάμψη και της πλάκας της πρέσας. Καθώς η φόρτωση προχωρά περαιτέρω, με αποτέλεσμα τη σύνθλιψη με τον επακόλουθο σχηματισμό των εσωτερικών και εξωτερικών σχηματισμών, αναπτύσσονται κανονικές τάσεις στις πλευρές της σφήνας ακολουθούμενες από τάσεις διατμήσεως κατά μήκος των ίδιων πλευρών λόγω της τριβής στη διεπιφάνεια μεταξύ της σφήνας και των φυλλοειδών. Σημειώστε επίσης ότι αναπτύσσονται επιπρόσθετες κανονικές και διατμητικές τάσεις στη διεπιφάνεια μεταξύ της πλάκας πρεσαρίσματος χάλυβα ή της μάζας πτώσης και του κελύφους παραμόρφωσης καθώς τα σχηματισμένα φύλλα γλιστρούν κατά μήκος αυτής της διεπαφής.

1.7.2 Μηχανισμός κατάρρευσης μέσου μήκους

Το δοκίμιο που στο οποίο παρουσιάστηκε αυτός ο μηχανισμός κατάρρευσης παρατηρήθηκε εκτεταμένη θραύση κατά μήκος της περιφέρειας του. Το κάταγμα ξεκίνησε σε απόσταση από τα άκρα φόρτισης του, περίπου ίσο με το μέσο ύψος του κελύφους, και αφορούσε καταστροφική αστοχία με ρωγμές και διαχωρισμό του κελύφους σε ακανόνιστα σχήματα, πιθανώς λόγω τοπικής έντονης τάνυσης του τοιχώματος του κελύφους. Αυτός ο τρόπος αποτυχίας είναι παρόμοιος με τον λυγισμό της στήλης Euler πολύ λεπτών μεταλλικών και PVC σωλήνων που έχουν υποβληθεί σε αξονική φόρτιση [14].

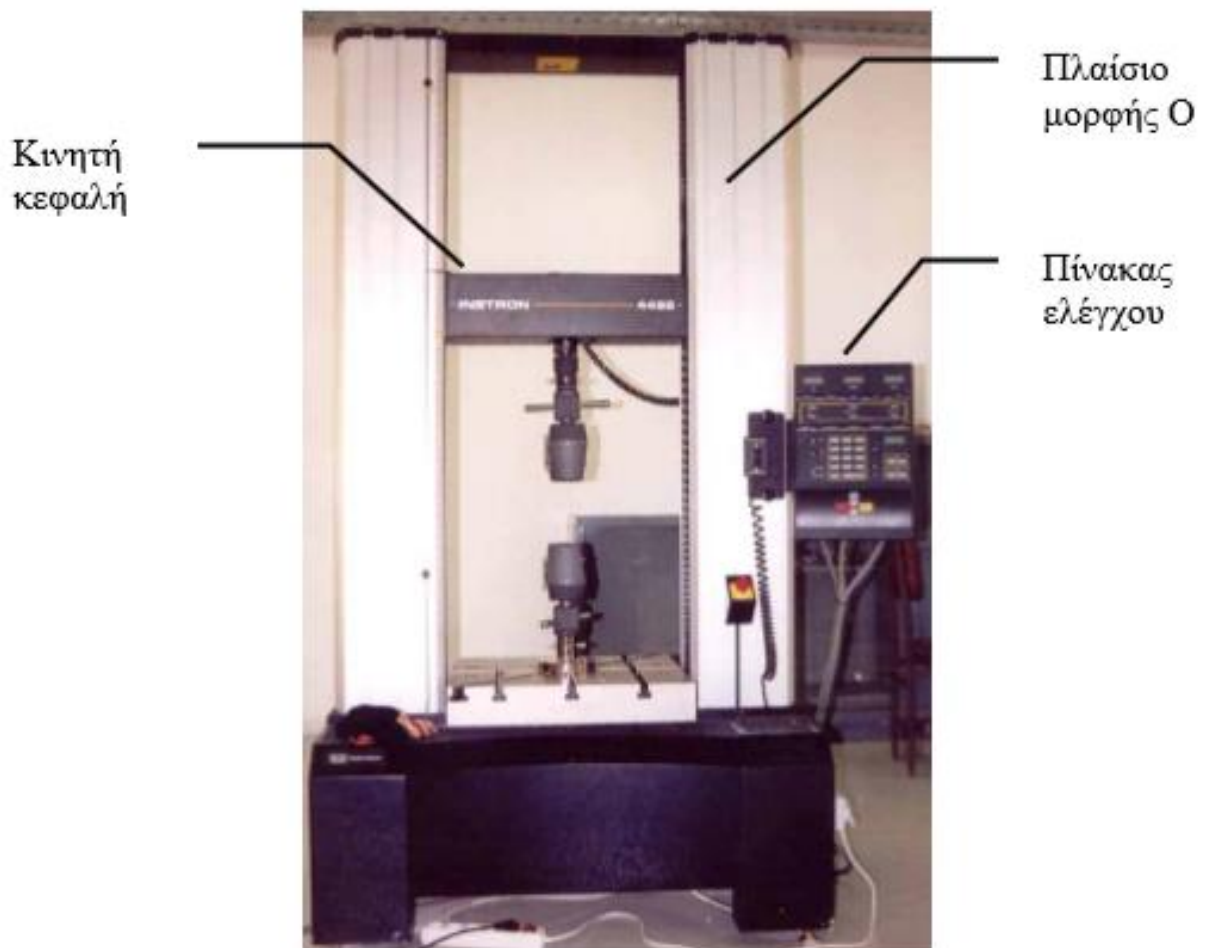
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

2.1 Πειραματική διαδικασία

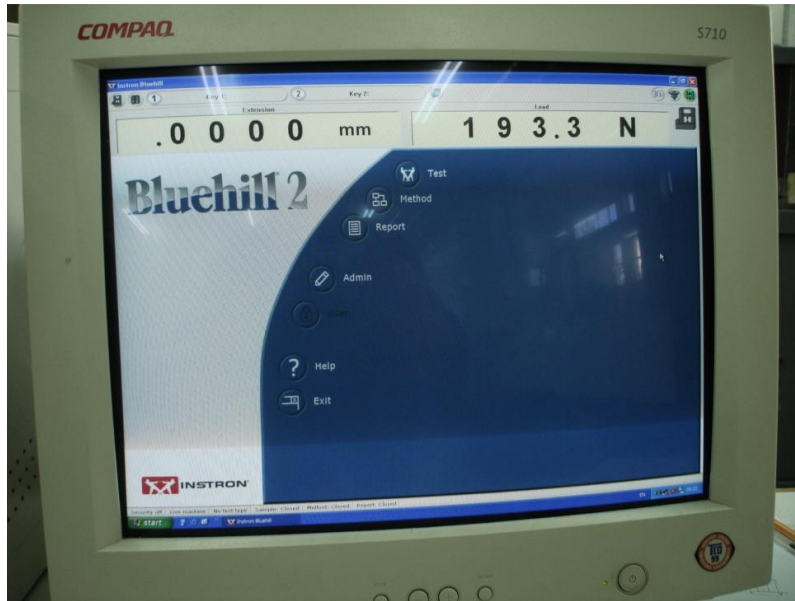
Στο παρακάτω κεφάλαιο παρουσιάζονται οι διατάξεις των πειραματικών διαδικασιών καθώς και οι παράμετροι για την εκτέλεση των πειραμάτων.

2.2 Πειραματικός εξοπλισμός - Πρέσα INSTRON 4482

Οι πειραματικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στη μηχανή INSTRON 4482 του εργαστηρίου. Για την εισαγωγή των πειραματικών συνθηκών στην πρέσα αλλά και την καταγραφή των δεδομένων που προκύπτουν από το πείραμα (καμπύλη φορτίου – μετατόπισης), η μηχανή συνδέεται με ηλεκτρονικό υπολογιστή, όπου είναι εγκατεστημένο το λογισμικό Bluehill



Εικόνα 2.1: Πρέσα δοκιμών INSTRON 4482.



Εικ. 2.2 Πρόγραμμα Bluehill

Τα βασικά μέρη της πρέσας αυτής, είναι:

- Το πλαίσιο, μορφής Ο (περιλαμβάνει το τραπέζι στερέωσης του δοκιμίου και το μηχανισμό κίνησης του εργαλείου διαμόρφωσης)
- Ο μηχανισμός της κινητής κεφαλής.
- Ο πίνακας ελέγχου, ο οποίος διαθέτει θύρα επικοινωνίας συμβατή με το πρωτόκολλο IEEE, συνδεδεμένη μέσω παράλληλης θύρας με ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά της πρέσας είναι:

- Ονομαστική δύναμη: 10 KN.
- Μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής: 500 mm/ min
- Ταχύτητα επιστροφής κινητής κεφαλής στην αρχική θέση: 600 mm /min.
- Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο στη μέγιστη ταχύτητα: 75 KN.
- Μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής σε μέγιστο φορτίο: 250 mm/ min.
- Ευαισθησία κεφαλής πρέσας: 2 mV/ V.

2.3 Γεωμετρικά στοιχεία δοκιμίων

Τα δοκίμια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα ήταν δέκα τρία (13) στο σύνολο. Η ταχύτητα με τη οποία εκτελέστηκε η θλίψη των δοκιμίων ήταν 1 mm/s χρησιμοποιώντας τη πρέσα του εργαστηρίου όπως αναφέρθηκε ανωτέρω. Η συνολική μετατόπιση του εμβόλου σε κάθε πειραματική επανάληψη ήταν της τάξης των 40mm σε κάθε δοκίμιο.


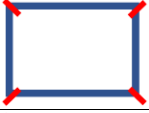


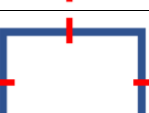

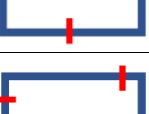


Τα δοκίμια ήταν ορθογωνικής διατομής και είχαν διαστάσεις κατά μέσο όρο 45 mm x 75 mm x 70 mm (πλάτος x μήκος x ύψος). Το πάχος του υλικού ήταν 2mm και η ακτίνα καμπυλότητας της εσωτερικής πλευράς ήταν 7,5mm.

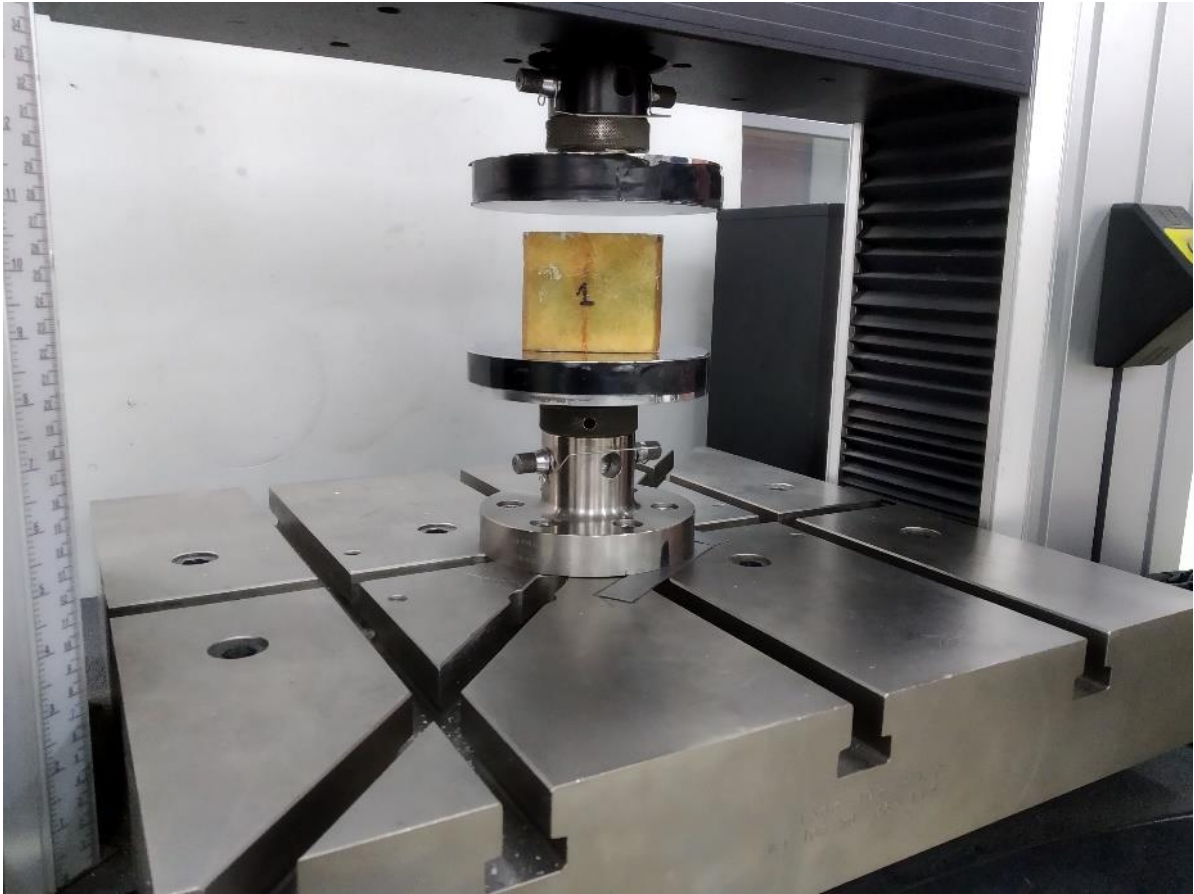
Χρησιμοποιώντας ένα περιστροφικό εργαλείο τύπου Dremel δημιουργήθηκαν στα εννέα πρώτα δοκίμια εγκοπές (σε διαφορετικές θέσεις ανά ομάδες των τριών) ενώ στα τελευταία τρία δοκίμια δεν δημιουργήθηκαν καθόλου εγκοπές. Οι εγκοπές δημιουργήθηκαν στο άνω σημείο των δοκιμίων σε διάταξη όπως φαίνεται στον κάτωθι πίνακα (πίνακας 2.1). Επίσης σε κάθε ομάδα των τριών δοκιμίων τα οποία είχαν ίδια γεωμετρία εγκοπών, ένα από τα τρία δοκίμια περιείχε πυρήνα από αφρό πολουρεθάνης. Τέλος οι εγκοπές είχαν διαστάσεις πάχος 2mm και βάθος 4 mm και στο τελειώμά τους ήταν στρογγυλεμένες με του εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε.



Εικ. 2.3 Τυπική μορφή ομάδας δοκιμίων

Πίνακας 2.1 Γεωμετρικά στοιχεία δοκιμίων και εγκοπών

Α/Α	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	Διάταξη εγκοπών	Υ1 (Υψος κάτω πλευράς)	Υ2 (Υψος δεξιά πλευράς)	Υ3 (Υψος άνω πλευράς)	Υ4 (Υψος αριστερής πλευράς)	Μέσος όρος πάχους τοιχωμάτων
1	Εγκοπές στις γωνίες, γέμιση με αφρό		69.45	69.8	69.3	69.5	
2	Εγκοπές στις γωνίες		69.21	69.21	69.18	69.4	2.85
3	Εγκοπές στις γωνίες		98.95	68.9	68.65	69	2.71
4	Εγκοπές στα μέσα των πλευρών, γέμιση με αφρό		68.07	67.81	67.81	68.13	3.12
5	Εγκοπές στα μέσα των πλευρών		66.98	67	67.29	66.98	2.96
6	Εγκοπές στα μέσα των πλευρών		69.17	69.52	69.45	69.5	3.23
7	Εγκοπές στο 1/3 των πλευρών, γέμιση με αφρό		69.35	69.63	69.7	69.96	2.65
8	Εγκοπές στο 1/3 των πλευρών		69.05	69.3	69.25	69.32	3.24
9	Εγκοπές στο 1/3 των πλευρών		69.35	69.63	69.75	69.96	2.77
10	Χωρίς εγκοπές	-	69.36	69.42	69.44	69.54	3.01
11	Χωρίς εγκοπές	-	69.44	69.54	69.38	69.56	2.85
12	Χωρίς εγκοπές, γέμιση με αφρό	-	69.62	70.08	69.77	69.72	3.05
13	Χωρίς εγκοπές, γέμιση με αφρό	-	69.28	69.62	69.56	69.32	2.85



Εικ. 2.4 Δοκίμιο Νο1 πριν την έναρξη της πειραματικής διαδικασίας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

3.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει παράθεση των αποτελεσμάτων του πειράματος που εκτελέστηκε για όλα τα δοκίμια, μαζί με παρουσίαση του φωτογραφικού υλικού που λήφθηκε κατά την εκτέλεση του.

3.2 Δοκίμιο 1

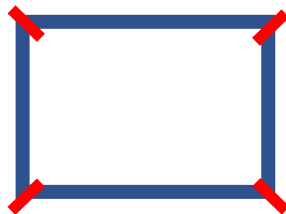
Το δοκίμιο 1 αποτελεί ορθογωνικής διατομής κέλυφος με πυρήνα από αφρό πολυαιθυλενίου στο οποίο δημιουργήθηκαν εγκοπές στις τέσσερις γωνίες, πάχους 2mm και βάθους 4 mm .

Το κέλυφος του συμπιέζεται αξονικά μεταξύ της άνω (κινούμενης προς τα κάτω) πλάκας συμπίεσης και της κάτω ακίνητης πλάκας της μηχανής δοκιμών.

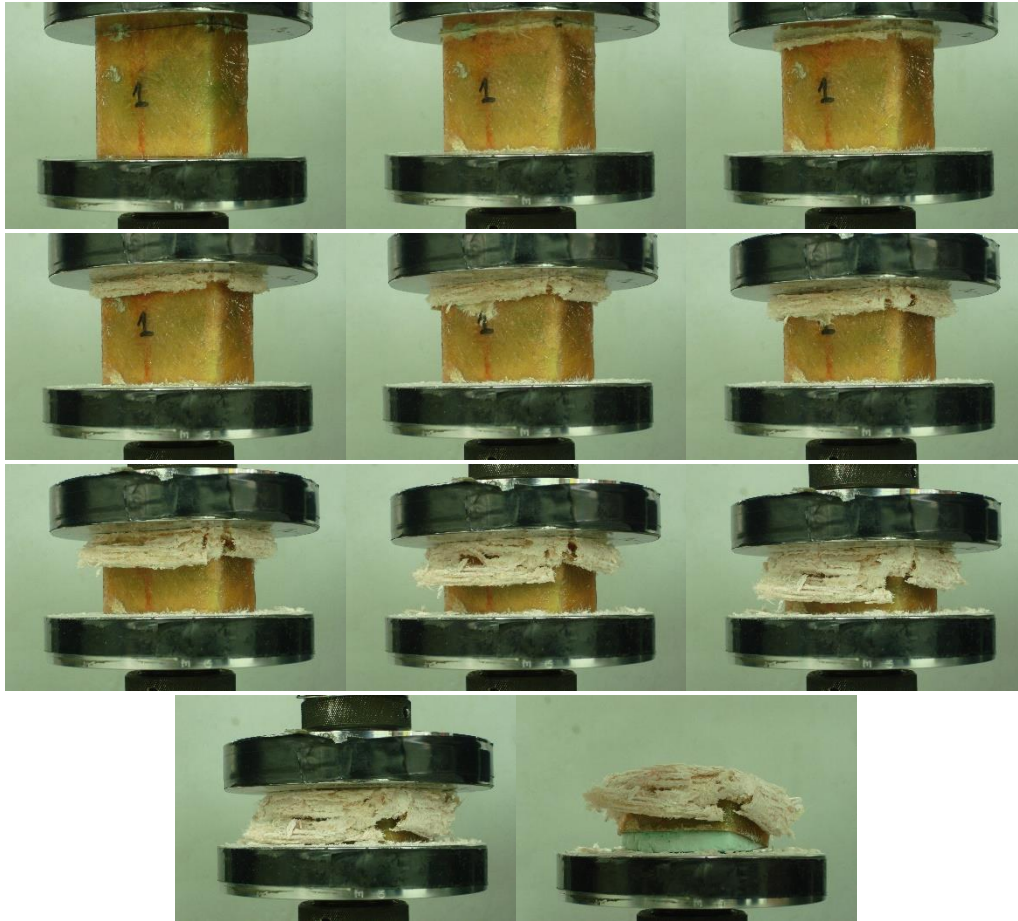
Κατά την εξέλιξη του πειράματος παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευση με μικρο-θραύσεις του σύνθετου υλικού, με αποτέλεσμα να σχηματιστεί ζώνη θραύσης (μέτωπο κατάρρευσης), στο άνω άκρο του κελύφους, με μορφή μανιταριού (“mushrooming” failure).

Κατά την δυναμική άσκηση φορτίου στο δοκίμιο καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο στα 73.424 KN για την τιμή βράχυνσης των 2,16 mm. Αρχικά παρατηρείται μεγάλη αύξηση του φορτίου με αντίστοιχη μικρή βράχυνση του δοκιμίου λόγω της προβαλλόμενης αντίστασης του υλικού.

Στη συνέχεια, σημειώνεται δραστική μείωση του φορτίου και έναρξη προοδευτικής κατάρρευσης του υλικού με εμφάνιση μικρορωγμών και με μικρές έντονες διακυμάνσεις του φορτίου συμπίεσης. Λόγω του τελευταίου η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης χαρακτηρίζεται από έντονα πριονωτή μορφή και κυμαίνεται κοντά στην τιμή του μέσου φορτίου. Τέλος κατά την συμπίεση του δοκιμίου, οι στρώσεις αποκολλώνται και κάμπτονται εξωτερικά.



Σχήμα 3.1 Διάταξη εγκοπών για δοκίμιο 1

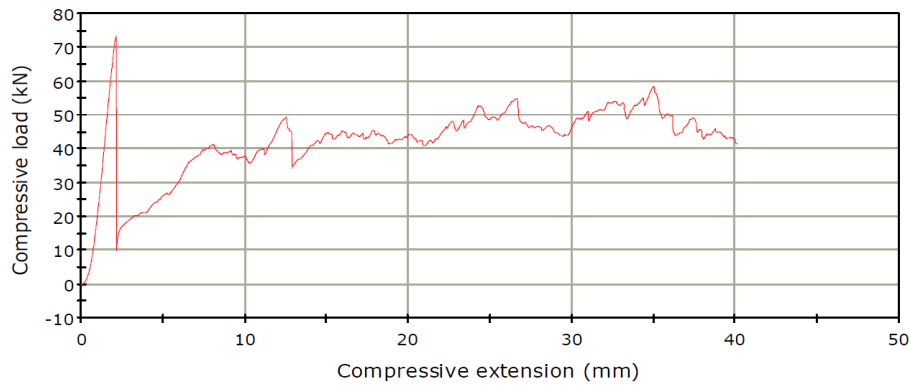


Εικ. 3-1 - Προοδευτικές φάσεις θλίψης δοκιμίου 1

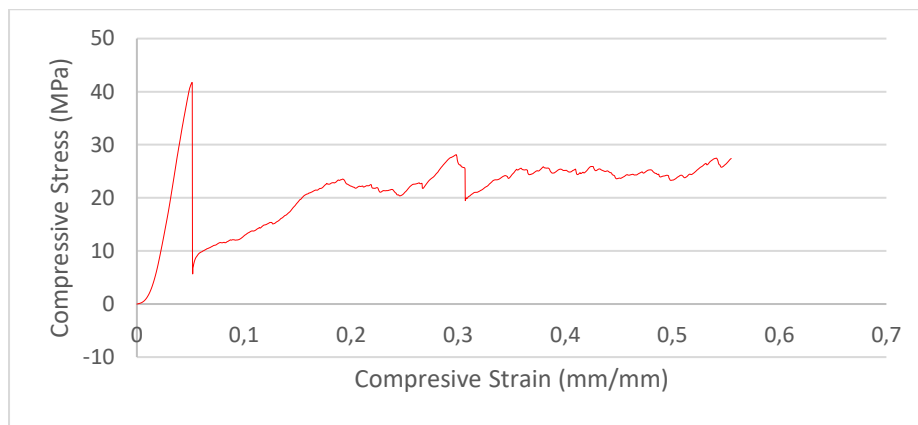
Πίνακας 3.1 Αντιστοίχιση φωτογραφίας και μετατόπιση

Αριθμός φωτογραφίας	Μετατόπιση
1	0
2	2.6
3	6.8
4	11.2
5	14.9
6	20
7	24.9
8	29.6
9	34.7
10	40

STRESS - STRAIN (ENGINEERING) GRAPH



Διάγραμμα 3.1 – Καμπύλη φορτίου - μετατόπισης κατά την θλίψη του δοκιμίου Νο 1



Διάγραμμα 3.2 – Καμπύλη τάσης (MPa) – παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο Νο1

Πίνακας 3.2 : Πειραματικά αποτελέσματα για δοκίμιο Νο 1

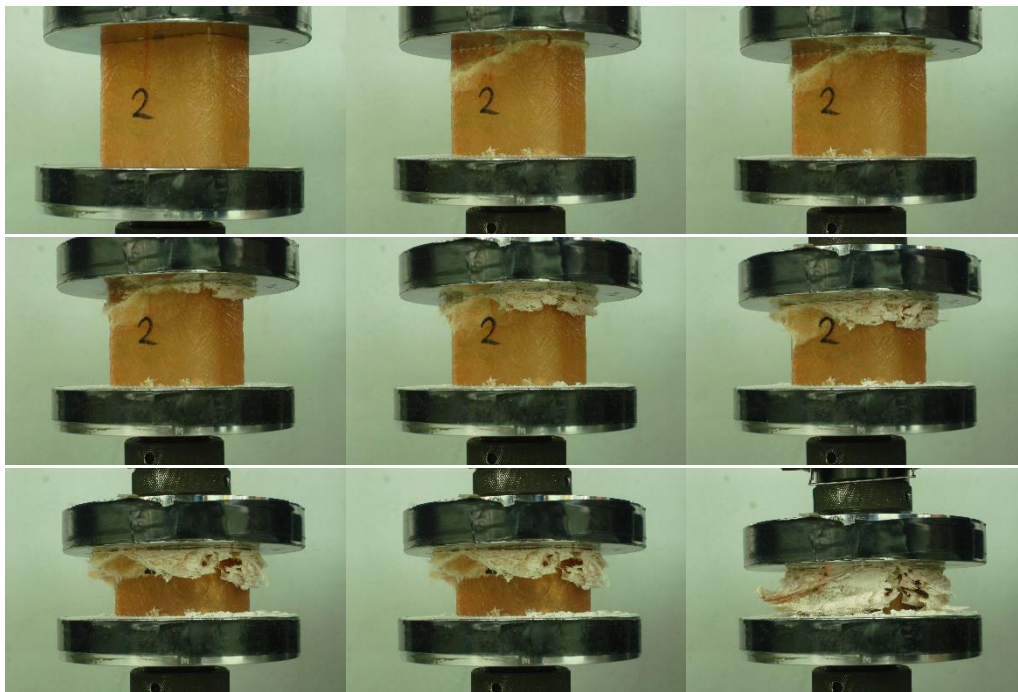
Μέσο Φορτίο	P_{mean}	42.241	kN
Μέγιστο φορτίο	P_{max}	73.424	kN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου	$c.f.e$	0.57	%
Ενέργεια απορρόφησης	E_{abs}	1689.503	J
Διαδρομή εμβόλου για μέγιστο φορτίο	S'	2.16	mm
Συνολική διαδρομή εμβόλου:	S	40	mm

3.3 Δοκίμιο 2

Το δοκίμιο 2 αποτελεί ορθγωνικής διατομής κέλυφος χωρίς πυρήνα από αφρό πολυαιθυλενίου. Σε αυτό το δοκίμιο δημιουργήθηκαν εγκοπές στις τέσσερις γωνίες, πάχους 2mm και βάθους 4 mm .

Κατά την εξέλιξη του πειράματος παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευση με μικρο-θραύσεις του σύνθετου υλικού, με αποτέλεσμα να σχηματιστεί ζώνη θραύσης (μέτωπο κατάρρευσης), στο άνω άκρο του κελύφους, με μορφή μανιταριού (“mushrooming” failure).

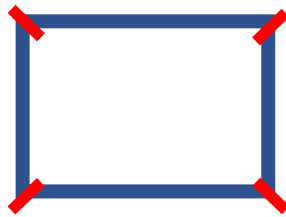
Κατά την δυναμική άσκηση φορτίου στο δοκίμιο καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο στα 90.616 KN για την τιμή βράχυνσης των 1,93 mm. Αρχικά παρατηρείται μεγάλη αύξηση του φορτίου με αντίστοιχη μικρή βράχυνση του δοκιμίου λόγω της προβαλλόμενης αντίστασης του υλικού.



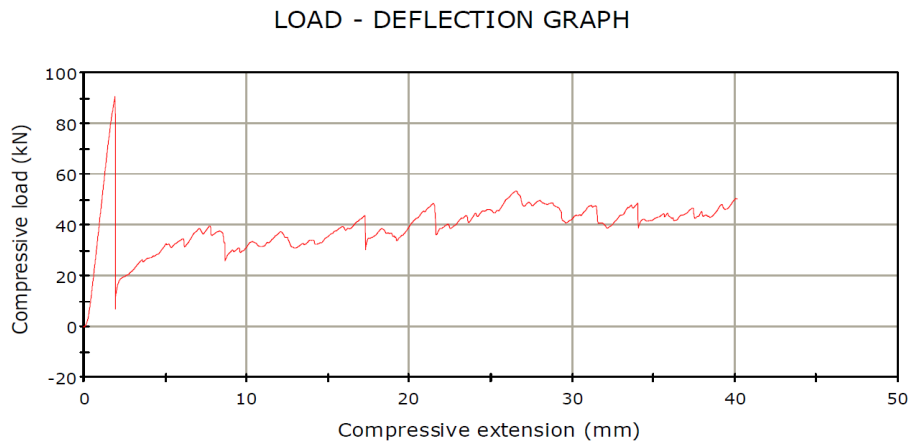
Εικ. 3-2 - Προοδευτικές φάσεις θλίψης δοκιμίου 2

Πίνακας 3.3 Αντιστοίχιση φωτογραφίας και μετατόπισης

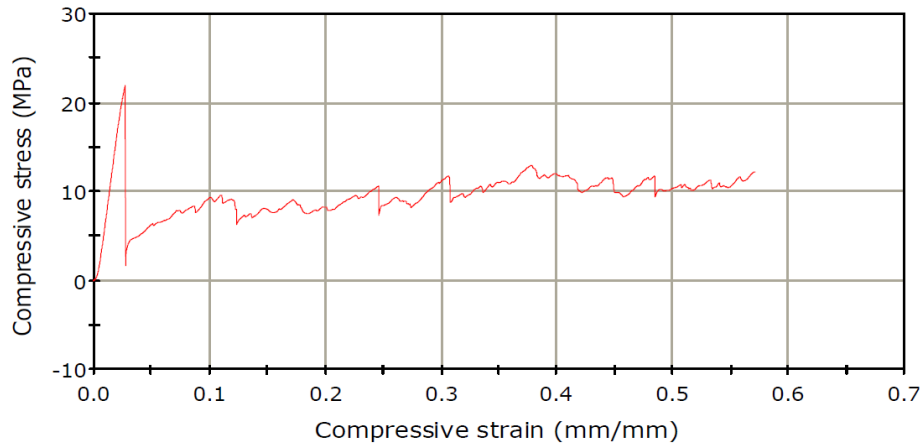
Αριθμός φωτογραφίας	Μετατόπιση (mm)
1	0
2	2.1
3	4.9
4	8.9
5	13.9
6	19
7	29.5
8	34.3
9	40



Σχήμα 3.2 Διάταξη εγκοπών για δοκίμιο 2



Διάγραμμα 3.3- Καμπύλη φορτίου (kN) – μετατόπισης (mm) κατά την θλίψη του δοκιμίου No 2



Διάγραμμα 3.4 – Καμπύλη τάσης (Μpa) – παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο Νο 2

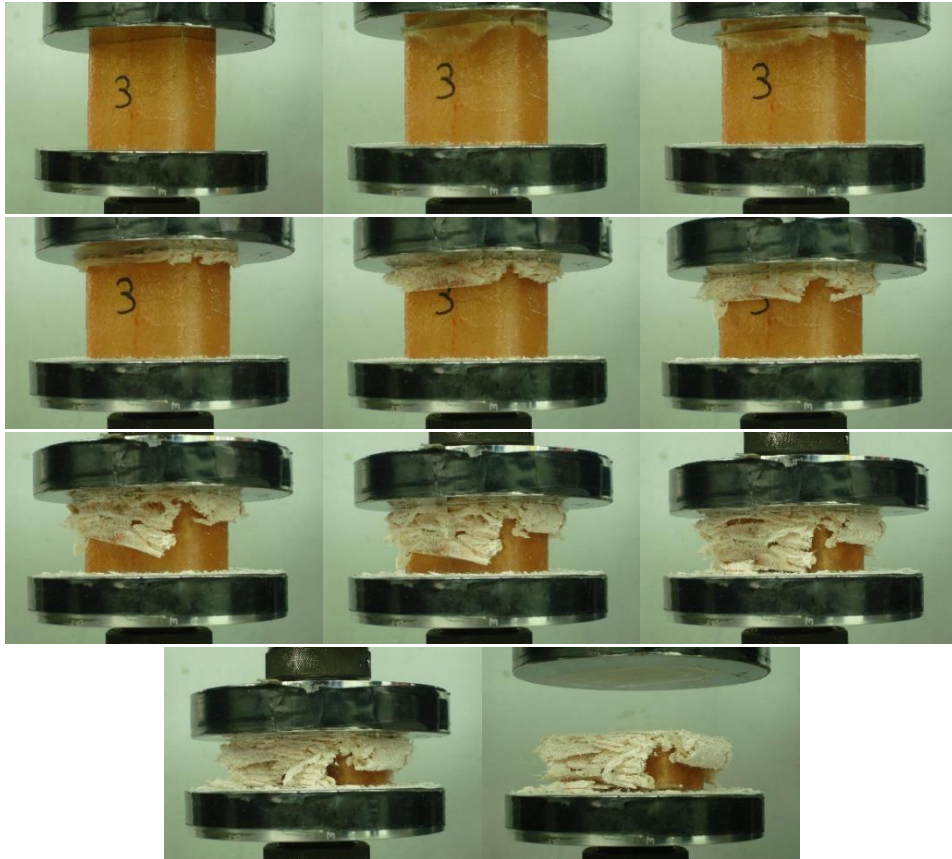
Πίνακας 3.4 : Πειραματικά αποτελέσματα για δοκίμιο Νο 2

Μέσο Φορτίο	P_{mean}	39.413	kN
Μέγιστο φορτίο	P_{max}	90.616	kN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου	$c.f.e$	0.43	%
Ενέργεια απορρόφησης	E_{abs}	1576.45	J
Διαδρομή εμβόλου για μέγιστο φορτίο	S'	1.93	mm
Συνολική διαδρομή εμβόλου:	S	40	mm

3.4 Δοκίμιο 3

Το δοκίμιο 3 αποτελεί ορθογωνικής διατομής κέλυφος χωρίς πυρήνα από αφρό πολυαιθυλενίου. Σε αυτό το δοκίμιο δημιουργήθηκαν εγκοπές στις τέσσερις γωνίες, πάχους 2mm και βάθους 4 mm . Κατά την εξέλιξη του πειράματος παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευση με μικρο-θραύσεις του σύνθετου υλικού, με αποτέλεσμα να σχηματιστεί ζώνη θραύσης (μέτωπο κατάρρευσης), στο άνω άκρο του κελύφους, με μορφή μανιταριού (“mushrooming” failure).

Κατά την δυναμική άσκηση φορτίου στο δοκίμιο καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο στα 67.527 KN για την τιμή βράχυνσης των 1,57 mm. Αρχικά παρατηρείται μεγάλη αύξηση του φορτίου με αντίστοιχη μικρή βράχυνση του δοκιμίου λόγω της προβαλλόμενης αντίστασης του υλικού.



Εικ. 3-3 - Προοδευτικές φάσεις θλίψης δοκιμίου 3

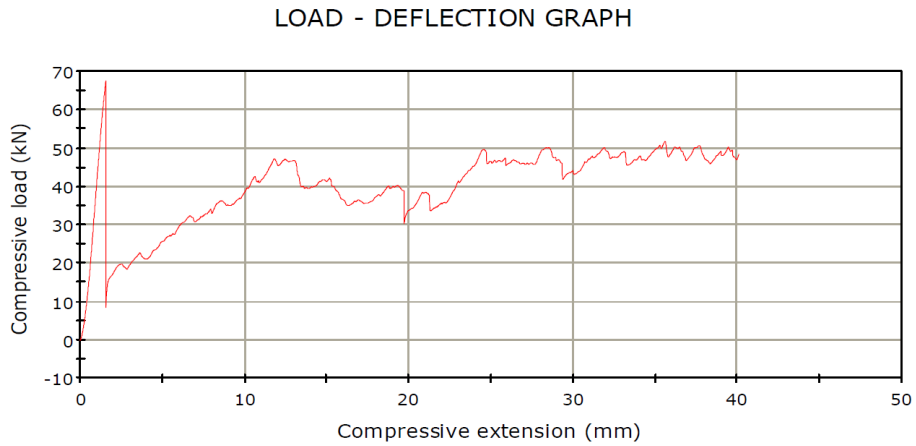
Πίνακας 3.5 Αντιστοίχιση φωτογραφίας και μετατόπιση

Αριθμός φωτογραφίας	Μετατόπιση (mm)
1	0
2	1.7
3	5
4	9.2
5	14.6
6	19.9
7	24.7
8	29.3
9	34.4
10	40

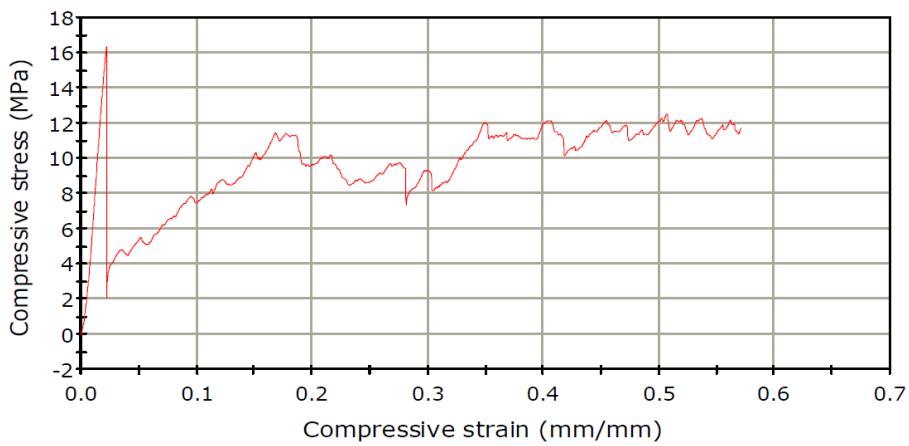




Σχήμα 3.3 Διάταξη εγκοπών για δοκίμιο 3



Διάγραμμα 3.5- Καμπύλη φορτίου (kN) – μετατόπισης (mm) κατά την θλίψη του δοκιμίου No 3



Διάγραμμα 3.6 – Καμπύλη τάσης (MPa) – παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο No 3

Πίνακας 3.6 : Πειραματικά αποτελέσματα για δοκίμιο No 3

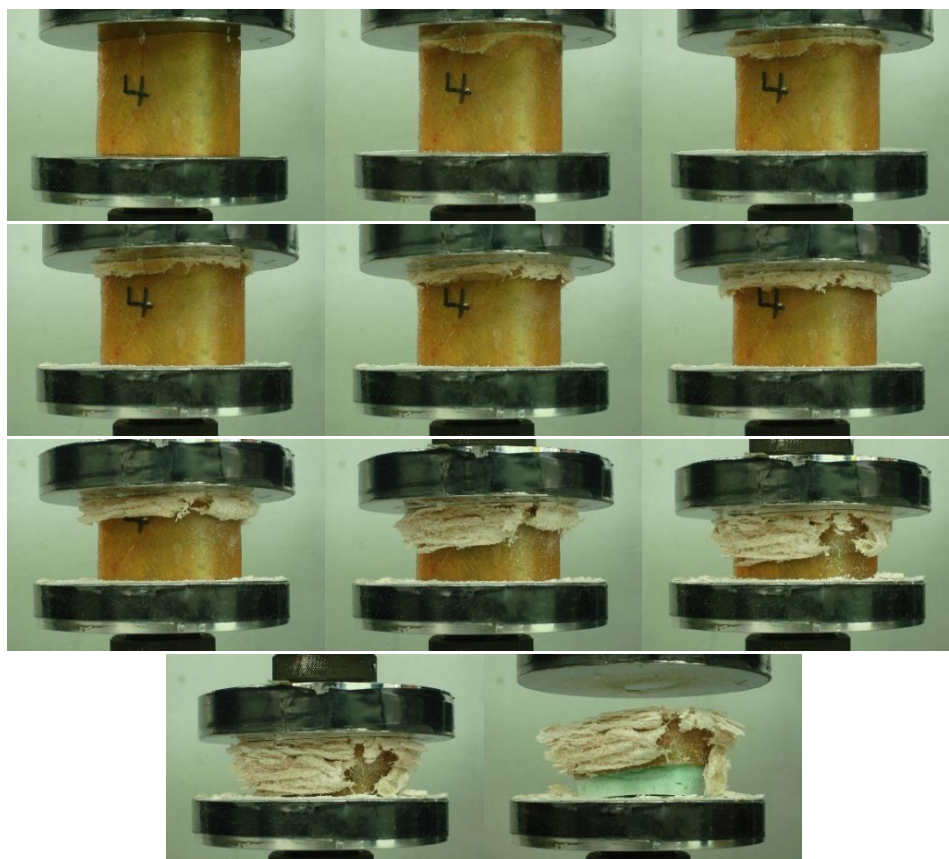
Μέσο Φορτίο	P_{mean}	39.924	kN
-------------	------------	--------	----

Μέγιστο φορτίο	P_{max}	67.527	kN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου	$c.f.e$	0.59	%
Ενέργεια απορρόφησης	E_{abs}	1596.84	J
Διαδρομή εμβόλου για μέγιστο φορτίο	S'	1.57	mm
Συνολική διαδρομή εμβόλου:	S	40	mm

3.5 Δοκίμιο 4

Το δοκίμιο 4 αποτελεί ορθογωνικής διατομής κέλυφος με πυρήνα από αφρό πολυαιθυλενίου. Σε αυτό το δοκίμιο δημιουργήθηκαν εγκοπές στα μέσα των πλευρών, πάχους 2mm και βάθους 4 mm . Κατά την εξέλιξη του πειράματος παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευση με μικροθραύσεις του σύνθετου υλικού, με αποτέλεσμα να σχηματιστεί ζώνη θραύσης (μέτωπο κατάρρευσης), στο άνω άκρο του κελύφους, με μορφή μανιταριού (“mushrooming” failure).

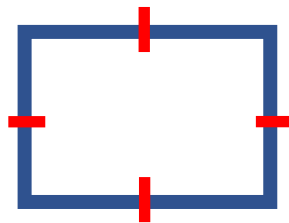
Κατά την δυναμική άσκηση φορτίου στο δοκίμιο καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο στα 84.560 KN για την τιμή βράχυνσης των 2,34 mm. Αρχικά παρατηρείται μεγάλη αύξηση του φορτίου με αντίστοιχη μικρή βράχυνση του δοκιμίου λόγω της προβαλλόμενης αντίστασης του υλικού.



Εικ. 3-4 - Προοδευτικές φάσεις θλίψης δοκιμίου 4

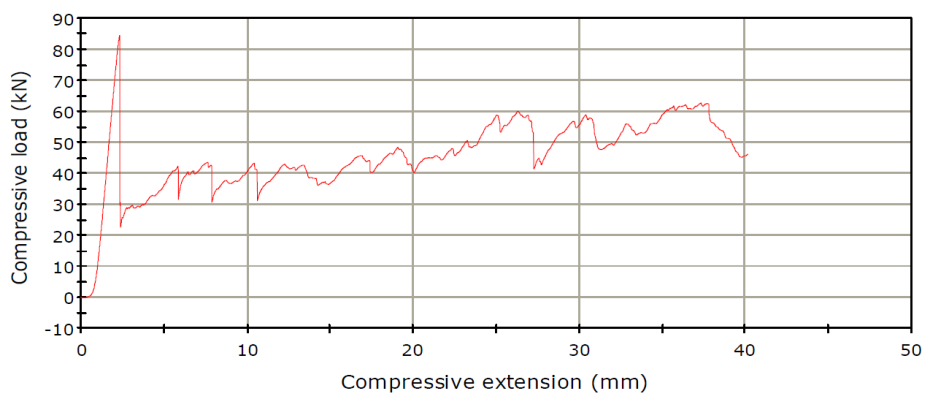
Πίνακας 3.7 Αντιστοίχιση φωτογραφίας και μετατόπισης

Αριθμός φωτογραφίας	Μετατόπιση (mm)
1	0
2	2.5
3	6.1
4	8.2
5	11.6
6	15.5
7	20.1
8	25.1
9	30
10	35.5

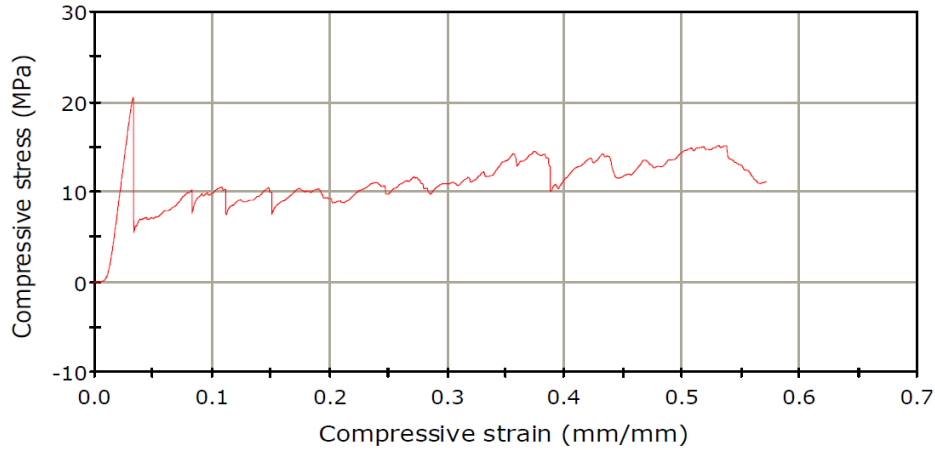


Σχήμα 3.4 Διάταξη εγκοπών για δοκίμιο 4

LOAD - DEFLECTION GRAPH



Διάγραμμα 3.7- Καμπύλη φορτίου (kN) – μετατόπισης (mm) κατά την θλίψη του δοκιμίου No 4



Διάγραμμα 3.8 – Καμπύλη τάσης (MPa) – παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο No 4

Πίνακας 3.8 : Πειραματικά αποτελέσματα για δοκίμιο No 4

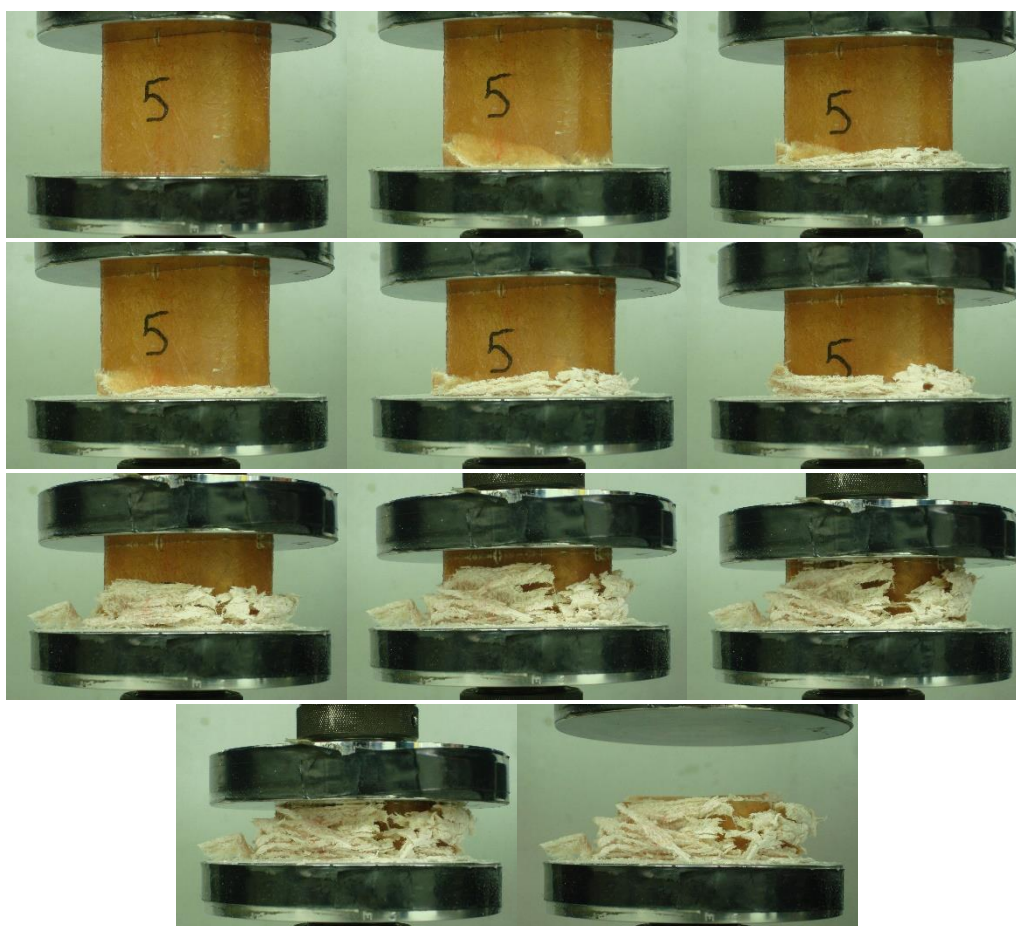
<i>Μέσο Φορτίο</i>	<i>P_{mean}</i>	45.511	<i>kN</i>
<i>Μέγιστο φορτίο</i>	<i>P_{max}</i>	84.560	<i>kN</i>
<i>Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου</i>	<i>c.f.e</i>	0.53	<i>%</i>
<i>Ενέργεια απορρόφησης</i>	<i>E_{abs}</i>	1820.33	<i>J</i>
<i>Διαδρομή εμβόλου για μέγιστο φορτίο</i>	<i>S'</i>	2.34	<i>mm</i>
<i>Συνολική διαδρομή εμβόλου:</i>	<i>S</i>	40	<i>mm</i>

3.6 Δοκίμιο 5

Το δοκίμιο 5 αποτελεί ορθογωνικής διατομής κέλυφος χωρίς πυρήνα από αφρό πολυαιθυλενίου. Σε αυτό το δοκίμιο δημιουργήθηκαν εγκοπές στα μέσα των πλευρών, πάχους 2mm και βάθους 4 mm .

Κατά την εξέλιξη του πειράματος παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευση με μικρο-θραύσεις του σύνθετου υλικού, με αποτέλεσμα να σχηματιστεί ζώνη θραύσης (μέτωπο κατάρρευσης), στο κάτω άκρο του κελύφους, με μορφή μανιταριού (“mushrooming” failure).

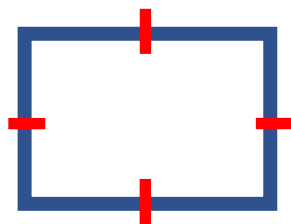
Κατά την δυναμική άσκηση φορτίου στο δοκίμιο καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο στα 46.611 KN για την τιμή βράχυνσης των 1,60 mm. Αρχικά παρατηρείται μεγάλη αύξηση του φορτίου με αντίστοιχη μικρή βράχυνση του δοκιμίου λόγω της προβαλλόμενης αντίστασης του υλικού.



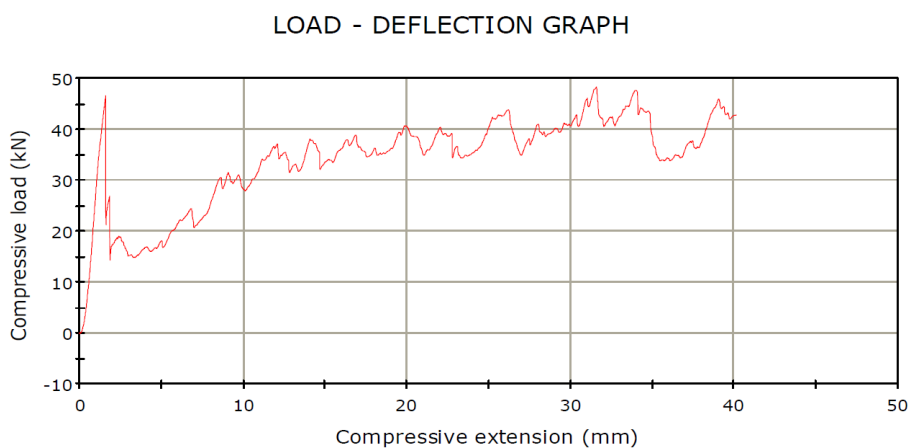
Εικ. 3-5 - Προοδευτικές φάσεις θλίψης δοκιμίου 5

Πίνακας 3.9 Αντιστοίχιση φωτογραφίας και μετατόπισης

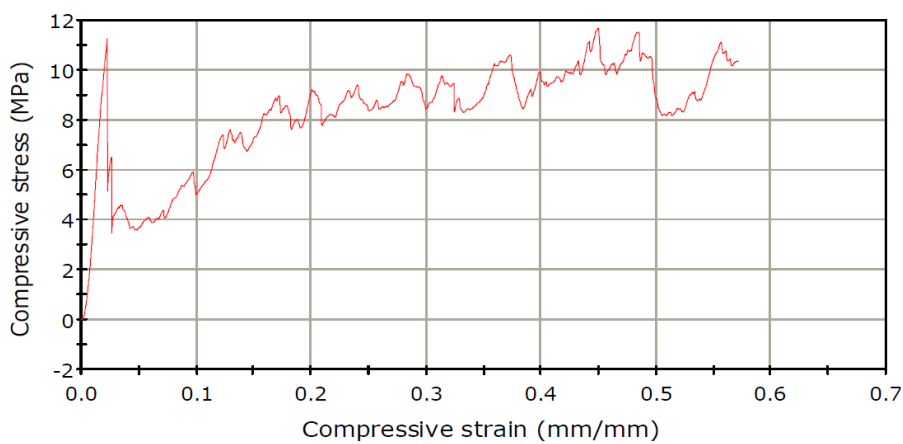
Αριθμός φωτογραφίας	Μετατόπιση (mm)
1	0
2	1.9
3	5.7
4	10.2
5	15.1
6	19.3
7	24.8
8	33
9	36
10	40



Σχήμα 3.5 Διάταξη εγκοπών για δοκίμιο 5



Διάγραμμα 3.9- Καμπύλη φορτίου (kN) – μετατόπισης (mm) κατά την θλίψη του δοκιμίου No 5



Διάγραμμα 3.10 – Καμπύλη τάσης (MPa) – παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο No 5

Πίνακας 3.10 : Πειραματικά αποτελέσματα για δοκίμιο No 5

Μέσο Φορτίο	P_{mean}	34.020	kN
Μέγιστο φορτίο	P_{max}	46.611	kN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου	$c.f.e$	0.70	%
Ενέργεια απορρόφησης	E_{abs}	1360.36	J

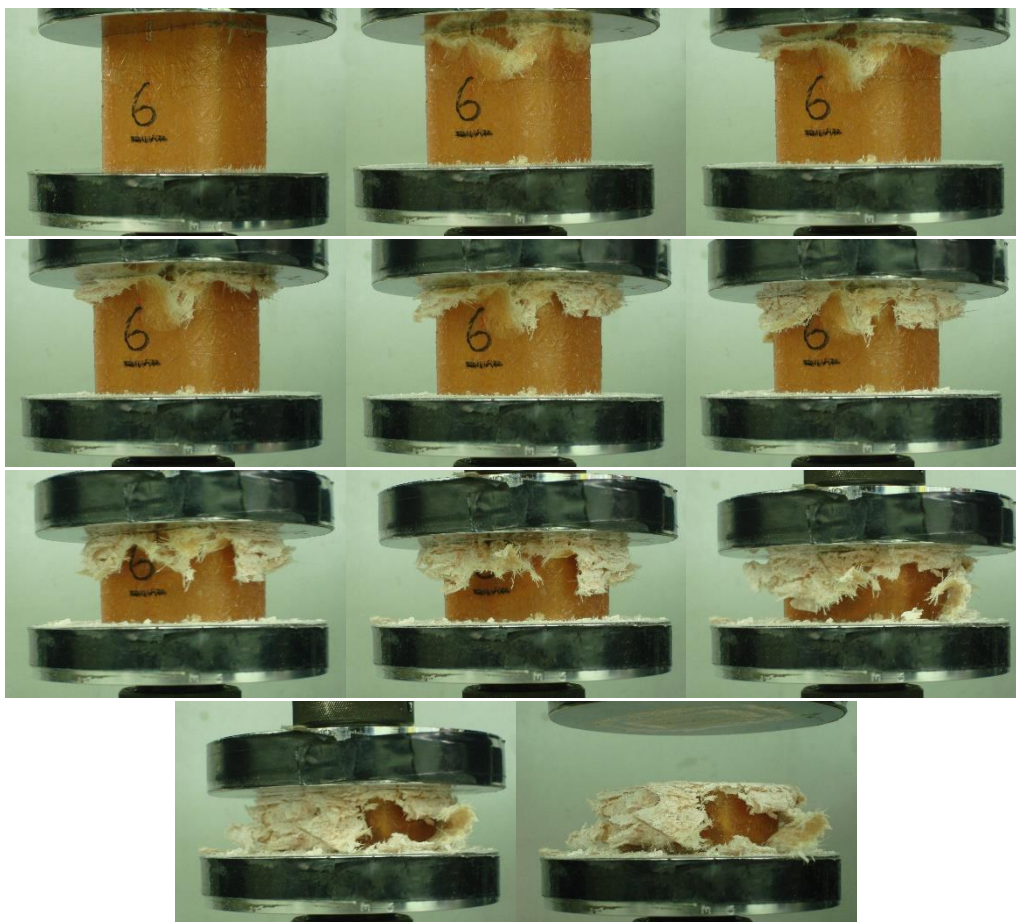
Διαδρομή εμβόλου για μέγιστο φορτίο	S'	1.60	mm
Συνολική διαδρομή εμβόλου:	S	40	mm

3.7 Δοκίμιο 6

Το δοκίμιο 6 αποτελεί ορθογωνικής διατομής κέλυφος χωρίς πυρήνα από αφρό πολυαιθυλενίου. Σε αυτό το δοκίμιο δημιουργήθηκαν εγκοπές στα μέσα των πλευρών, πάχους 2mm και βάθους 4 mm .

Κατά την εξέλιξη του πειράματος παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευση με μικρο-θραύσεις του σύνθετου υλικού, με αποτέλεσμα να σχηματιστεί ζώνη θραύσης (μέτωπο κατάρρευσης), στο άνω άκρο του κελύφους, με μορφή μανιταριού (“mushrooming” failure).

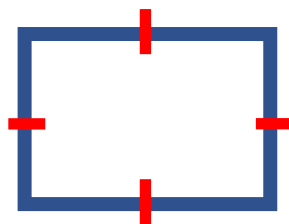
Κατά την δυναμική άσκηση φορτίου στο δοκίμιο καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο στα 95.72 KN για την τιμή βράχυνσης των 0.45 mm. Αρχικά παρατηρείται μεγάλη αύξηση του φορτίου με αντίστοιχη μικρή βράχυνση του δοκιμίου λόγω της προβαλλόμενης αντίστασης του υλικού.



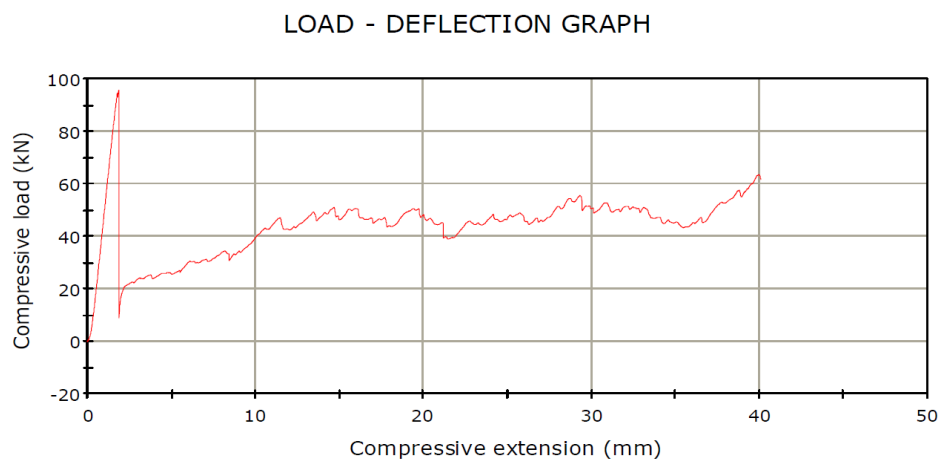
Εικ. 3-6 - Προοδευτικές φάσεις θλίψης δοκιμίου 6

Πίνακας 3.11 Αντιστοίχιση φωτογραφίας και μετατόπισης

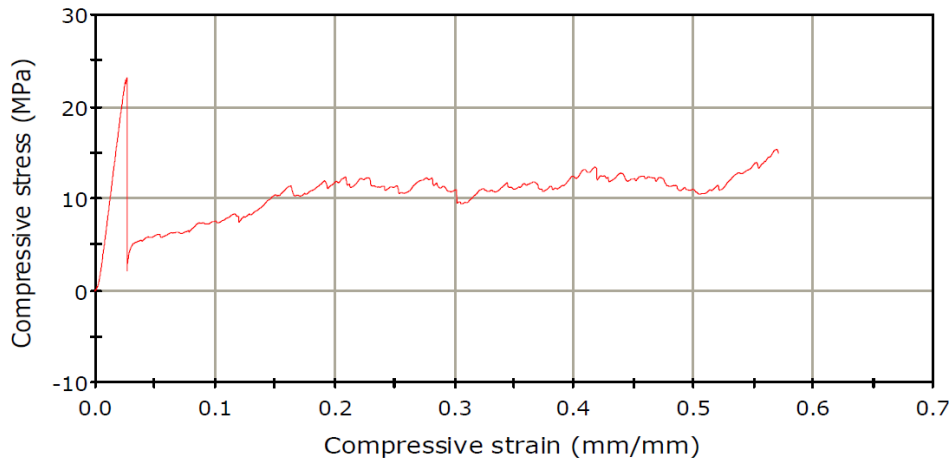
Αριθμός φωτογραφίας	Μετατόπιση (mm)
1	0
2	2.2
3	8
4	11.6
5	15.6
6	20
7	24.8
8	29.7
9	34.7
10	40



Σχήμα 3.6 Διάταξη εγκοπών για δοκίμιο 6



Διάγραμμα 3.11- Καμπύλη φορτίου (kN)-μετατόπισης (mm) κατά την θλίψη του δοκιμίου Νο 6



Διάγραμμα 3.12 – Καμπύλη τάσης (MPa) – παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο No 6

Πίνακας 3.12 : Πειραματικά αποτελέσματα για δοκίμιο No 6

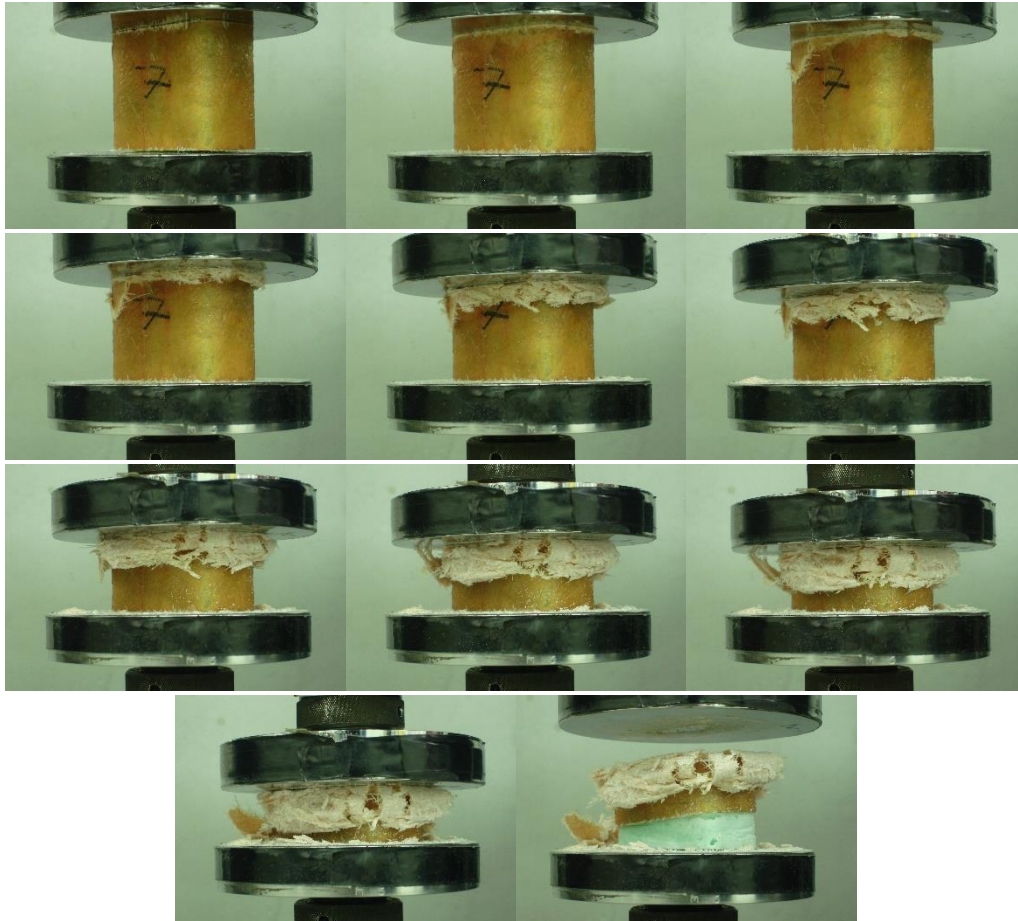
Μέσο Φορτίο	P_{mean}	43.954	kN
Μέγιστο φορτίο	P_{max}	95.72	kN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου	$c.f.e$	0.45	%
Ενέργεια απορρόφησης	E_{abs}	1757.606	J
Διαδρομή εμβόλου για μέγιστο φορτίο	S'	1.87	mm
Συνολική διαδρομή εμβόλου:	S	40	mm

3.8 Δοκίμιο 7

Το δοκίμιο 7 αποτελεί ορθογωνικής διατομής κέλυφος με πυρήνα από αφρό πολυαιθυλενίου. Σε αυτό το δοκίμιο δημιουργήθηκαν εγκοπές στο ένα τρίτο του μήκους των των πλευρών του, πάχους 2mm και βάθους 4 mm .

Κατά την εξέλιξη του πειράματος παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευση με μικρο-θραύσεις του σύνθετου υλικού, με αποτέλεσμα να σχηματιστεί ζώνη θραύσης (μέτωπο κατάρρευσης), στο άνω άκρο του κελύφους, με μορφή μανιταριού (“mushrooming” failure).

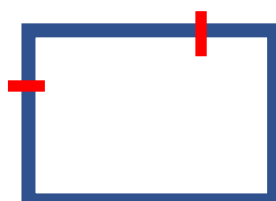
Κατά την δυναμική άσκηση φορτίου στο δοκίμιο καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο στα 65.605 KN για την τιμή βράχυνσης των 2.56 mm. Αρχικά παρατηρείται μεγάλη αύξηση του φορτίου με αντίστοιχη μικρή βράχυνση του δοκιμίου λόγω της προβαλλόμενης αντίστασης του υλικού.



Εικ. 3-7 - Προοδευτικές φάσεις θλίψης δοκμίου 7

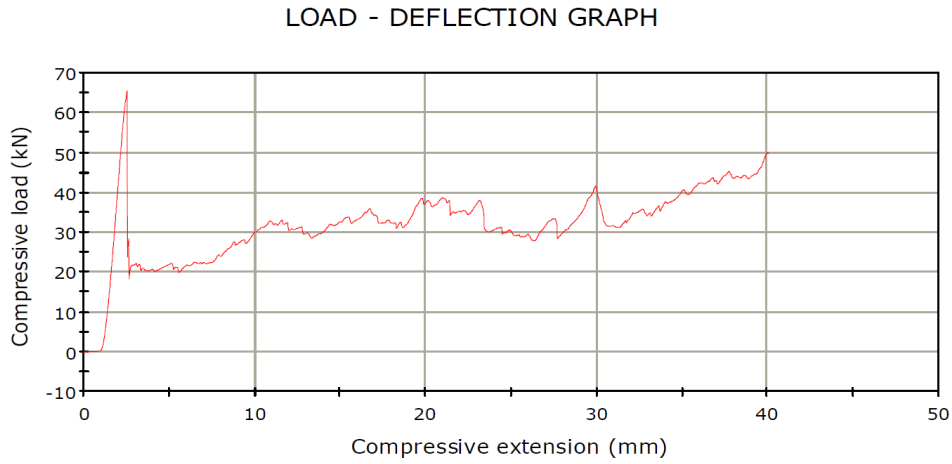
Πίνακας 3.13 Αντιστοίχιση φωτογραφίας και μετατόπιση

Αριθμός φωτογραφίας	Μετατόπιση (mm)
1	0
2	2.8
3	6.3
4	10.7
5	17.7
6	22.4
7	27.4
8	31.9
9	35.4
10	40

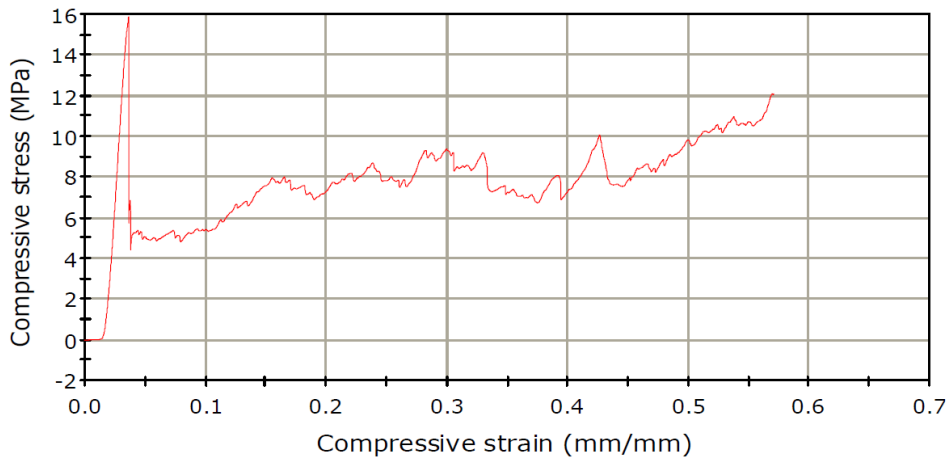




Σχήμα 3.7 Διάταξη εγκοπών για δοκίμιο 7



Διάγραμμα 3.13- Καμπύλη φορτίου (kN)–μετατόπισης (mm) κατά την θλίψη του δοκιμίου Νο 7



Διάγραμμα 3.14 – Καμπύλη τάσης (MPa) – παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο Νο 7

Πίνακας 3.14 : Πειραματικά αποτελέσματα για δοκίμιο Νο 7

Μέσο Φορτίο	P_{mean}	31.807	kN
Μέγιστο φορτίο	P_{max}	65.605	kN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου	$c.f.e$	0.48	%
Ενέργεια απορρόφησης	E_{abs}	1271.11	J

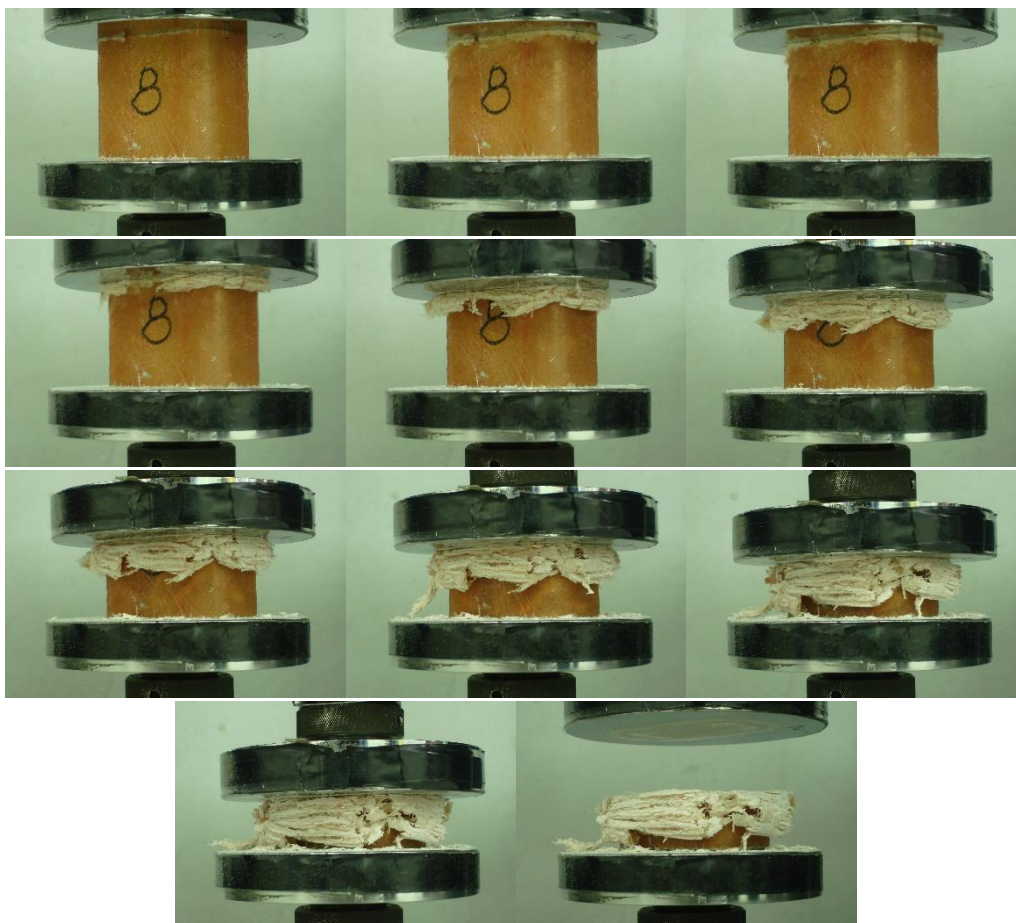
Διαδρομή εμβόλου για μέγιστο φορτίο	S'	2.56	mm
Συνολική διαδρομή εμβόλου:	S	40	mm

3.9 Δοκίμιο 8

Το δοκίμιο 8 αποτελεί ορθογωνικής διατομής κέλυφος χωρίς πυρήνα από αφρό πολυαιθυλενίου. Σε αυτό το δοκίμιο δημιουργήθηκαν εγκοπές στο ένα τρίτο του μήκους των των πλευρών του, πάχους 2mm και βάθους 4 mm .

Κατά την εξέλιξη του πειράματος παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευση με μικρο-θραύσεις του σύνθετου υλικού, με αποτέλεσμα να σχηματιστεί ζώνη θραύσης (μέτωπο κατάρρευσης), στο άνω άκρο του κελύφους, με μορφή μανιταριού (“mushrooming” failure).

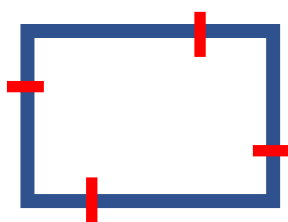
Κατά την δυναμική άσκηση φορτίου στο δοκίμιο καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο στα 96.855 KN για την τιμή βράχυνσης των 0.50 mm. Αρχικά παρατηρείται μεγάλη αύξηση του φορτίου με αντίστοιχη μικρή βράχυνση του δοκιμίου λόγω της προβαλλόμενης αντίστασης του υλικού.



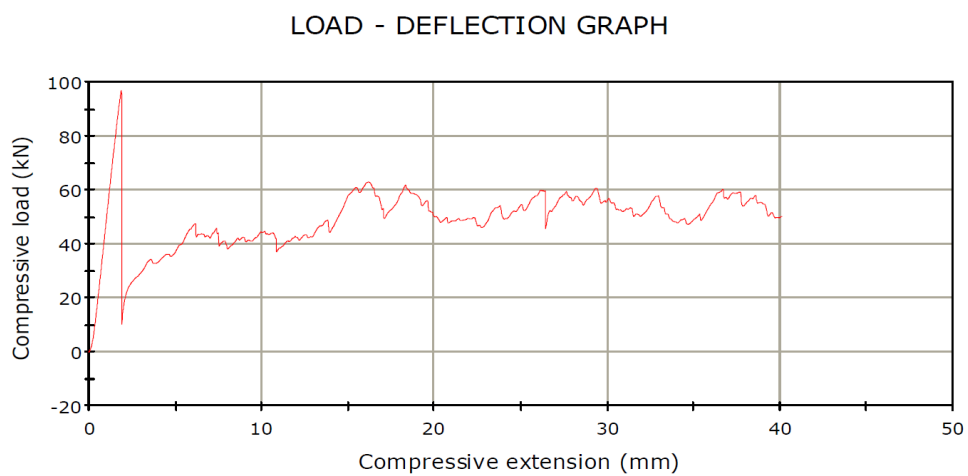
Εικ. 3-8- Προοδευτικές φάσεις θλίψης δοκιμίου 8

Πίνακας 3.15 Αντιστοίχιση φωτογραφίας και μετατόπιση

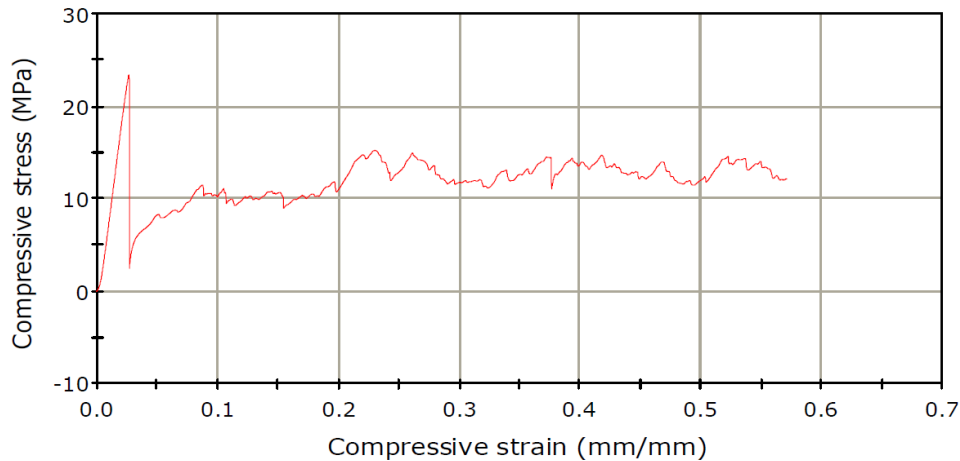
Αριθμός φωτογραφίας	Μετατόπιση (mm)
1	0
2	2.1
3	4.8
4	9.2
5	15.2
6	20.3
7	25.9
8	29.4
9	36.9
10	40



Σχήμα 3.8 Διάταξη εγκοπών για δοκίμιο 8



Διάγραμμα 3.15- Καμπύλη φορτίου (kN)–μετατόπισης (mm) κατά την θλίψη του δοκιμίου Νο 8



Διάγραμμα 3.16 – Καμπύλη τάσης (MPa) – παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο No 8

Πίνακας 3.16 : Πειραματικά αποτελέσματα για δοκίμιο No 8

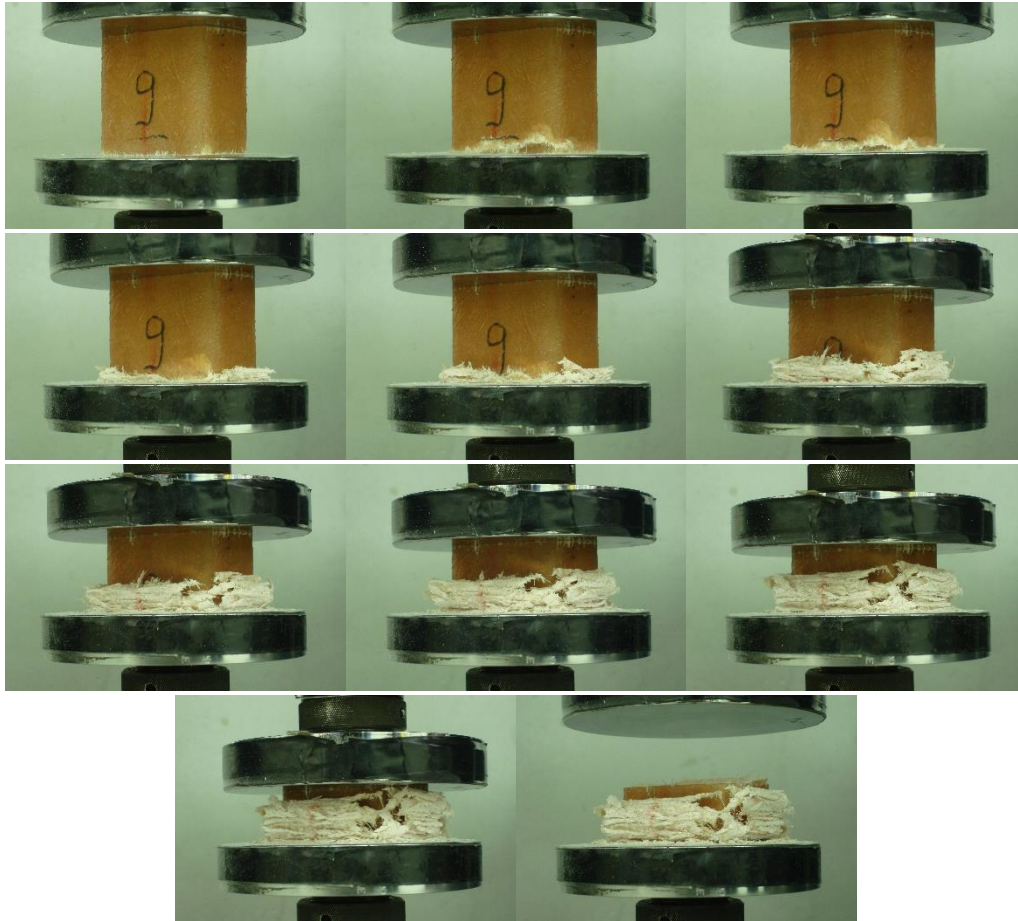
Μέσο Φορτίο	P_{mean}	49.188	kN
Μέγιστο φορτίο	P_{max}	96.855	kN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου	$c.f.e$	0.50	%
Ενέργεια απορρόφησης	E_{abs}	1966.94	J
Διαδρομή εμβόλου για μέγιστο φορτίο	S'	1.88	mm
Συνολική διαδρομή εμβόλου:	S	40	mm

3.10 Δοκίμιο 9

Το δοκίμιο 9 αποτελεί ορθογωνικής διατομής κέλυφος χωρίς πυρήνα από αφρό πολυαιθυλενίου. Σε αυτό το δοκίμιο δημιουργήθηκαν εγκοπές στο ένα τρίτο του μήκους των των πλευρών του, πάχους 2mm και βάθους 4 mm .

Κατά την εξέλιξη του πειράματος παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευση με μικρο-θραύσεις του σύνθετου υλικού, με αποτέλεσμα να σχηματιστεί ζώνη θραύσης (μέτωπο κατάρρευσης), στο κάτω άκρο του κελύφους, με μορφή μανιταριού (“mushrooming” failure).

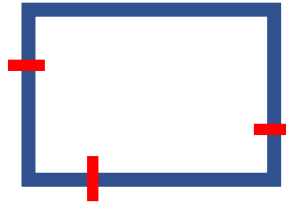
Κατά την δυναμική άσκηση φορτίου στο δοκίμιο καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο στα 54.548 KN για την τιμή βράχυνσης των 0.73 mm. Αρχικά παρατηρείται μεγάλη αύξηση του φορτίου με αντίστοιχη μικρή βράχυνση του δοκιμίου λόγω της προβαλλόμενης αντίστασης του υλικού.



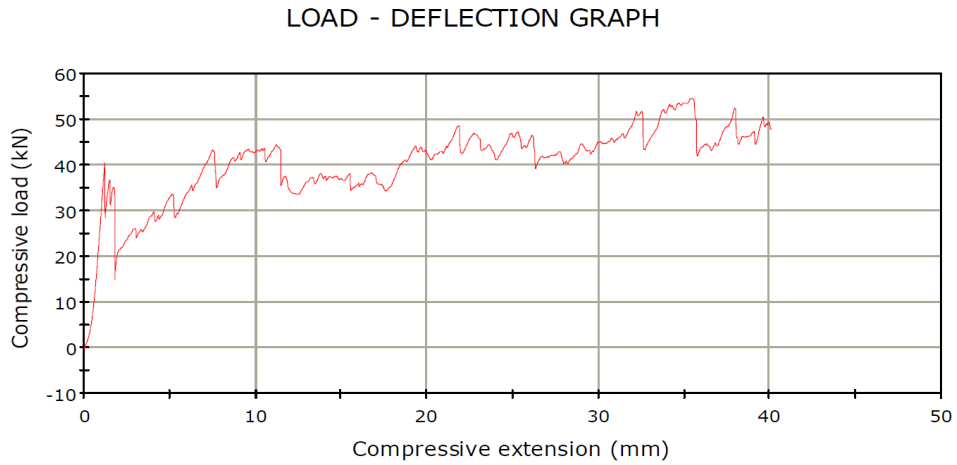
Εικ. 3-9 Προοδευτικές φάσεις θλίψης δοκιμίου 9

Πίνακας 3.17 Αντιστοίχιση φωτογραφίας και μετατόπιση

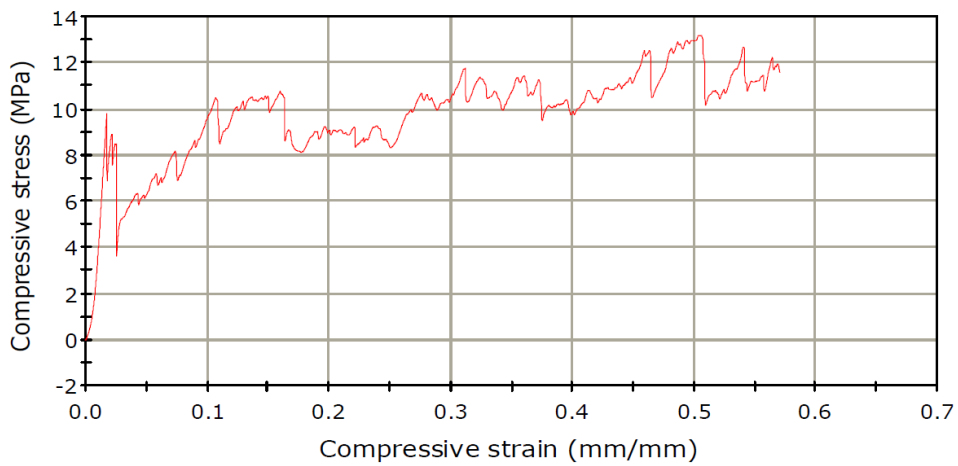
Αριθμός φωτογραφίας	Μετατόπιση (mm)
1	0
2	2
3	4.5
4	10.7
5	14.4
6	22
7	26.5
8	31.5
9	34.8
10	40



Σχήμα 3.9 Διάταξη εγκοπών για δοκίμιο 9



Διάγραμμα 3.17- Καμπύλη φορτίου (kN)–μετατόπισης (mm) κατά την θλίψη του δοκιμίου Νο 9



Διάγραμμα 3.18 – Καμπύλη τάσης (MPa) – παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο Νο 9

Πίνακας 3.18 : Πειραματικά αποτελέσματα για δοκίμιο Νο 9

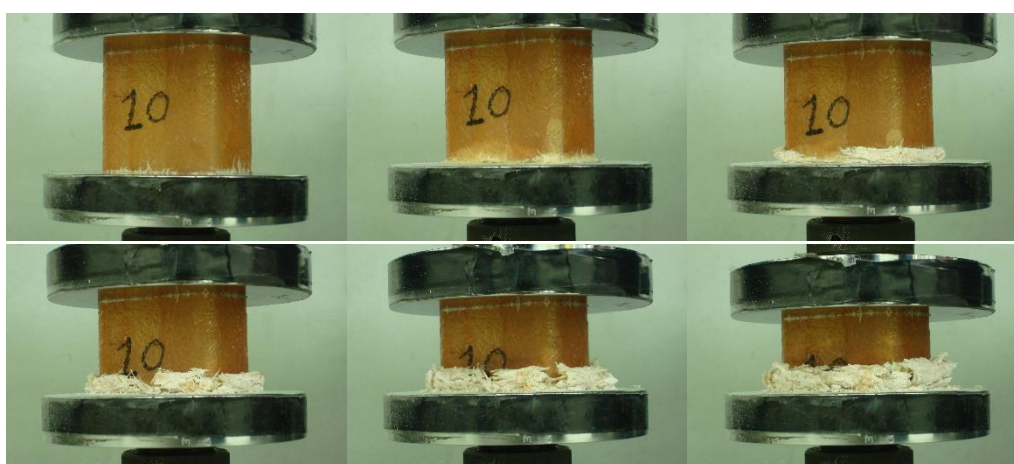
Μέσο Φορτίο	P_{mean}	40.291	kN
Μέγιστο φορτίο	P_{max}	54.548	kN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου	$c.f.e$	0.73	%
Ενέργεια απορρόφησης	E_{abs}	1611.53	J
Διαδρομή εμβόλου για μέγιστο φορτίο	S'	35.33	mm
Συνολική διαδρομή εμβόλου:	S	40	mm

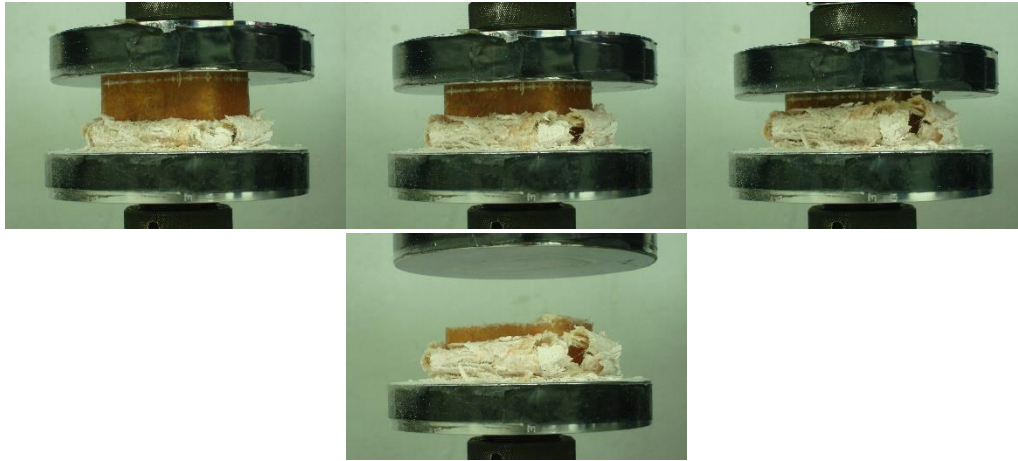
3.11 Δοκίμιο 10

Το δοκίμιο 10 αποτελεί ορθογωνικής διατομής κέλυφος χωρίς πυρήνα από αφρό πολυαιθυλενίου. Σε αυτό το δοκίμιο δεν δημιουργήθηκαν εγκοπές.

Κατά την εξέλιξη του πειράματος παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευση με μικρο-θραύσεις του σύνθετου υλικού, με αποτέλεσμα να σχηματιστεί ζώνη θραύσης (μέτωπο κατάρρευσης), στο κάτω άκρο του κελύφους, με μορφή μανιταριού (“mushrooming” failure).

Κατά την δυναμική άσκηση φορτίου στο δοκίμιο καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο στα 79.980 KN για την τιμή βράχυνσης των 1.96 mm. Αρχικά παρατηρείται μεγάλη αύξηση του φορτίου με αντίστοιχη μικρή βράχυνση του δοκιμίου λόγω της προβαλλόμενης αντίστασης του υλικού.



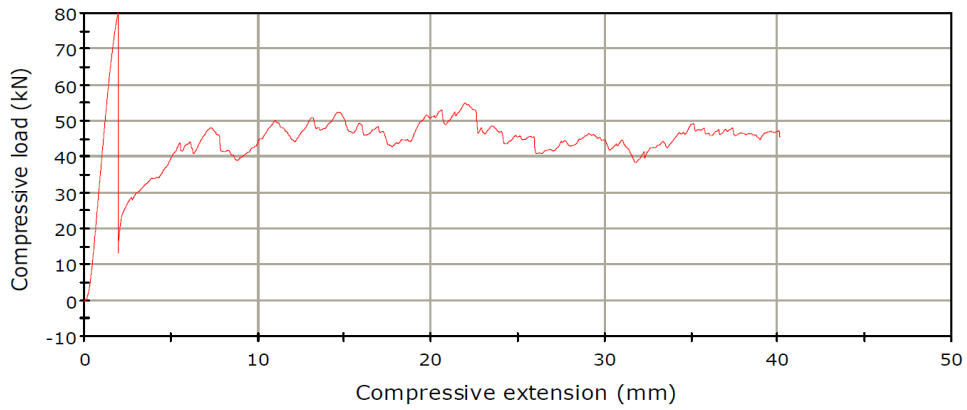


Εικ. 3-10 Προοδευτικές φάσεις θλίψης δοκιμίου 10

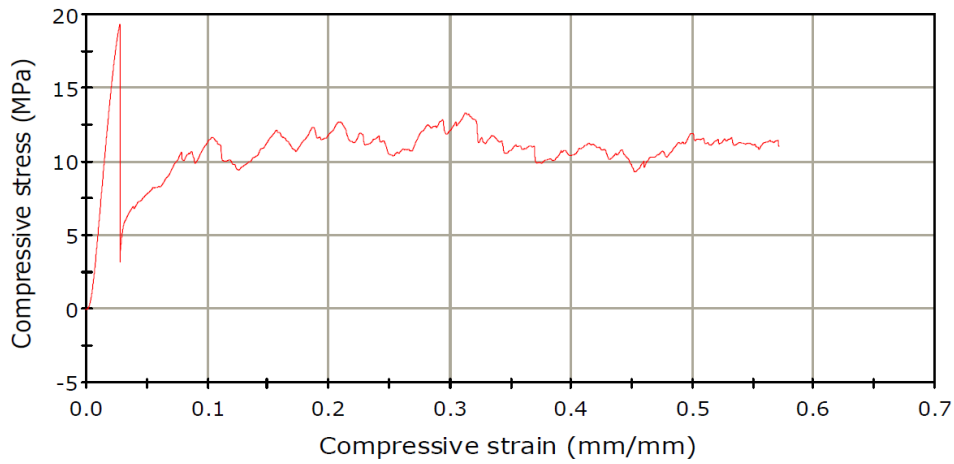
Πίνακας 3.19 Αντιστοίχιση φωτογραφίας και μετατόπιση

Αριθμός φωτογραφίας	Μετατόπιση (mm)
1	0
2	2.5
3	9.2
4	15.8
5	21.9
6	27.1
7	30.4
8	35.3
9	40

LOAD - DEFLECTION GRAPH



Διάγραμμα 3.19-Καμπύλη φορτίου (kN)-μετατόπισης (mm) κατά την θλίψη του δοκιμίου No 10



Διάγραμμα 3.20 – Καμπύλη τάσης (MPa) – παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο No 10

Πίνακας 3.20 : Πειραματικά αποτελέσματα για δοκίμιο No 10

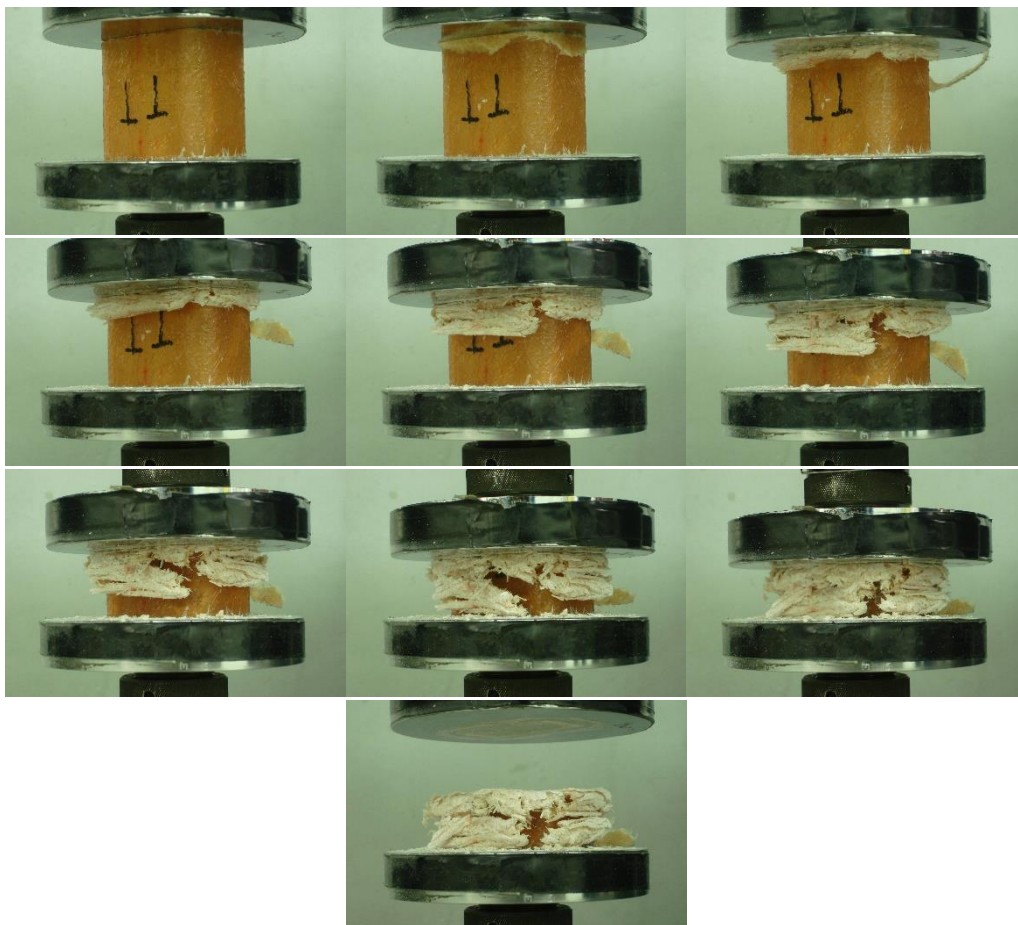
Μέσο Φορτίο	P_{mean}	44.507	kN
Μέγιστο φορτίο	P_{max}	79.980	kN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου	$c.f.e$	0.55	%
Ενέργεια απορρόφησης	E_{abs}	1780.16	J
Διαδρομή εμβόλου για μέγιστο φορτίο	S'	1.96	mm
Συνολική διαδρομή εμβόλου:	S	40	mm

3.12 Δοκίμιο 11

Το δοκίμιο 11 αποτελεί ορθογωνικής διατομής κέλυφος χωρίς πυρήνα από αφρό πολυαιθυλενίου. Σε αυτό το δοκίμιο δεν δημιουργήθηκαν εγχοπές.

Κατά την εξέλιξη του πειράματος παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευση με μικρο-θραύσεις του σύνθετου υλικού, με αποτέλεσμα να σχηματιστεί ζώνη θραύσης (μέτωπο κατάρρευσης), στο άνω άκρο του κελύφους, με μορφή μανιταριού (“mushrooming” failure).

Κατά την δυναμική άσκηση φορτίου στο δοκίμιο καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο στα 72.68 KN για την τιμή βράχυνσης των 2.29 mm. Αρχικά παρατηρείται μεγάλη αύξηση του φορτίου με αντίστοιχη μικρή βράχυνση του δοκιμίου λόγω της προβαλλόμενης αντίστασης του υλικού.

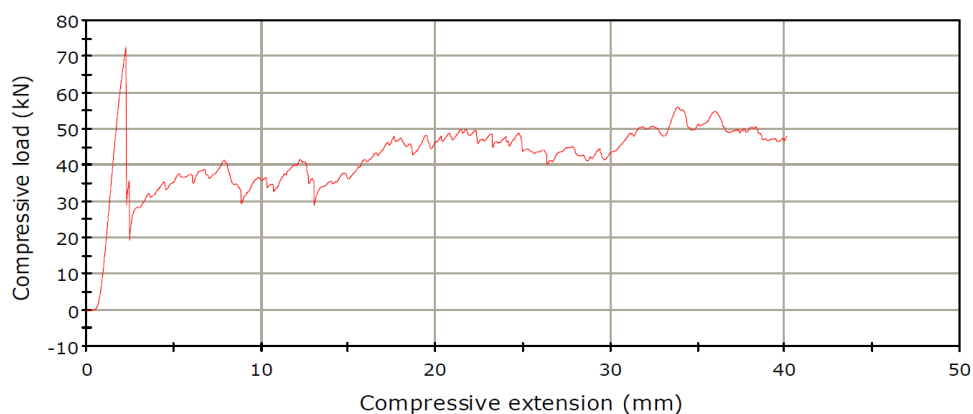


Εικ. 3-11 - Προοδευτικές φάσεις θλίψης δοκιμίου 11

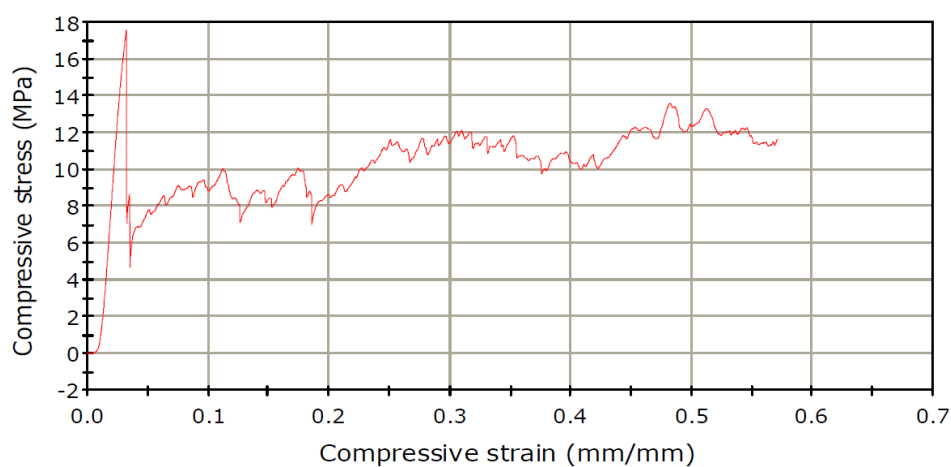
Πίνακας 3.21 Αντιστοίχιση φωτογραφίας και μετατόπισης

Αριθμός φωτογραφίας	Μετατόπιση (mm)
1	0
2	3.2
3	11.3
4	17
5	20.9
6	26.5
7	30.4
8	35.5
9	40

LOAD - DEFLECTION GRAPH



Διάγραμμα 3.21-Καμπύλη φορτίου (kN)–μετατόπισης (mm) κατά την θλίψη του δοκιμίου Νο 11



Διάγραμμα 3.22 – Καμπύλη τάσης (MPa) – παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο Νο 11

Πίνακας 3.22 : Πειραματικά αποτελέσματα για δοκίμιο Νο 11

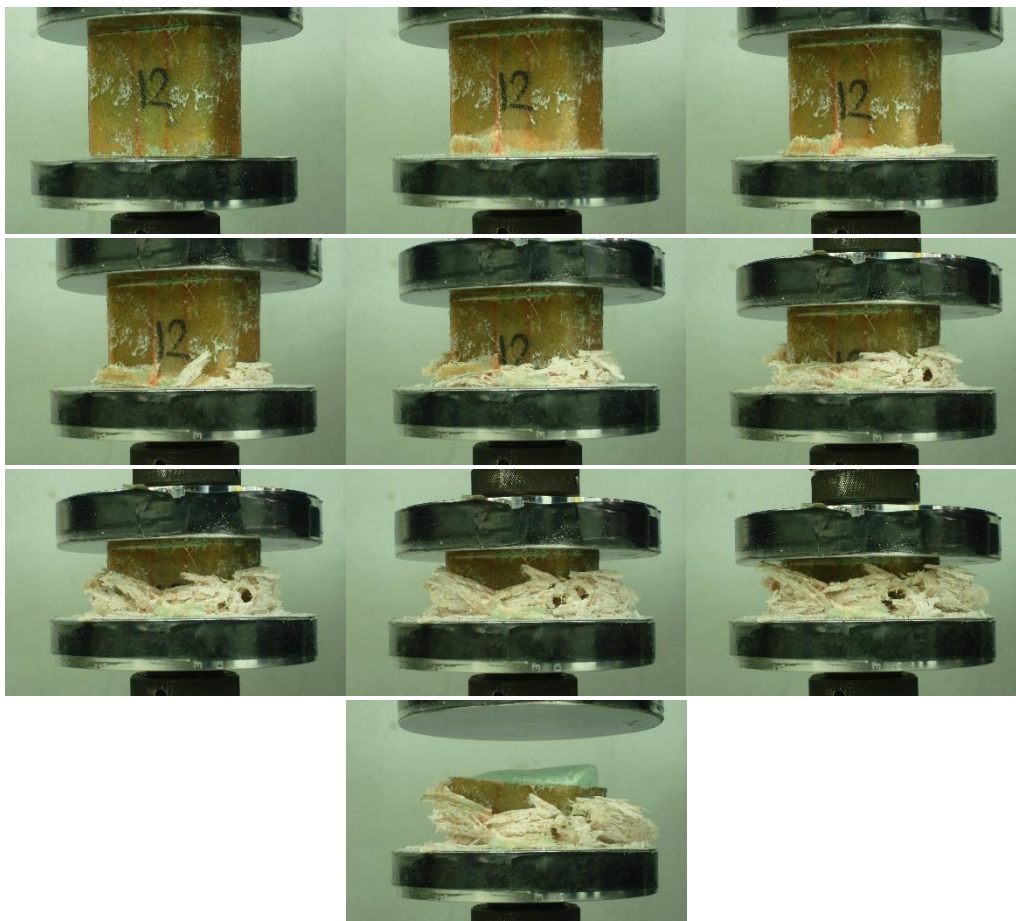
Μέσο Φορτίο	P_{mean}	42.135	kN
Μέγιστο φορτίο	P_{max}	72.68	kN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου	$c.f.e$	0.57	%
Ενέργεια απορρόφησης	E_{abs}	1684.89	J
Διαδρομή εμβόλου για μέγιστο φορτίο	S'	2.29	mm
Συνολική διαδρομή εμβόλου:	S	40	mm

3.13 Δοκίμιο 12

Το δοκίμιο 12 αποτελεί ορθογωνικής διατομής κέλυφος με πυρήνα από αφρό πολυαιθυλενίου. Σε αυτό το δοκίμιο δεν δημιουργήθηκαν εγκοπές.

Κατά την εξέλιξη του πειράματος παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευση με μικρο-θραύσεις του σύνθετου υλικού, με αποτέλεσμα να σχηματιστεί ζώνη θραύσης (μέτωπο κατάρρευσης), στο κάτω άκρο του κελύφους, με μορφή μανιταριού (“mushrooming” failure).

Κατά την δυναμική άσκηση φορτίου στο δοκίμιο καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο στα 86.114 KN για την τιμή βράχυνσης των 0.53 mm. Αρχικά παρατηρείται μεγάλη αύξηση του φορτίου με αντίστοιχη μικρή βράχυνση του δοκιμίου λόγω της προβαλλόμενης αντίστασης του υλικού.

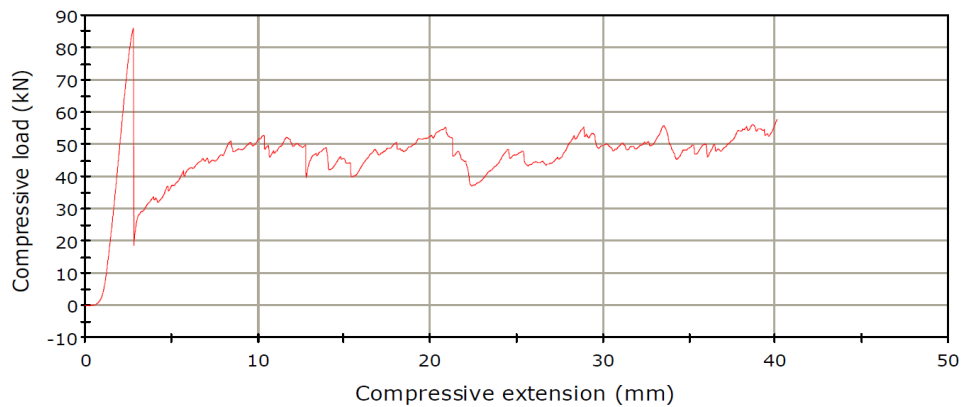


Εικ. 3-12 Προοδευτικές φάσεις θλίψης δοκιμίου 12

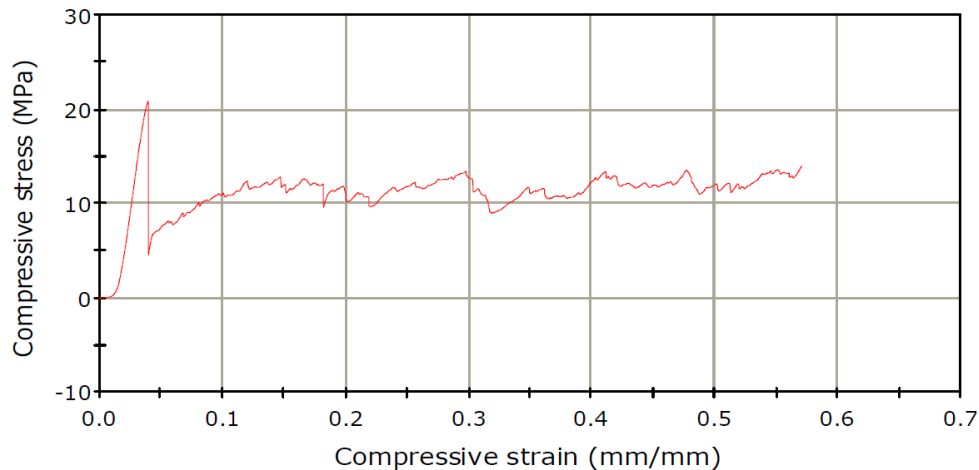
Πίνακας 3.23 Αντιστοίχιση φωτογραφίας και μετατόπιση

Αριθμός φωτογραφίας	Μετατόπιση (mm)
1	0
2	3.5
3	7.7
4	12.8
5	21.8
6	28.1
7	31.5
8	35.6
9	40

LOAD - DEFLECTION GRAPH



Διάγραμμα 3.23-Καμπύλη φορτίου (kN)-μετατόπισης (mm) κατά την θλίψη του δοκιμίου No 12



Διάγραμμα 3.24 – Καμπύλη τάσης (MPa) – παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο No 12

Πίνακας 3.24 : Πειραματικά αποτελέσματα για δοκίμιο No 1

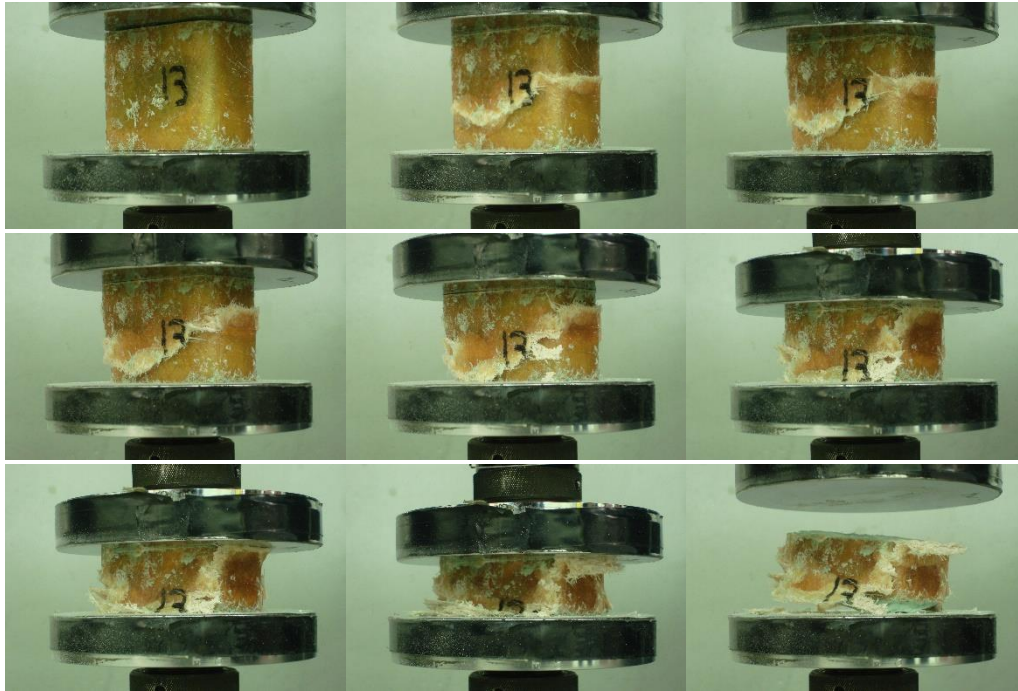
Μέσο Φορτίο	P_{mean}	45.910	kN
Μέγιστο φορτίο	P_{max}	86.114	kN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου	$c.f.e$	0.53	%
Ενέργεια απορρόφησης	E_{abs}	1831.872	J
Διαδρομή εμβόλου για μέγιστο φορτίο	S'	2.80	mm
Συνολική διαδρομή εμβόλου:	S	40	mm

3.14 Δοκίμιο 13

Το δοκίμιο 13 αποτελεί ορθογωνικής διατομής κέλυφος με πυρήνα από αφρό πολυαιθυλενίου. Σε αυτό το δοκίμιο δεν δημιουργήθηκαν εγκοπές.

Κατά την εξέλιξη του πειράματος παρατηρήθηκε ο σχηματισμός μια εγκάρσιας ζώνης θραύσης (μέτωπο κατάρρευσης), στο μέσο του κελύφους. Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων βρέθηκε ότι ο σχηματισμός της ανωτέρω ζώνης μείωσε δραματικά την συνολική ενέργεια απορρόφησης του συγκεκριμένου δοκιμίου.

Κατά την δυναμική άσκηση φορτίου στο δοκίμιο καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο στα 84.139 KN για την τιμή βράχυνσης των 0.15 mm. Αρχικά παρατηρείται μεγάλη αύξηση του φορτίου με αντίστοιχη μικρή βράχυνση του δοκιμίου λόγω της προβαλλόμενης αντίστασης του υλικού.

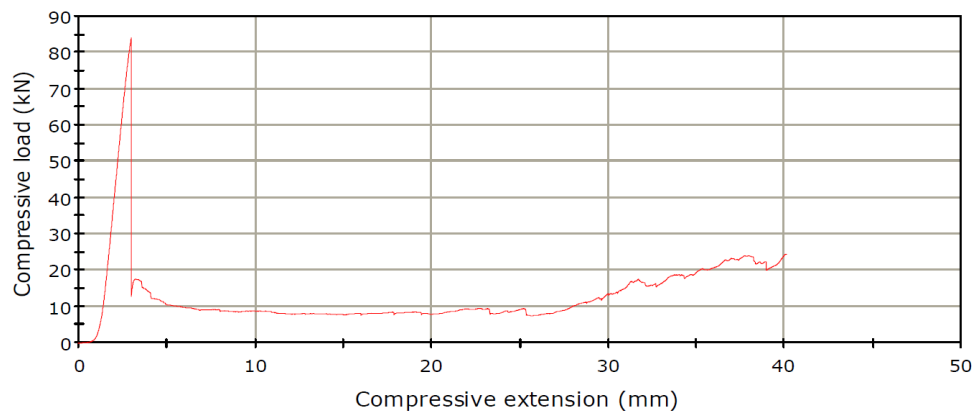


Εικ. 3-13 Προοδευτικές φάσεις θλίψης δοκιμίου 13

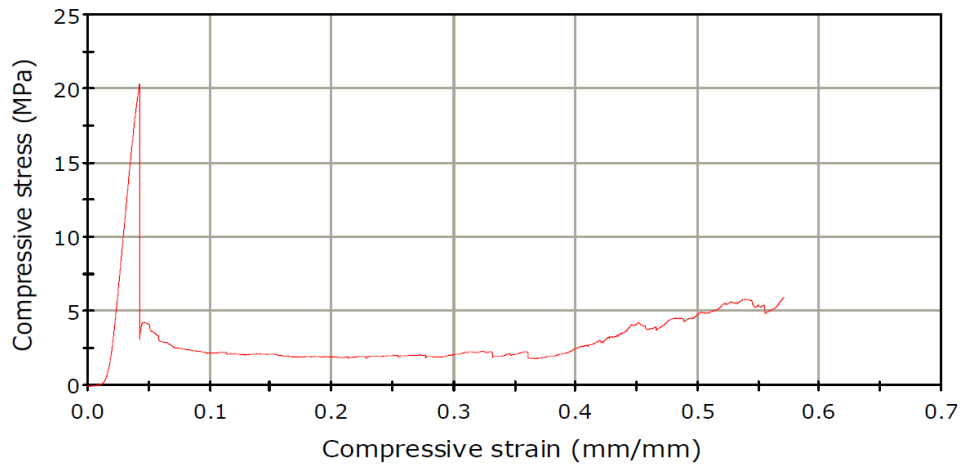
Πίνακας 3.25 Αντιστοίχιση φωτογραφίας και μετατόπιση

Αριθμός φωτογραφίας	Μετατόπιση (mm)
1	0
2	3.8
3	7.8
4	18.8
5	19
6	30
7	35
8	40

LOAD - DEFLECTION GRAPH



Διάγραμμα 3.25-Καμπύλη φορτίου (kN)–μετατόπισης (mm) κατά την θλίψη του δοκιμίου No 13



Διάγραμμα 3.26 – Καμπύλη τάσης (MPa) – παραμόρφωσης (%) για δοκίμιο No 13

Πίνακας 3.26 : Πειραματικά αποτελέσματα για δοκίμιο No 13

Μέσο Φορτίο	P_{mean}	13.084	kN
Μέγιστο φορτίο	P_{max}	84.139	kN
Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου	$c.f.e$	0.15	%
Ενέργεια απορρόφησης	E_{abs}	522.96	J
Διαδρομή εμβόλου για μέγιστο φορτίο	S'	2.98	mm
Συνολική διαδρομή εμβόλου:	S	40	mm

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

4.1 Μελέτη αποτελεσμάτων

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει παρουσίαση των αποτελεσμάτων του πειράματος που εκτελέστηκε στο σύνολο των δοκιμίων.

4.2 Συνολικά αποτελέσματα

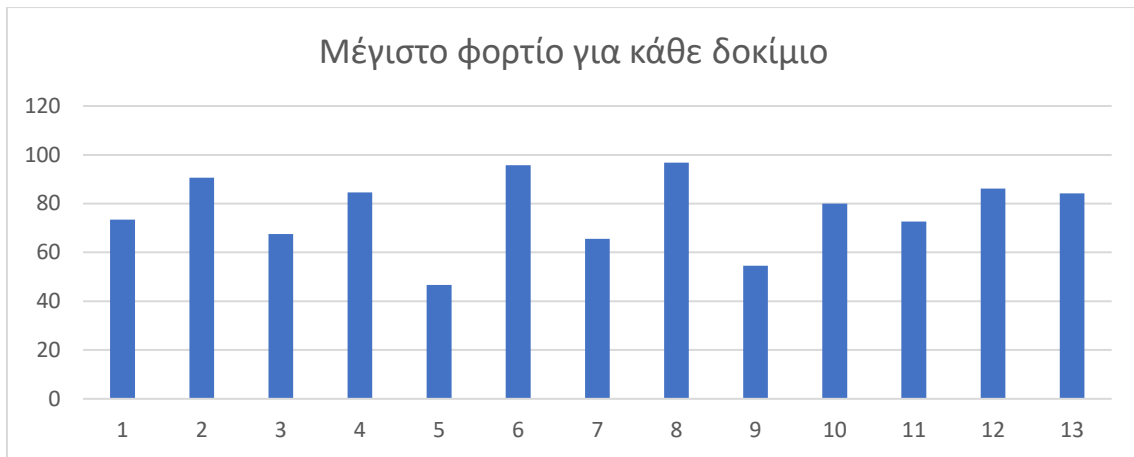
Στο κάτωθι πίνακα παρουσιάζονται το σύνολο των αποτελεσμάτων για τα δοκίμια:

Πίνακας 4.1 : Συνολικά αποτελέσματα πειράματος για σύνολο δοκιμών

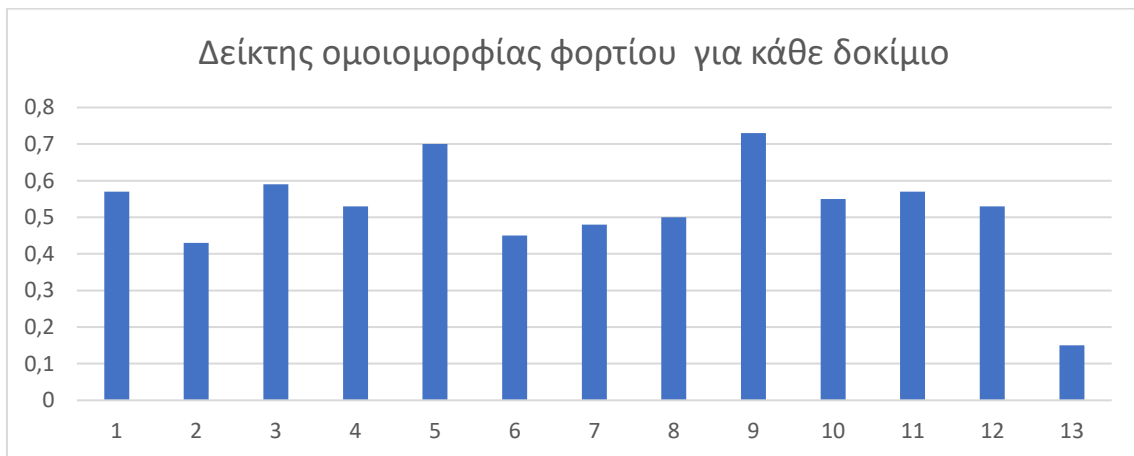
Δοκίμιο	Μέσο Φορτίο	Μέγιστο φορτίο	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου	Ενέργεια απορρόφησης	Διαδρομή εμβόλου για μέγιστο φορτίο	Συνολική διαδρομή εμβόλου
	P _{mean} (KN)	P _{max} (KN)	c.f.e	J	S' (mm)	S (mm)
1	42.241	73.424	0.57	1689.5	2.16	40
2	39.413	90.616	0.43	1576.5	1.93	40
3	39.924	67.527	0.59	1596.8	1.57	40
4	45.511	84.56	0.53	1820.3	2.34	40
5	34.02	46.611	0.7	1360.4	1.6	40
6	43.954	95.72	0.45	1757.61	1.87	40
7	31.807	65.605	0.48	1271.1	2.56	40
8	49.188	96.855	0.5	1966.9	1.88	40
9	40.291	54.548	0.73	1611.5	35.33	40
10	44.507	79.98	0.55	1780.2	1.96	40
11	42.135	72.68	0.57	1684.9	2.29	40
12	45.91	86.114	0.53	1831.87	2.8	40
13	13.084	84.139	0.15	522.96	2.98	40



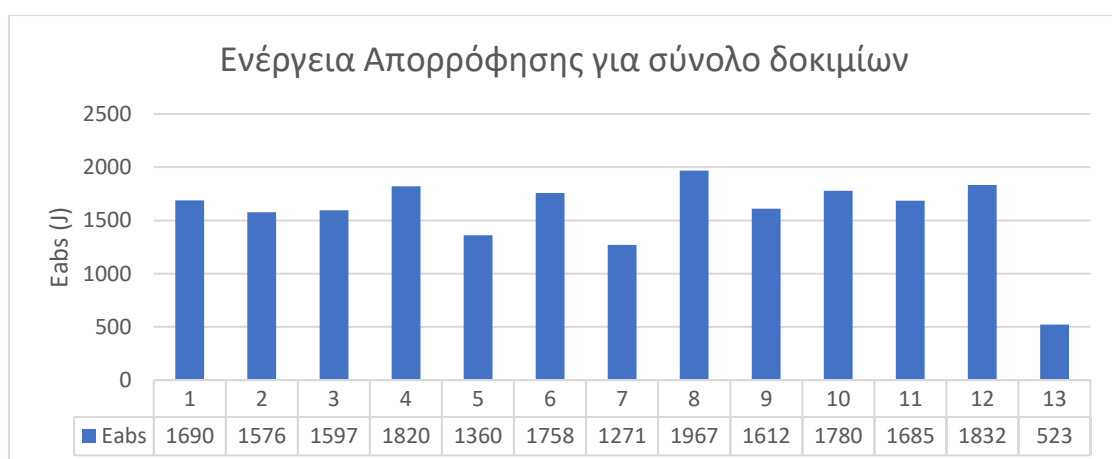
Διάγραμμα 4.1 Διάγραμμα μέσου φορτίου για σύνολο δοκιμών



Διάγραμμα 4.2 Διάγραμμα μέγιστου φορτίου για σύνολο δοκιμών



Διάγραμμα 4.3 Διάγραμμα δείκτη ομοιομορφίας φορτίου για σύνολο δοκιμών



Διάγραμμα 4.4 Διάγραμμα ενέργειας απορρόφησης φορτίου για σύνολο δοκιμών

4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων για δοκίμια με πυρήνα αφρού και χωρίς πυρήνα αφρού

Στην παρούσα ενότητα γίνεται σύγκριση των δοκιμών τα οποία περιέχουν πυρήνα αφρού σε σχέση με αυτά που δεν περιέχουν.

Πίνακας 4.2 Πίνακας ποσοστιαίας διαφορά τιμής μέσου φορτίου δοκιμών με πυρήνα αφρού σε σχέση με δοκίμια χωρίς πυρήνα αφρού.

Περιγραφή Δοκιμίου	Δοκίμιο	Μέσο Φορτίο	Μέση τιμή	Ποσοστό απόκλισης μέσου φορτίου δοκιμών με πυρήνα αφρού και δοκιμών χωρίς πυρήνα αφρού
		P _{mean}		
		KN	KN	%
Εγκοπές στις γωνίες, γέμιση με αφρό	1	42.241	42.241	+6%
Εγκοπές στις γωνίες	2	39.413	39.6685	
Εγκοπές στις γωνίες	3	39.924		
Εγκοπές στα μέσα των πλευρών, γέμιση με αφρό	4	45.511	45.511	+14%
Εγκοπές στα μέσα των πλευρών	5	34.02	38.987	
Εγκοπές στα μέσα των πλευρών	6	43.954		
Εγκοπές στο 1/3 των πλευρών, γέμιση με αφρό	7	31.807	31.807	-29%
Εγκοπές στο 1/3 των πλευρών	8	49.188	44.7395	
Εγκοπές στο 1/3 των πλευρών	9	40.291		
Χωρίς εγκοπές, γέμιση με αφρό	12	45.91	45.91	+6%
Χωρίς εγκοπές, γέμιση με αφρό	13	13.084	-	
Χωρίς εγκοπές	10	44.507	43.321	
Χωρίς εγκοπές	11	42.135		

Πίνακας 4.3 Πίνακας ποσοστιαίας διαφοράς μεγίστου φορτίου δοκιμών με πυρήνα αφρού σε σχέση με δοκίμια χωρίς πυρήνα αφρού.

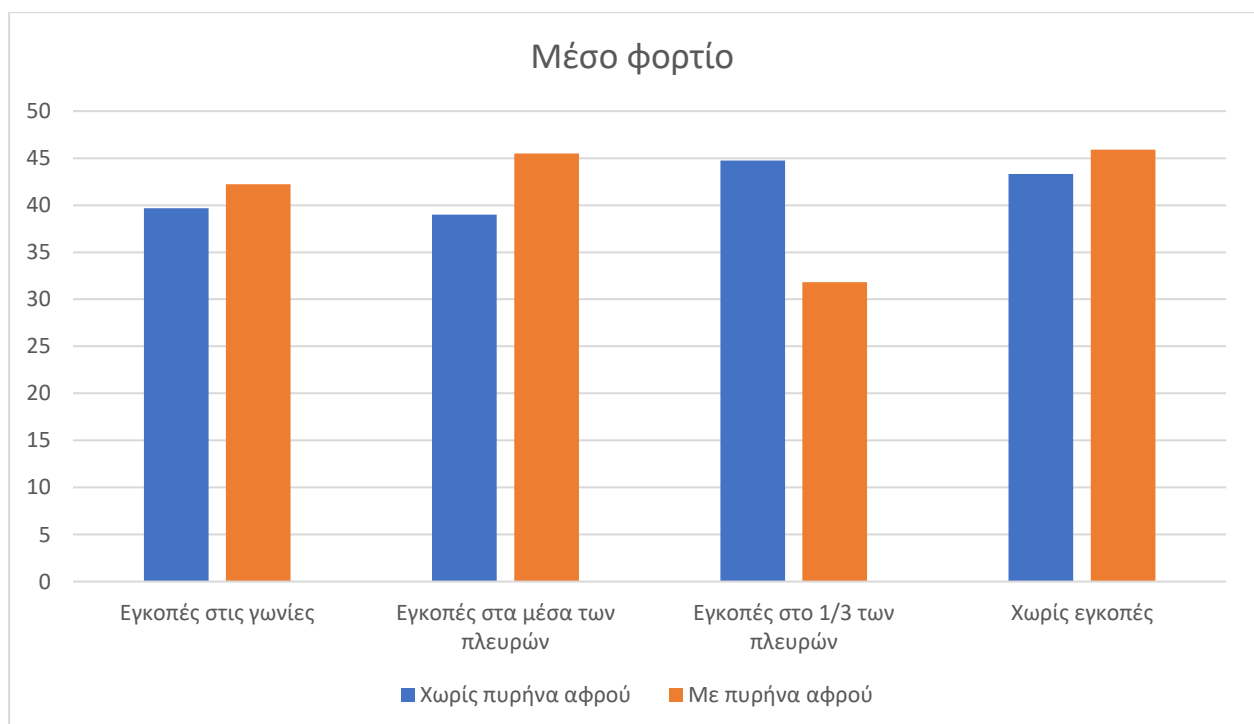
Περιγραφή Δοκιμίου	Δοκίμιο	Μέγιστο φορτίο	Μέση τιμή	Ποσοστό απόκλισης μεγίστου φορτίου δοκιμών με πυρήνα αφρού και δοκιμών χωρίς πυρήνα αφρού
		P _{max}		
		KN	KN	%

Εγκοπές στις γωνίες, γέμιση με αφρό	1	73.424	73.424	-8%
Εγκοπές στις γωνίες	2	90.616	79.0715	
Εγκοπές στις γωνίες	3	67.527		
Εγκοπές στα μέσα των πλευρών, γέμιση με αφρό	4	84.56	84.56	+16%
Εγκοπές στα μέσα των πλευρών	5	46.611	71.1655	
Εγκοπές στα μέσα των πλευρών	6	95.72		
Εγκοπές στο 1/3 των πλευρών, γέμιση με αφρό	7	65.605	65.605	-15%
Εγκοπές στο 1/3 των πλευρών	8	96.855	75.7015	
Εγκοπές στο 1/3 των πλευρών	9	54.548		
Χωρίς εγκοπές	10	79.98	76.33	+10%
Χωρίς εγκοπές	11	72.68		
Χωρίς εγκοπές, γέμιση με αφρό	12	86.114	85.1265	
Χωρίς εγκοπές, γέμιση με αφρό	13	84.139		

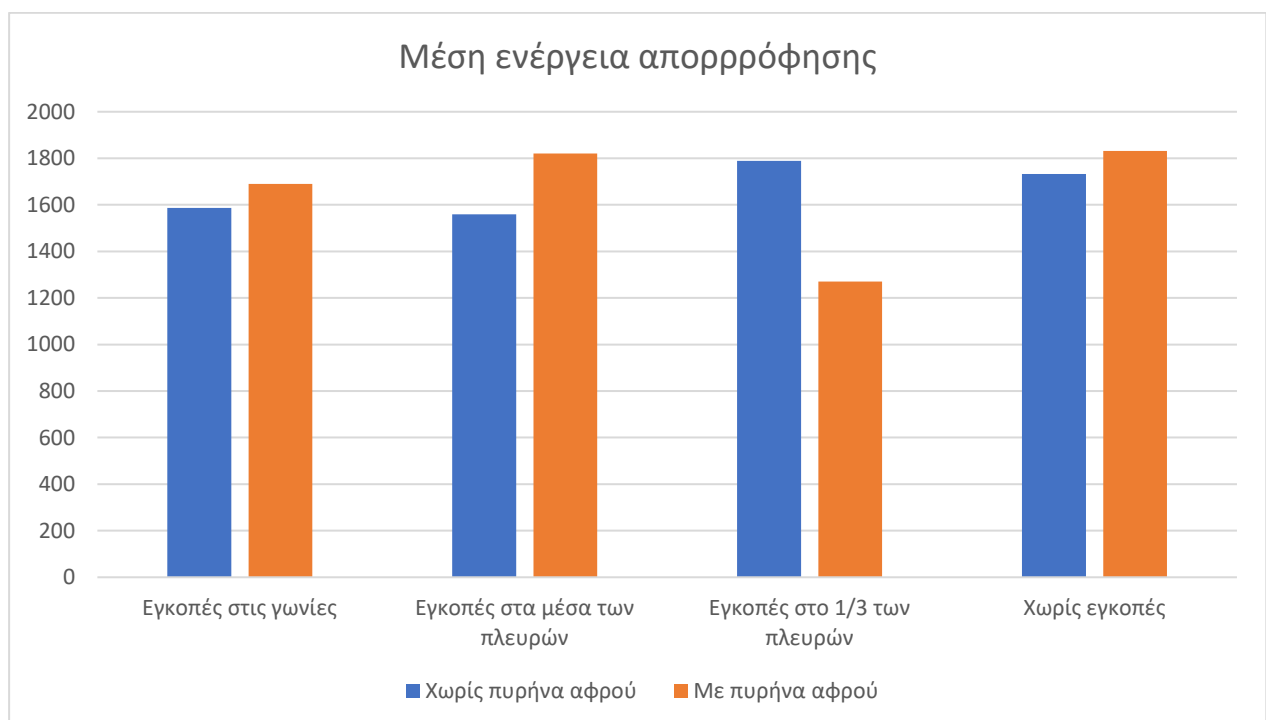
Πίνακας 4.4 Πίνακας ποσοστιαίας διαφοράς μέσου δείκτη ομοιομορφίας φορτίου δοκιμίων με πυρήνα αφρού σε σχέση με δοκίμια χωρίς πυρήνα αφρού.

Περιγραφή Δοκιμίου	Δοκίμιο	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου	Μέση τιμή	Ποσοστιαία διαφορά δείκτη φορτίου δοκιμίων με πυρήνα αφρού και δοκιμίων χωρίς πυρήνα αφρού
		c.f.e		%
Εγκοπές στις γωνίες, γέμιση με αφρό	1	0.57	0.57	+11%
Εγκοπές στις γωνίες	2	0.43	0.51	
Εγκοπές στις γωνίες	3	0.59		
Εγκοπές στα μέσα των πλευρών, γέμιση με αφρό	4	0.53	0.53	-8%

Εγκοπές στα μέσα των πλευρών	5	0.7	0.575	
Εγκοπές στα μέσα των πλευρών	6	0.45		
Εγκοπές στο 1/3 των πλευρών, γέμιση με αφρό	7	0.48	0.48	-28%
Εγκοπές στο 1/3 των πλευρών	8	0.5	0.615	
Εγκοπές στο 1/3 των πλευρών	9	0.73		
Χωρίς εγκοπές	10	0.55	0.56	-6%
Χωρίς εγκοπές	11	0.57		
Χωρίς εγκοπές, γέμιση με αφρό	12	0.53	0.53	
Χωρίς εγκοπές, γέμιση με αφρό	13	0.15		



Διάγραμμα 4.5 – 4.6 Διάγραμμα μέσου φορτίου για δοκίμια με και χωρίς πυρήνα αφρού, συναρτήσει της γεωμετρίας των εγκοπών που δημιουργήθηκαν



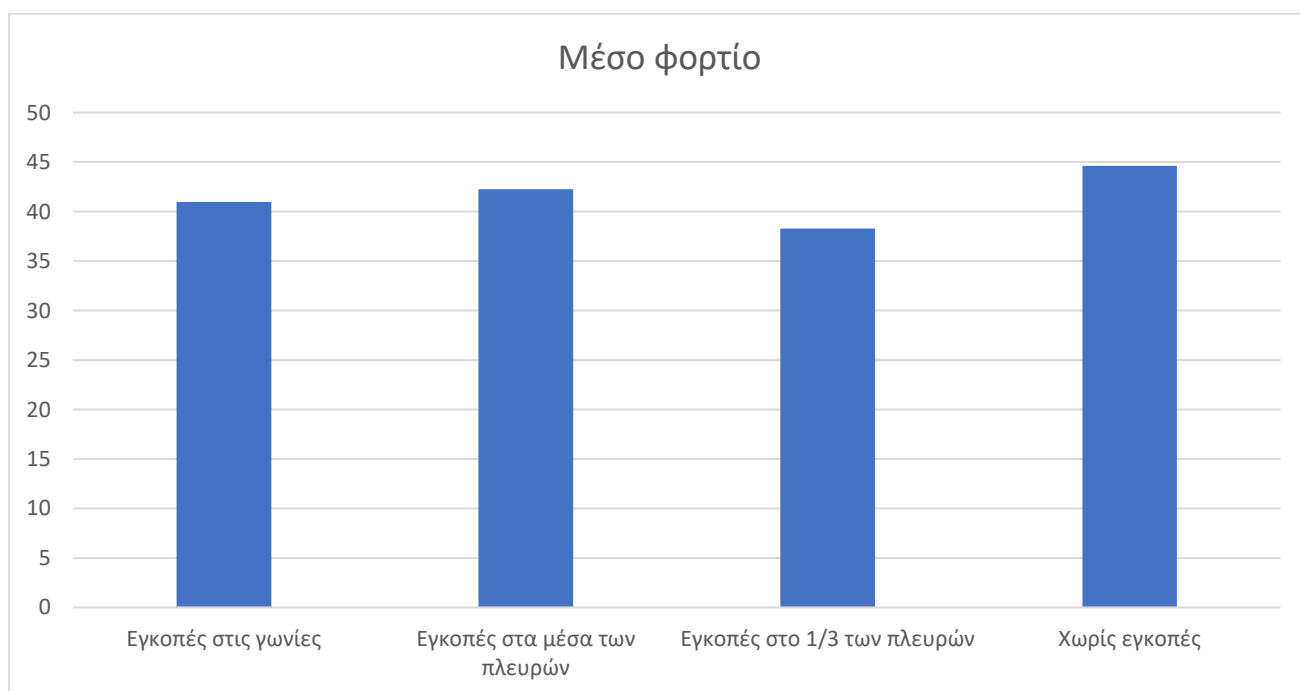
Διάγραμμα 4.7 Διάγραμμα μέσης ενέργειας απορρόφησης για δοκίμια με και χωρίς πυρήνα αφρού συναρτήσει της γεωμετρίας των εγκοπών που δημιουργήθηκαν

4.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων για επίδραση γεωμετρίας εγκοπών

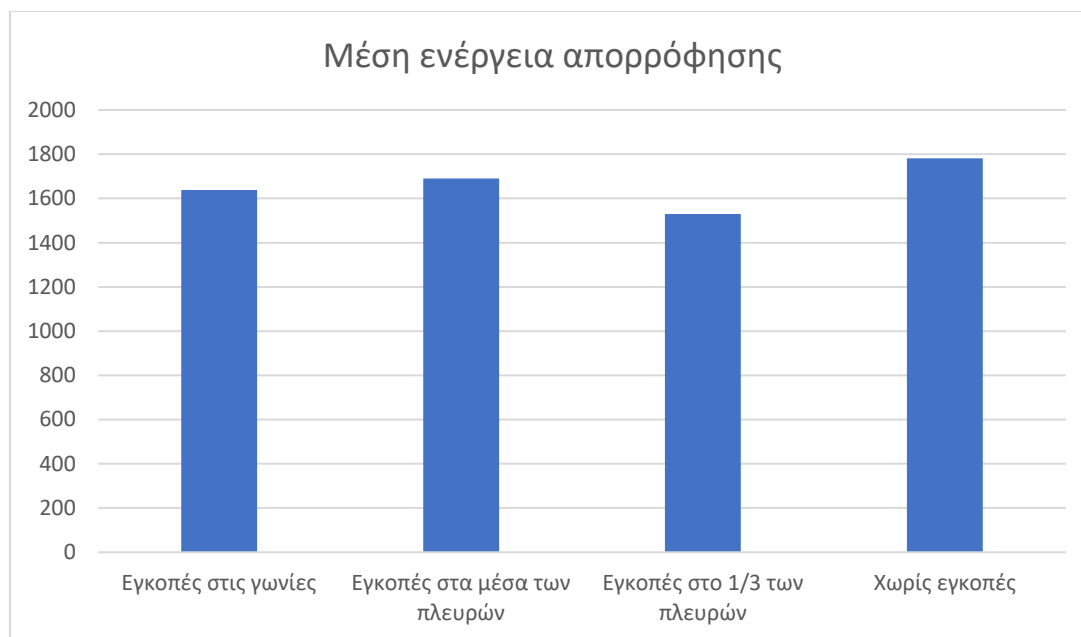
Στην παρούσα ενότητα γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων για την επίδραση της γεωμετρίας των εγκοπών οι οποίες δημιουργήθηκαν στα διαφορετικά δοκίμια. Παρουσιάζονται μόνο τα αποτελέσματα για το δοκίμιο τα οποία δεν είχαν πυρήνα αφρού για να παρατηρήσουμε καλύτερα την επίδραση των εγκοπών στην συμπεριφορά των δοκιμίων

Πίνακας 4.5. Αποτελέσματα για δοκίμια χωρίς πυρήνα αφρού.

	Δοκιμιο	Μέσο Φορτίο	Μέγιστο φορτίο	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου	Ενέργεια απορρόφησης
		P_{mean}	P_{max}	$c.f.e$	J
Εγκοπές στις γωνίες	2	39.413	90.616	0.43	1576.45
Εγκοπές στις γωνίες	3	39.924	67.527	0.59	1596.84
Εγκοπές στα μέσα των πλευρών	5	34.02	46.611	0.7	1360.36
Εγκοπές στα μέσα των πλευρών	6	43.954	95.72	0.45	1757.606
Εγκοπές στο 1/3 των πλευρών	8	49.188	96.855	0.5	1966.94
Εγκοπές στο 1/3 των πλευρών	9	40.291	54.548	0.73	1611.53
Χωρίς εγκοπές	12	45.91	86.114	0.53	1831.872
Χωρίς εγκοπές	13	13.084	84.139	0.15	522.96



Διάγραμμα 4.8 . Διάγραμμα μέσου φορτίου για δοκίμια χωρίς πυρήνα αφρού



Διάγραμμα 4.9 Διάγραμμα ενέργειας απορρόφησης για δοκίμια χωρίς πυρήνα αφρού

Πίνακας 4.6 Ποσοστιαία διαφορά δοκιμίων με εγκοπές και δοκιμίου χωρίς εγκοπές

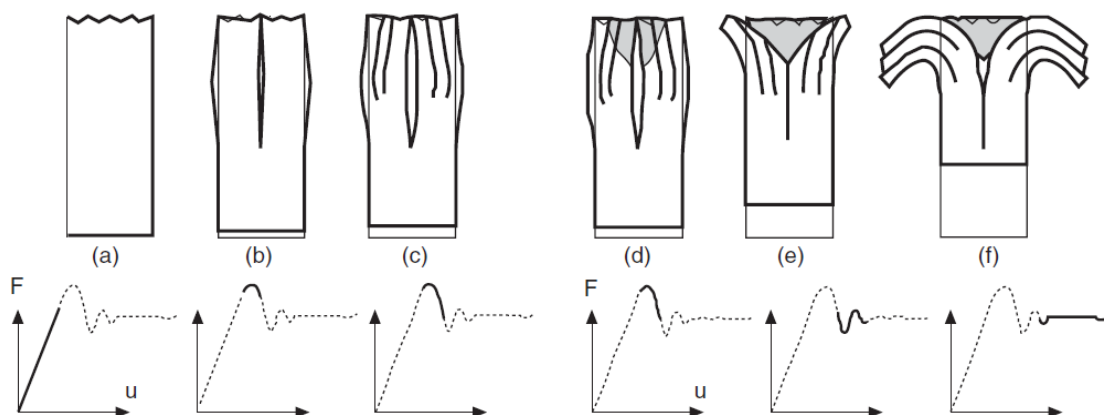
Γεωμετρία εγκοπών	Δοκίμιο	Μέσο Φορτίο	Μέση τιμή	Ποσοστιαία διαφορά από δοκίμιο χωρίς εγκοπές	Ενέργεια απορρόφησης	Μέση τιμή	Ποσοστιαία διαφορά από δοκίμιο χωρίς εγκοπές
	#	P_{mean}	P_{mean}	%	J	J	%
Εγκοπές στις γωνίες [Δοκίμιο 2]	2	39.413	39.669	-16%	1576.45	1586.65	-15%
Εγκοπές στις γωνίες [Δοκίμιο 3]	3	39.924			1596.84		
Εγκοπές στα μέσα των πλευρών [Δοκίμιο 5]	5	34.02	38.987	-18%	1360.36	1558.98	-18%
Εγκοπές στα μέσα των πλευρών [Δοκίμιο 6]	6	43.954			1757.606		
Εγκοπές στο 1/3 των πλευρών [Δοκίμιο 8]	8	49.188	44.74	-3%	1966.94	1789.24	-2%
Εγκοπές στο 1/3 των	9	40.291			1611.53		

πλευρών [Δοκίμιο 9]							
Χωρίς εγκοπές [Δοκίμιο 12]	12	45.91	45.91	-	1831.872	1831.87	-
Χωρίς εγκοπές [Δοκίμιο 13]	13	13.084			522.96		

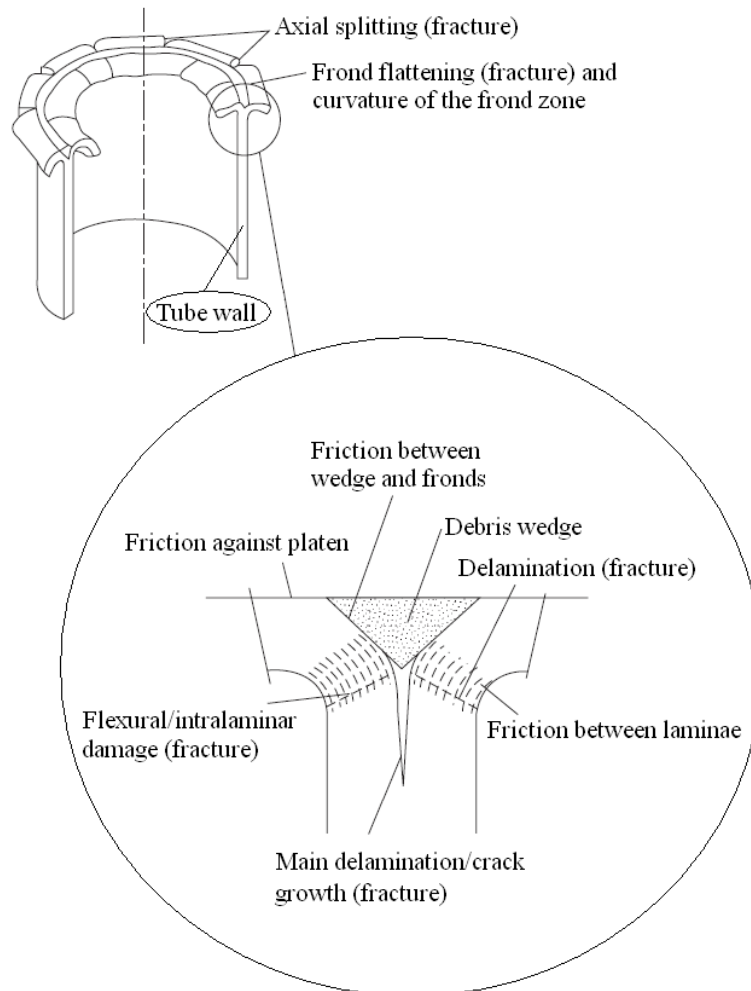
4.5 Συμπεράσματα

4.5.1 Γενικές παρατηρήσεις - συμπεράσματα

Στα σύνθετα κελύφη, υπό συνθήκες αξονικής συμπίεσης, διαπιστώθηκε ευσταθής, προοδευτικός και ελεγχόμενος τρόπος (μοτίβο) κατάρρευσης. Η συνολική ακολουθία κατάρρευσης, και τα μακροσκοπικά μοτίβα που τη συνιστούν, διέπουν την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του κελύφους. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε προοδευτική κατάρρευση με μικρό-θραύσεις του σύνθετου υλικού, συνοδευόμενη από υψηλά ποσά ενέργειας απορρόφησης, με αποτέλεσμα να σχηματιστεί ζώνη θραύσης (μέτωπο κατάρρευσης), στο ένα ή και στα δύο άκρα του κελύφους, σε μορφή μανιταριού (“mushrooming” failure). Οι εσωτερικές στρώσεις συγκλίνουν ακτινικά - συμπιεζόμενες περιφερικά - προς το εσωτερικό του δοκιμίου, ενώ οι εξωτερικές στρώσεις εκτείνονται προς το εξωτερικό του, εφελκόμενες περιφερικά. Ο διαχωρισμός των στρώσεων λαμβάνει χώρα περίπου στο μέσο του τοιχώματος, οφειλόμενος στην κεντρική διαμήκη ρωγμή διαστρωματικής αποκόλλησης (αποκόλληση δύο διαδοχικών στρώσεων στη συγκεκριμένη - περίπου μέση - διάμετρο του κελύφους) Το μοτίβο αυτό κατάρρευσης χαρακτηρίζεται ως “progressive crushing splaying mode” και αποτελεί τον αποδοτικότερο τρόπο αξονικής θλιπτικής κατάρρευσης σύνθετου κελύφους με κριτήριο την απορρόφηση ενέργειας και τα επιμέρους χαρακτηριστικά αξιολόγησής της. [15-18].



Εικόνα 4-1: Μηχανισμός ανάπτυξης μετώπου (ευσταθούς) κατάρρευσης (crash-front) σύνθετου σωλήνα (τοιχώμα) σε αξονική συμπίεση (σχηματικά) και συσχέτιση με τα αντίστοιχα τμήματα του διαγράμματος φορτίου-μετατόπισης [19]



Εικόνα 4-2: Σχηματική αναπαράσταση της ζώνης θραύσης (μέτωπο κατάρρευσης) σύνθετου σωλήνα (τοιχώμα) σε αξονική συμπίεση, με απεικόνιση των παραγόντων απορρόφησης ενέργειας [15, 19]

Συγκεκριμένα, τα κύρια χαρακτηριστικά του παραπάνω μηχανισμού μικρο-θραύσεων είναι (Εικ.4-1 και 4-2) [15-17, 20]:

- Ένας δακτυλιοειδής σφήνας έντονα θρυμματισμένου υλικού, ωθούμενου αξονικά διά μέσου του τοιχώματος προς το τρέχοντος αλώβητο τμήμα του.
- Μια διαμήκης - κατά τον άξονα του κελύφους - μικρο-ρωγή εντός του τοιχώματος, που αναπτύσσεται μπροστά από τη ζώνη θραύσης στην κορυφή του δακτυλιοειδούς σφήνα και διαδίδεται με ρυθμό που προσεγγίζει εκείνον της αξονικής συμπίεσης.

- Δύο συνεχείς δέσμες (φύλλα) στρώσεων (εσωτερική και εξωτερική) ως αποτέλεσμα κυρίως της διαστρωματικής αποκόλλησης στη ζώνη θραύσης, που σχηματίζονται και εκτείνονται ακτινικά - καμπτόμενες - προς το εσωτερικό και το εξωτερικό του κελύφους - λόγω του εσωτερικού/κεντρικού σφήνα - μεταξύ της κεντρικής διαμήκους ρωγμής και της εσωτερικής και εξωτερικής αντίστοιχα επιφάνειας του τοιχώματος, υποκειμένες σε συνδυασμένη εφελκυστική και θλιπτική παραμόρφωση. Στην εξωτερική δέσμη στρώσεων σχηματίζονται διαμήκεις σχισμές λόγω του αναπτυχθέντος εφελκυσμού περιφερικά, ενώ στην εσωτερική δέσμη στρώσεων δεν παρατηρείται κάτι αντίστοιχο (σχεδόν συνεχείς οι στρώσεις), καθώς υπόκειται σε θλίψη περιφερικά λόγω του περιορισμένου εσωτερικού χώρου του κελύφους. Και οι δύο δέσμες στρώσεων (εσωτερική και εξωτερική) υφίστανται υψηλή καμπτική παραμόρφωση λόγω αλλαγής της κατεύθυνσής τους διαδοχικά, κατά την ολίσθησή τους στις παρειές του σφήνα (εσωτερική και εξωτερική αντίστοιχα) και στην επιφάνεια της πλάκας συμπίεσης. Ως αποτέλεσμα αυτού, λόγω διάτμησης στη ζώνη κάμψης, δευτερεύουσες διαμήκεις μικρο-ρωγμές και διαστρωματική αποκόλληση αναπτύσσονται μεταξύ των επιμέρους στρώσεων των δεσμών λόγω διάτμησης στη ζώνη κάμψης.

Από τη σκοπιά της ενέργειας απορρόφησης, οι κυριότεροι παράγοντες που συντελούν σε αυτήν είναι μικροσκοπικά οι ακόλουθοι (Εικ 4-1 και 4-2) [15, 16]:

- Διάδοση διαμήκους (κατά τον άξονα του κελύφους) κεντρικής ρωγμής εντός του τοιχώματος
- Κάμψη των δεσμών των στρώσεων λόγω της κεντρικής διαστρωματικής αποκόλλησης
- Διαμήκης διαίρεση/σχίσσιμο των δεσμών των στρώσεων
- Καμπτική αστοχία μεμονωμένων στρώσεων λόγω μεγάλης καμπυλότητας στο όριο της κεντρικής διαστρωματικής αποκόλλησης (κορυφή σφήνα θρυμματισμένου υλικού)
- Αντίσταση τριβής σε διαμήκη ολίσθηση μεταξύ διαδοχικών στρώσεων
- Αντίσταση τριβής μεταξύ του σφήνα και της εσωτερικής και εξωτερικής δέσμης στρώσεων κατά τη διείσδυσή του ανάμεσά τους
- Αντίσταση τριβής των δεσμών των στρώσεων κατά την ακτινική ολίσθησή τους - εσωτερικά και εξωτερικά του τοιχώματος - επί της πλάκας συμπίεσης

Στις περιπτώσεις προοδευτικής και ευσταθούς αξονικής κατάρρευσης σύνθετων κελυφών, όπως η συγκεκριμένη, με τους μηχανισμούς και τη μορφολογία που περιεγράφηκε παραπάνω, το μεγαλύτερο ποσοστό (50% και άνω) της ενέργειας απορρόφησης δαπανάται στις τριβές εντός του υλικού και στις επιφάνειες των πλακών συμπίεσης [15, 17].

Όσον αφορά στο διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης, το φορτίο αρχικά αυξάνεται απότομα και γραμμικά, παρακολουθώντας την ελαστική παραμόρφωση του κελύφους, μέχρι τον σχηματισμό της πρώτης - κεντρικής - ρωγμής περιφερικά στο εσωτερικό του τοιχώματος του κελύφους. Στο σημείο αυτό καταγράφεται ουσιαστικά η αντοχή του κελύφους σε αξονική συμπίεση, αφού η αρχική αυτή κορυφή του φορτίου συνιστά και τη μέγιστη τιμή (P_{max}) που λαμβάνει κατά τη διάρκεια της κατάρρευσης. Αμέσως μετά το φορτίο μειώνεται ραγδαία, αλλά σε μικρό βαθμό σχετικά, και ξεκινά η διαδικασία κατάρρευσης με σταθερά αυξανόμενη την

αξονική βράχυνση του κελύφους. Το φορτίο πλέον, και μέχρι την ολοκλήρωση της συμπίεσης, κυμαίνεται ταλαντωτικά - με μικρό εύρος τιμών και υψηλή συχνότητα - γύρω από μία (σχεδόν σταθερή) μέση τιμή. Η «οδοντωτή» μορφή του διαγράμματος φορτίου-μετατόπισης είναι αποτέλεσμα των ψαθυρών (λόγω των ιδιοτήτων των συστατικών του σύνθετου υλικού) μικρο-θραύσεων που διέπουν τον μηχανισμό κατάρρευσης του κελύφους, όπως περιεγράφηκε προηγουμένως.

Στο τελικό στάδιο της διαδρομής φόρτισης και των δύο κελυφών καταγράφεται μια σχεδόν ανεπαίσθητη αύξηση του φορτίου, στην οποία φαίνεται να συμβάλλει - πέραν του γεγονότος ότι τα κελύφη βραχυνόμενα καθίστανται κατά τι στιβαρότερα - η επιπλέον αξονική συμπίεση των εσωτερικών δεσμών των στρώσεων, που καμπτόμενες μετά τον σχηματισμό και τη διέλευσή τους από το μέτωπο κατάρρευσης, στρέφονται προς την αντίθετη κατεύθυνση, οδηγούμενες αξονικά εντός του περιορισμένου διαθέσιμου εσωτερικού κενού του κελύφους, προς την απέναντι πλάκα συμπίεσης. Η απουσία - ουσιαστικά - αξονικών σχισμάτων και ο πολύ περιορισμένος διαθέσιμος χώρος κίνησής τους, τις καθιστούν σχετικά στιβαρές αξονικά, παρόλη την προηγηθείσα αστοχία, με αποτέλεσμα να καταγράφεται ένα μικρό πρόσθετο φορτίο.

Στις εξωτερικές δέσμες στρώσεων δεν παρατηρείται κάτι αντίστοιχο, καθώς αυτές διαθέτουν απεριόριστο χώρο για την έκτασή τους, και επιπλέον - λόγω ακριβώς αυτού - κάμπτονται με αρκετά μικρότερη καμπυλότητα μετά τη «διέλευσή» τους από το μέτωπο κατάρρευσης, με αποτέλεσμα να μην κατευθύνονται αμιγώς στην αξονική διεύθυνση και να μην έρχονται καθόλου σε επαφή με την απέναντι πλάκα συμπίεσης.

Συνολικά, τα μεταβατικά φαινόμενα σύνθλιψης και θραύσης, καθώς και ο σχηματισμός και η ανάπτυξη του μηχανισμού κατάρρευσης, σχετικά με την αξονική συμπίεση κελυφών σύνθετου υλικού, είναι εξαιρετικά πολύπλοκα και στοχαστικά. Η εντατική κατάσταση στην οποία υπόκεινται οι μεμονωμένες ζώνες του κελύφους είναι σύνθετη, περιλαμβάνοντας - κατά περίπτωση - συνδυασμό των απλών εντατικών καταπονήσεων: εφελκυσμό/έκταση, θλίψη, κάμψη, διάτμηση [15, 16].

Από το σύνολο των παρατιθέμενων διαγραμμάτων που φαίνονται στο κεφάλαιο 4 μπορούμε να εξάγουμε τις κάτωθι παρατηρήσεις:

- A) Μέγιστη ενέργεια απορρόφησης είχε το Δοκίμιο 8 το οποίο είχε εγκοπές στο 1/3 των πλευρών του και μέσο πάχος 3.24 mm. . ($E_{abs}=1967$ J)
- B) Ελάχιστη ενέργεια απορρόφησης είχε το Δοκίμιο 13 ($E_{abs}=523$ J) το οποίο δεν είχε καθόλου εγκοπές. Συγκεκριμένα σε αυτό το Δοκίμιο παρατηρήθηκε μηχανισμός κατάρρευσης ο οποίος είναι διαφορετικός από των υπολοίπων δοκιμίων (Θραύση κατά μήκος της περιφέρειας σε απόσταση περίπου του μισού μήκους του δοκιμίου).
- Γ) Ελάχιστη ενέργεια απορρόφησης (εκτός του Δοκιμίου 13) παρουσίασε το δοκίμιο 7 το οποίο είχε μέσο πάχος πλευρών 2.65 mm και εγκοπές στο 1/3 των πλευρών. Επίσης το συγκεκριμένο δοκίμιο είχε πυρήνα με γέμιση από αφρό.
- Δ) Μέγιστο δείκτη ομοιομορφίας φορτίου είχε το Δοκίμιο 9 ($c.f.e=0.73$) το οποίο είχε εγκοπές στο 1/3 των πλευρών και μέσο πάχος 2.77 mm

Ε) Ελάχιστο δείκτη ομοιομορφίας φορτίου είχε το Δοκίμιο 13 (c.f.e=0.15)

ΣΤ) Ελάχιστο δείκτη ομοιομορφίας φορτίου (εκτός του δοκιμίου 13) είχε το δοκίμιο 2 (c.f.e=0,43)

Ζ) Μέγιστο μέσο φορτίο είχε το δοκίμιο 8 ($P_{\text{mean}}=49.188$ KN). Το δοκίμιο 8 είχε εγκοπές στο 1/3 των πλευρών του και μέσο πάχος 3.24 mm

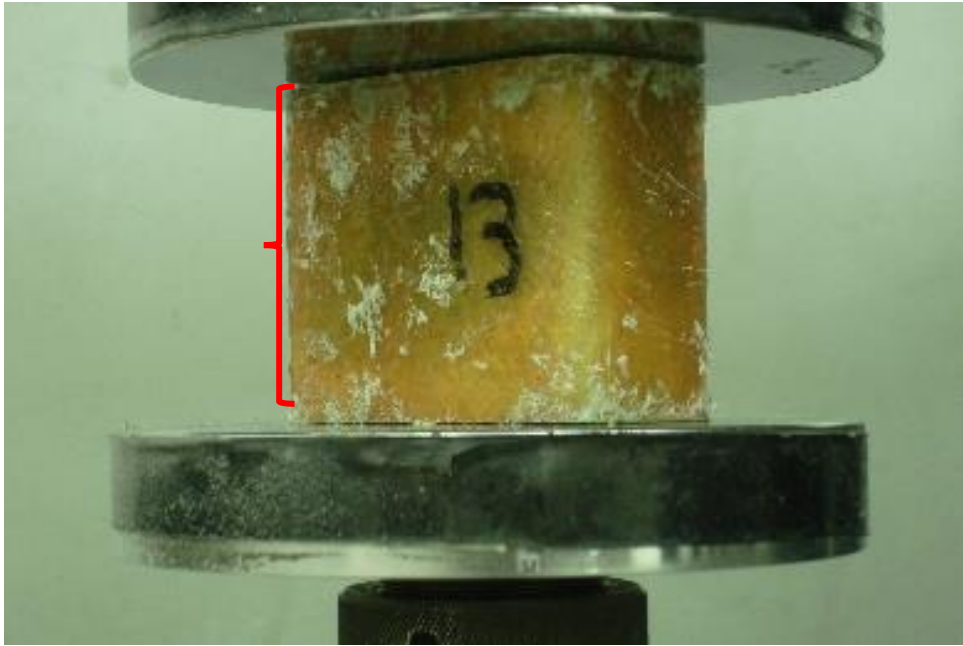
Η) Ελάχιστο μέσο φορτίο είχε το δοκίμιο 13 ($P_{\text{mean}}=13,084$ KN).

Θ) Ελάχιστο μέσο φορτίο (εκτός του δοκιμίου 13) είχε το δοκίμιο 7 ($P_{\text{mean}}=31,807$ KN) το οποίο είχε μέσο πάχος πλευρών 2.65 mm και εγκοπές στο 1/3 των πλευρών. Επίσης το συγκεκριμένο δοκίμιο είχε πυρήνα με γέμιση από αφρό.

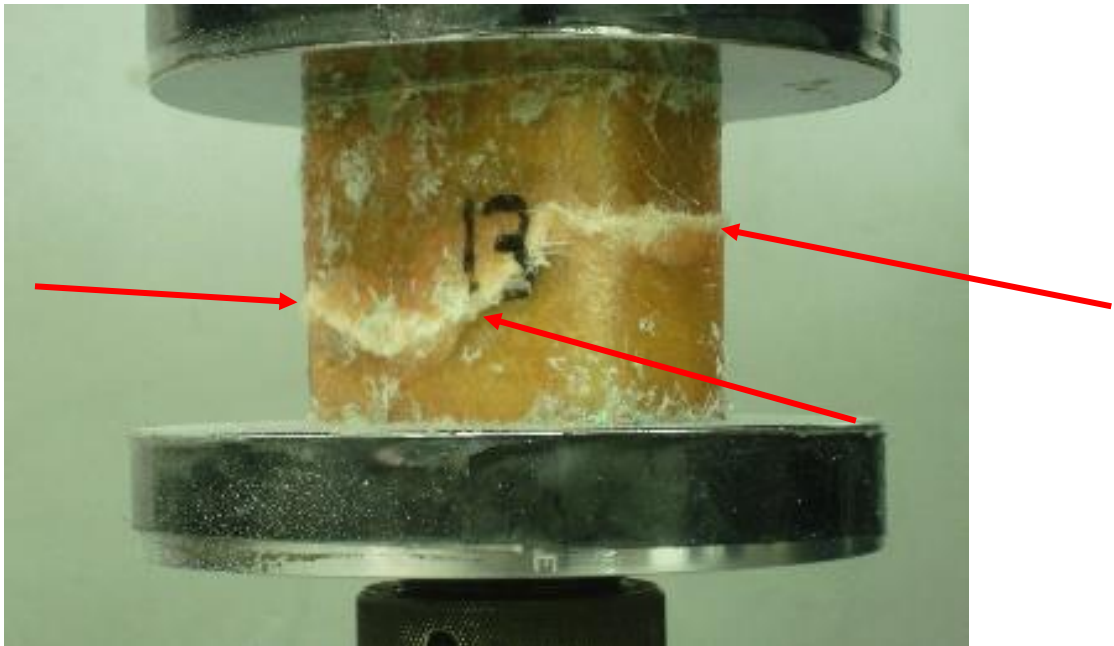
Αξίζει να σημειωθεί η περίπτωση του δοκιμίου Νο 13 το οποίο δεν ακολούθησε το μοντέλο κατάρρευσης και αστοχίας των υπολοίπων δοκιμίων. Στην συγκεκριμένη περίπτωση παρουσιάστηκε μια διαμήκης ρωγμή περιμετρικά σε απόσταση περίπου ίση με το μισό μήκος του δοκιμίου. Αυτή η ρωγμή οδήγησε στο να αστοχήσει το δοκίμιο και να παρουσιάσει αποτελέσματα δεικτών crashworthiness με τιμές μειωμένες περίπου κατά 68% σε σχέση με την μέση τιμή όλων των υπολοίπων δοκιμίων.

Πίνακας 4.7

Περιγραφή	Σύμβολο	Μονάδες μέτρησης	Δοκίμιο 13	Μέση τιμή υπόλοιπων δοκιμίων	Ποσοστιαία Απόκλιση
Μέσο Φορτίο	P_{mean}	KN	13.08	41.57	-68.529%
Ενέργεια απορρόφησης	E_{abs}	J	522.96	1662.29	-68.540%



Εικ. 4-3 Δοκίμιο 13 πριν την έναρξη της διαδικασίας θλίψης



Εικ. 4-3 Δοκίμιο 13 για μετατόπιση 3.8 mm μετά την έναρξη της διαδικασίας θλίψης. Εδώ φαίνεται η έναρξη της δημιουργίας της περιμετρικής ρωγμής του δοκιμίου σε απόσταση $L/2$

4.5.2 Αποτελέσματα σχετικά με την επίδραση των εγκοπών

Αναλύοντας τα αποτελέσματα του πίνακα 4-6 παρατηρούμε πώς σαν γενική παρατήρηση εξάγεται το συμπέρασμα ότι η δημιουργία εγκοπών στα δοκίμια έχει αρνητικό αντίκτυπο στην συνολική συμπεριφορά των δοκιμίων όσο αφορά τους δείκτες crashworthiness.

Αρχικά παρατηρούμε ότι σε όλους τους δείκτες υπάρχει μια πτώση της μέσης τιμής από τιμές -2% έως και τιμές -18%.

Συγκεκριμένα η δυσμενέστερη περίπτωση φαίνεται να είναι για δημιουργία εγκοπών στο μέσο των πλευρών των δοκιμίων (δηλαδή για τα δοκίμια 5 και 6) Σε αυτή την περίπτωση παρατηρούμε πως το μέσο φορτίο και η ενέργεια απορρόφησης παρουσιάζουν μια μείωση της τάξης του 18 % σε σχέση με τα δοκίμια στα οποία δεν δημιουργήθηκαν εγκοπές.

Ακολούθως η επόμενη δυσμενέστερη περίπτωση είναι αυτή των δοκιμίων στα οποία δημιουργήθηκαν εγκοπές στις γωνίες τους (δηλαδή για τα δοκίμια 2 και 3). Σε αυτά πάλι βλέπουμε μείωση των τιμών της ενέργειας απορρόφησης και του μέσου φορτίου κατά 15% και 16% αντίστοιχα.

Τέλος η επόμενη περίπτωση είναι η περίπτωση της δημιουργίας εγκοπών στο 1/3 των πλευρών των δοκιμίων όπου εκεί βλέπω την μείωση των τιμών μέσου φορτίου και ενέργειας απορρόφησης κατά 2% και 3% αντίστοιχα. Άρα παρατηρώ πως τα αποτελέσματα για τα δοκίμια αυτά είναι κατά σχεδόν 10% καλύτερα από τις άλλες περιπτώσεις δημιουργίας εγκοπών εγκοπών.

4.5.3 Αποτελέσματα σχετικά με την επίδραση του αφρού στον πυρήνα

Από τα αποτελέσματα της μελέτης για την επίδραση του πυρήνα αφρού στα δοκίμια, φαίνεται γενικά ότι η προσθήκη του βελτιώνει την συμπεριφορά των δοκιμίων όσο αφορά τους δείκτες crashworthiness.

Σε όλες τις περιπτώσεις έχω ότι η ενέργεια απορρόφησης αυξάνεται με την προσθήκη αφρού κατά μέσο όρο περίπου 8% αλλά σε μια περίπτωση μόνο, βρίσκω ότι μειώνεται κατά ένα πολύ σημαντικό ποσοστό της τάξης του 41%.

Η συγκεκριμένη περίπτωση αφορά τα δοκίμια με εγκοπές στο 1/3 των πλευρών τους.

Η διαφορά αυτή μπορεί να εξηγηθεί καθώς το δοκίμιο No 7 το οποίο περιείχε πυρήνα αφρού και συγκρίνεται με τα δοκίμια 8 και 9, είχε το μικρότερο μέσο πάχος (2,65 mm) από όλα τα υπόλοιπα δοκίμια το οποίο παίζει θεμελιώδη ρόλο στην τελική τιμή των δεικτών crashworthiness.

Περιγραφή Δοκιμίου	Δοκίμιο	<i>Eabs</i>	<i>Μέση ενέργεια απορρόφησης</i>	Ποσοστό απόκλισης μέσου φορτίου δοκιμίων με πυρήνα αφρού και δοκιμίων χωρίς πυρήνα αφρού
		<i>Eabs</i>	<i>Eabs_mean</i>	
		<i>J</i>	<i>J</i>	
Εγκοπές στις γωνίες, γέμιση με αφρό	1	1689.5	1689.503	6%
Εγκοπές στις γωνίες	2	1576.5	1586.645	
Εγκοπές στις γωνίες	3	1596.8		
Εγκοπές στα μέσα των πλευρών, γέμιση με αφρό	4	1820.3	1820.33	14%
Εγκοπές στα μέσα των πλευρών	5	1360.4	1558.983	
Εγκοπές στα μέσα των πλευρών	6	1757.6		
Εγκοπές στο 1/3 των πλευρών, γέμιση με αφρό	7	1271.1	1271.11	-41%
Εγκοπές στο 1/3 των πλευρών	8	1966.9	1789.235	
Εγκοπές στο 1/3 των πλευρών	9	1611.5		
Χωρίς εγκοπές, γέμιση με αφρό	12	1831.9	1831.872	5%
Χωρίς εγκοπές, γέμιση με αφρό	13	522.96	1732.525	
Χωρίς εγκοπές	10	1780.2		
Χωρίς εγκοπές	11	1684.9		

4.5.4 Συμπεράσματα σχετικά με την διασπορά των αποτελεσμάτων – μελλοντική μελέτη

Επειδή το αρχικό τεμάχιο από το οποίο κόπηκαν τα δοκίμια της εργασίας ήταν κατασκευασμένο με το χέρι, η ποιότητά του δεν ήταν σταθερή κατά το μήκος του. Έτσι τα δοκίμια παρουσίαζαν σημαντικές διαφορές στο πάχος, στην ποσότητα της ριτίνης ή των υαλονημάτων, στην ποσότητα του παγιδευμένου αέρα, στην επικόλληση των στρώσεων μεταξύ τους ή στον αριθμό των στρώσεων. Για να πετύχουμε διαφορετικά αποτελέσματα, θα χρειαστεί να κάνουμε πειράματα παρόμοια με της παρούσης διπλωματικής, αλλά με:

- Δοκίμια βιομηχανικής κατασκευής και προδιαγραφών. Έτσι θα μπορέσουμε να απομονώσουμε της επίδρασης των εγκοπών και του πυρήνα αφρού.
- Σημαντικά μεγαλύτερο αριθμό δοκιμίων, καθώς η στατιστική απόκλιση των δοκιμίων που κατασκευάζονται με το χέρι είναι πολύ μεγάλη. Έτσι θα μπορέσουμε να μελετήσουμε το φαινόμενο σε δοκίμια που είναι κατασκευασμένα με το χέρι.

4.6 Φωτογραφικό υλικό δοκιμίων μετά την ολοκλήρωση του πειράματος

Στην παρούσα ενότητα γίνεται παράθεση φωτογραφικού υλικού των δοκιμίων μετά την ολοκλήρωση του πειράματος.



Εικόνα 4-4 Δοκίμιο 1 μετά την ολοκλήρωση του πειράματος



Εικόνα 4-5 Δοκίμιο 2 μετά την ολοκλήρωση του πειράματος



Εικόνα 4-6 Δοκίμιο 3 μετά την ολοκλήρωση του πειράματος



Εικόνα 4-7 Δοκίμιο 4 μετά την ολοκλήρωση του πειράματος



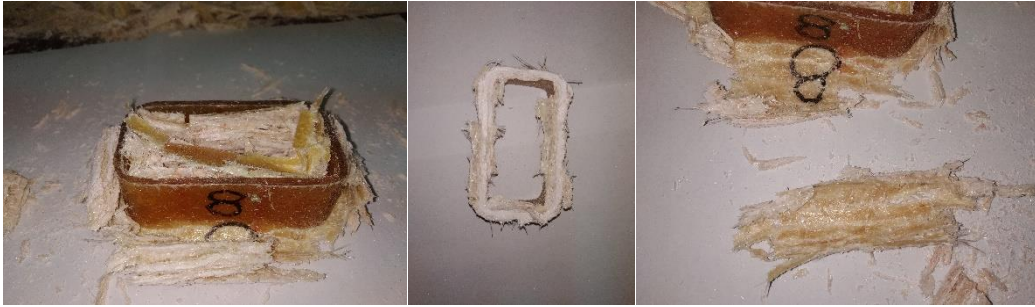
Εικόνα 4-8 Δοκίμιο 5 μετά την ολοκλήρωση του πειράματος



Εικόνα 4-9 Δοκίμιο 6 μετά την ολοκλήρωση του πειράματος



Εικόνα 4-10 Δοκίμιο 7 μετά την ολοκλήρωση του πειράματος



Εικόνα 4-11 Δοκίμιο 8 μετά την ολοκλήρωση του πειράματος



Εικόνα 4-12 Δοκίμιο 9 μετά την ολοκλήρωση του πειράματος



Εικόνα 4-13 Δοκίμιο 10 μετά την ολοκλήρωση του πειράματος



Εικόνα 4-14 Δοκίμιο 11 μετά την ολοκλήρωση του πειράματος



Εικόνα 4-15 Δοκίμιο 12 μετά την ολοκλήρωση του πειράματος



Εικόνα 4-16 Δοκίμιο 13 μετά την ολοκλήρωση του πειράματος

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Association for Safe International Road Travel, “Road safety facts,” 2018. [Online]. Available: <https://www.asirt.org/safe-travel/road-safety-facts/>.
- [2] A. Rabiee and H. Ghasemnejad, “Lightweight design to improve crushing behaviour of multi-stitched composite tubular structures under impact loading,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 135, no. November 2018, pp. 109–122, 2019.
- [3] G. Sun, S. Li, Q. Liu, G. Li, and Q. Li, “Experimental study on crashworthiness of empty/aluminum foam/honeycomb-filled CFRP tubes,” *Compos. Struct.*, vol. 152, pp. 969–993, 2016.
- [4] J. M. STARBUCK, D. O. ADAMS, and M. COURTEAU, “Energy Absorbing Damage Mechanisms in Progressive Crushing of Composite Tubes,” 2018.
- [5]. ΕΜΠ Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών. Σημειώσεις για το μάθημα: Εφαρμογές προηγμένων υλικών. 2004. URL http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1_Sintheta_ilika.pdf.
- [6] Κ. Παπανικολάου. Επιστήμη και τεχνολογία σύνθετων υλικών. εκδ. Κλειδάριθμος,
- [7].Ιορδανίδου Ευλαλία. Βελτιστοποίηση ενισχυμένων δομικών στοιχείων από σύνθετα υλικά. Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδικευσης, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Μηχανικών Σχεδίασης Προϊόντων και Συστημάτων, 2010.008.
- [8].Suresha B, Chandramohan G, Prakash JN, et al. The role of fillers on friction and slide wear characteristics in glass- epoxy composite systems. *J Minerals Mater Characterization Eng* 2006; 5: 87–101.
- [9] Farley G.L and Jones R.M. (1992), Crushing characteristics of continuous fibre-reinforced composite tubes, *J. Composite Materials*, 26, 37.

- [10] Farley G.L. (1983), Energy absorption of composite materials, *J. of Composite Materials* 17, 167.
- [11] Botkin M.E., Johnson N.L., Halloquist J.O., Lum L.C.K. and Matzemiller A. (1994), Numerical simulation of post-failure dynamic crushing of composite tubes, *Proc. Second International LSDYNA3D Conference, San Francisco, USA.*
- [12] Fairfull A.H. and Hull D. (1988), Energy absorption of polymer matrix composite structures: Friction effects, chap.8 in *Structural Failure*, T. Wierzbicki and N. Jones, Eds., J. Wiley & Sons, New York, USA, 255.
- [13] Hull D. (1982), Energy absorption of composite materials under crash conditions, *Proc. ICCMIV, Progress in Science and Engineering of Composites* T. Hayashi, K. Kawata and S. Umekawa, Eds. Tokyo, 861.
- [14] Mamalis A.G., Manolakos D.E. and Viegeln G.L. (1989), Deformation characteristics of crashworthy components, *Fortschritt- Berichte der VDI-Z, Reihe 18, Nr. 62, Dusseldorf, Germany*
- [15] Guohua Zhu, Guangyong Sun, Qiang Liu, Guangyao Li, Qing Li, On crushing characteristics of different configurations of metal-composites hybrid tubes, *Composite Structures* 175 (2017)
- [16] Διπλωματική εργασία Κρουσταλάκη Ιωάννη, Η επίδραση Εξωτερικών Αυλακώσεων Στην Αξονική Κατάρρευση Σωλήνων Απο Σύνθετο Υλικό, Επιβλέπων Καθηγητής: Δημήτριος Μανωλάκος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Τομέας Τεχνολογίας Των Κατεργασιών, Αθήνα 2014.
- [17] Dirk H and Lukaszewicz, *Automotive Composite Structures for Crashworthiness*, in *Advanced Composite Materials for Automotive Applications: Structural Integrity and Crashworthiness*, Elmarakbi A (ed) Wiley, West Sussex, 2014.
- [18] D.Hull, (1991), A Unified Approach to Progressive Crushing of Fibre-Reinforced Composite Tubes, *Composites Science and Technology* 377-42.
- [19] Narasimhan Swaminathan & Ronald C. Averill (2006) Contribution of Failure Mechanisms to Crush Energy Absorption in a Composite Tube *Mechanics of Advanced Materials and Structures*.
- [20] Pinho ST, Camanho PP and de Moura MF (2004) Numerical Simulation of the Crushing Process of Composite Materials, *International Journal of Crashworthiness*, 9(3), 263-276.