ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΟΥΒΑΡΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: *Μανωλάκος Δημήτριος*

ΑΘΗΝΑ (Φεβρουάριος 2020)

Διάρθρωση της παρουσίασης:

- ✓ Σκοπός Εργασίας
- ✓ Δείκτες Crashworthiness
- ✓ GFRP υλικά
- ✓ Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας
- ✓ Πειραματικά αποτελέσματα
- ✓ Ανάλυση αποτελεσμάτων

Σκοπός Εργασίας

Σκοπός Εργασίας

- 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 Εργασίας

- 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.

Δείκτες Crashworthiness

Δείκτες Crashworthiness

- Η μελέτη της ικανότητας των υλικών στην απορρόφηση ενέργειας μέσω της παραμόρφωσης ή ολοκληρωτικής τους θραύσης, βαθμονομείται βάσει μίας σειράς μεγεθών (Δείκτες crashsworthiness).

1. *Ενέργεια απορρόφησης- Energy absorption (Eabs)*
2. *Μέσο φορτίο (P mean)*
3. *Μέγιστο φορτίο- Peak crush force (PCF) ή Pmax*
4. *Ειδική ενέργεια απορρόφησης-Specific Energy Absorption (SEA) ή Ws*

Δείκτες Crashworthiness

1. *Ενέργεια απορρόφησης- Energy absorption (Eabs)*

Η ενέργεια απορρόφησης (Eabs) εκφράζει την συνολική ενέργεια που απορροφήθηκε από το υλικό μέσω πλαστικής παραμόρφωσης σε συνθήκες πρόσκρουσης.

Δίνεται από τον τύπο:

$$Eabs = \int_{0}^{x} F(x)dx$$

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

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

Δείκτες Crashworthiness

2. *Μέσο φορτίο (P mean)*

Αντιστοιχεί, στον λόγο της ενέργειας απορρόφησης προς την μετατόπιση (βράχυνση) που υπέστη το δοκίμιο κατά την διάρκεια επιβολής φορτίου.

3. *Μέγιστο φορτίο- Peak crush force (PCF) ή Pmax*

Αντιστοιχεί στην υψηλότερη τιμή φορτίου κατά την διάρκεια μίας δοκιμής.

4. *Ειδική ενέργεια απορρόφησης-Specific Energy Absorption (SEA) ή W_s*

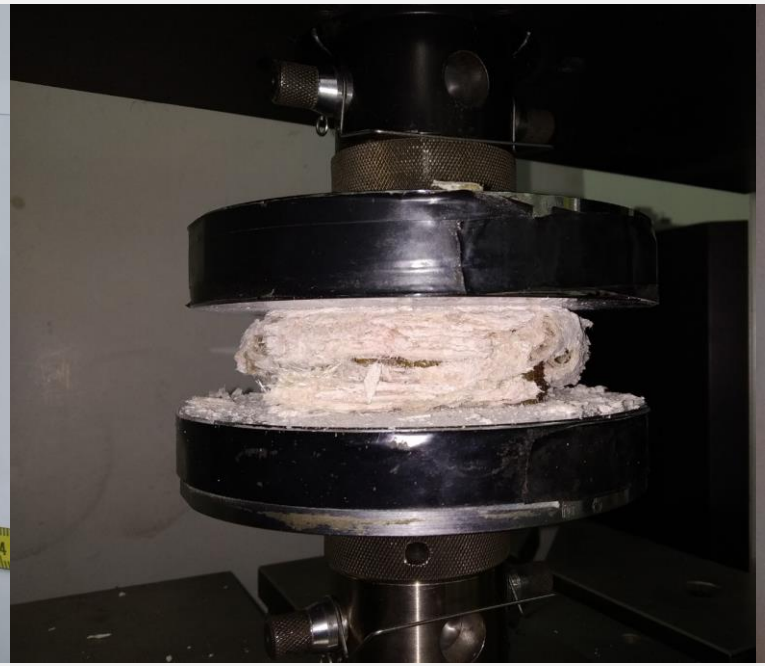
Ορίζεται ως, ο λόγος της ενέργειας που απορροφά ένα υλικό (E_{abs}), κατά την κατάρρευσή του προς το τμήμα της καταρρέουσας μάζας (m_c) του υλικού που έχει αστοχήσει.

GFRP υλικά

GFRP υλικά

- Τα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες (FRP), είναι σύνθετα υλικά κατασκευασμένα από ένα πολυμερές υλικό ενισχυμένο με ίνες.
- Οι ίνες είναι συνήθως γυαλί, άνθρακα ή αραμίδια, αν και μερικές φορές χρησιμοποιούνται άλλες ίνες, όπως χαρτί ή ξύλο.
- Το πολυμερές είναι συνήθως μια εποξική ή πολυεστερική ρητίνη θερμοσκληρυνόμενη. Κατά την πήξη τους, παρουσιάζουν συστολή.
- Τα FRP χρησιμοποιούνται συνήθως στις αεροδιαστημικές, αυτοκινητοβιομηχανικές, θαλάσσιες και κατασκευαστικές βιομηχανίες.

Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας



Δοκίμια

- Τα δοκίμια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα ήταν δέκα τρία (13) στο σύνολο. Η θλίψη των δοκιμίων αυτών έγινε με ταχύτητα 1 mm/s στην τη πρέσα του εργαστηρίου. Η συνολική μετατόπιση του εμβόλου σε κάθε πειραματική επανάληψη ήταν 40mm.

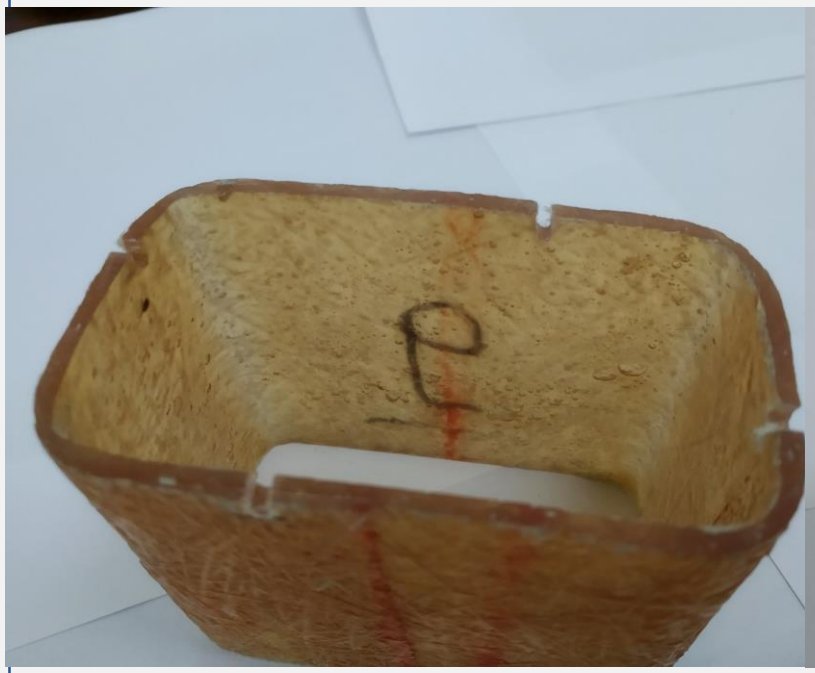
- Τα δοκίμια ήταν ορθογωνικής διατομής και είχαν διαστάσεις κατά μέσο όρο 45 mm x 75 mm x 70 mm (πλάτος x μήκος x ύψος). Το πάχος του υλικού ήταν ~ 2,5mm και η ακτίνα καμπυλότητας της εσωτερικής πλευράς ήταν 7,5mm.

Προετοιμασία δοκιμίων

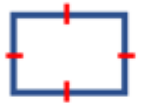
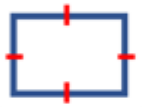
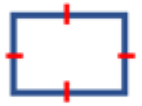
- Χρησιμοποιώντας ένα περιστροφικό εργαλείο τύπου Dremel δημιουργήθηκαν στα εννέα πρώτα δοκίμια εγκοπές (σε διαφορετικές θέσεις ανά ομάδες των τριών) ενώ στα τελευταία τέσσερα δοκίμια δεν δημιουργήθηκαν καθόλου εγκοπές. Οι εγκοπές δημιουργήθηκαν στο άνω σημείο των δοκιμίων σε διάταξη όπως φαίνεται στον κάτωθι πίνακα.

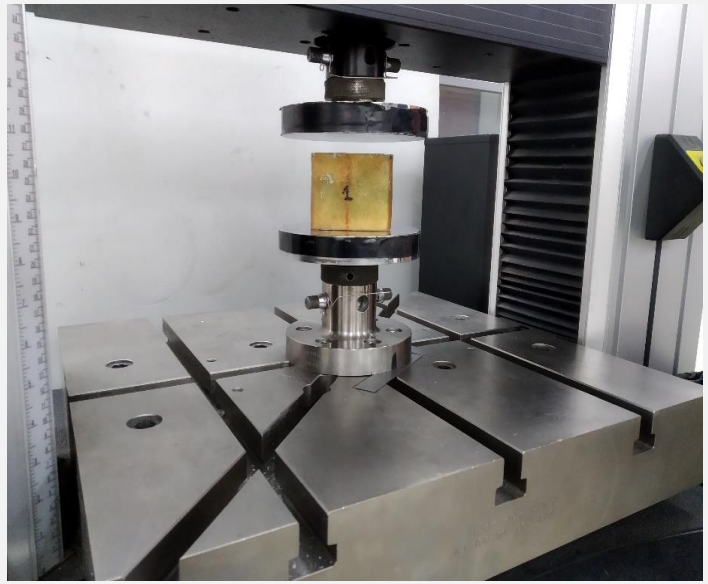
- Επίσης σε κάθε ομάδα δοκιμίων τα οποία είχαν ίδια γεωμετρία εγκοπών, ένα ή δύο από τα δοκίμια περιείχε πυρήνα από αφρό πολυουρεθάνης.

- Τέλος οι εγκοπές είχαν πάχος 2mm και βάθος 4 mm και στο τελείωμά τους ήταν στρογγυλεμένες με το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία τους (ακτίνα καμπυλότητας 1mm).



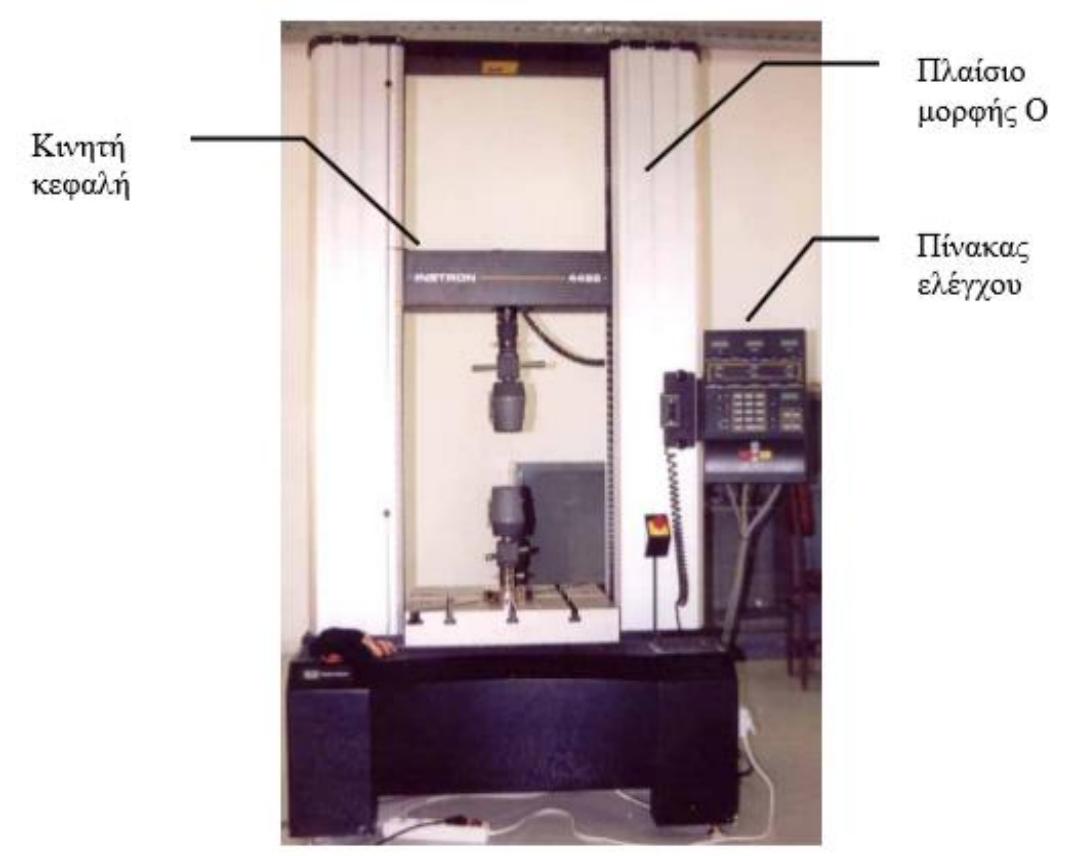
Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Α/Α	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	Διάταξη εγκοπών	Y1 (Ύψος κάτω πλευράς)	Y2 (Ύψος δεξιά πλευράς)	Y3 (Ύψος άνω πλευράς)	Y4 (Ύψος αριστερής πλευράς)	Μέσος όρος πάχους τοιχωμάτων
1	Εγκοπές στις γωνίες, γέμιση με αφρό		69.45	69.8	69.3	69.5	2.88
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 πλευράν, γέμιση με αφρό		68.07	67.81	67.81	68.13	3.12
5	Εγκοπές στα μέσα των πλευράν		66.98	67	67.29	66.98	2.96
6	Εγκοπές στα μέσα των πλευράν		69.17	69.52	69.45	69.5	3.23
7	Εγκοπές στο 1/3 των πλευράν, γέμιση με αφρό		69.35	69.63	69.7	69.96	2.65
8	Εγκοπές στο 1/3 των πλευράν		69.05	69.3	69.25	69.32	3.24
9	Εγκοπές στο 1/3 των πλευράν		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	6972	3.05
13	Χωρίς εγκοπές, γέμιση με αφρό	-	69.28	69.62	69.56	69.32	2.85



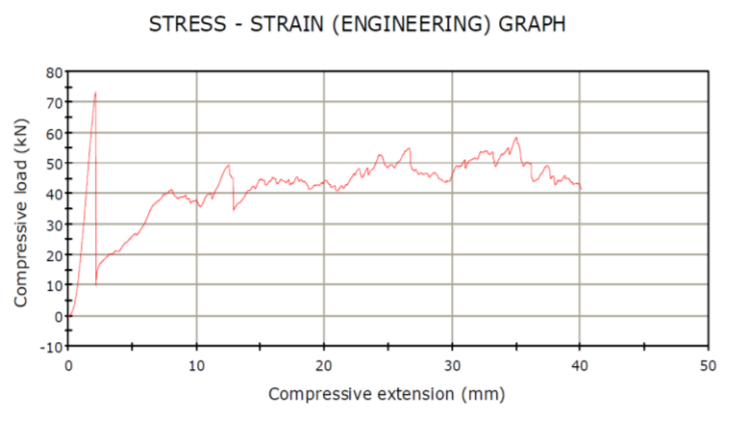
Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

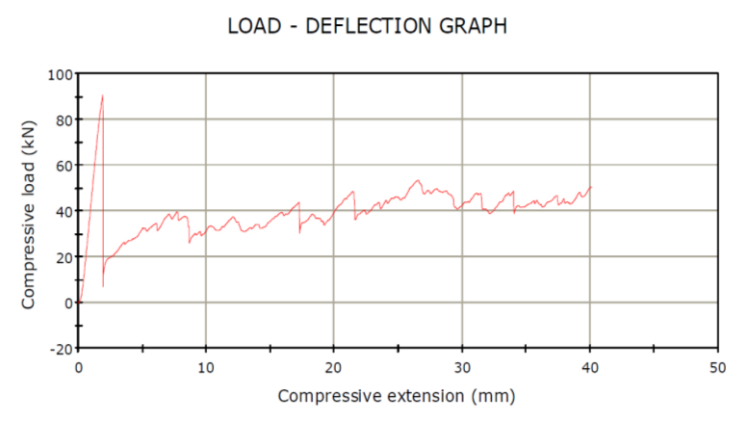
- Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκε η μηχανική πρέσα INSTRON 4482 η οποία βρίσκεται στον πρώτο όροφο του εργαστηρίου

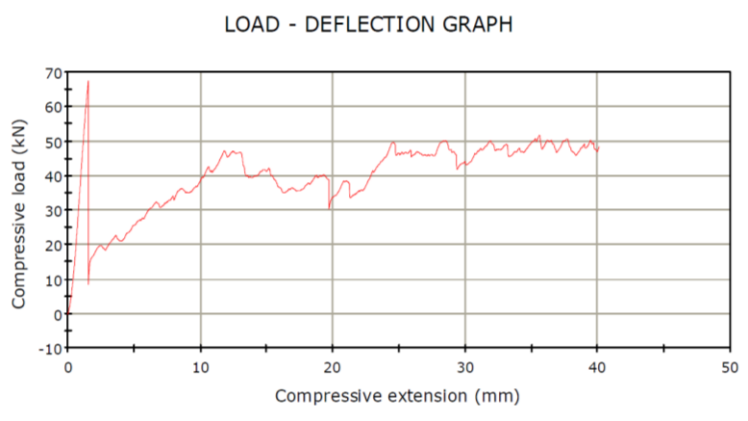


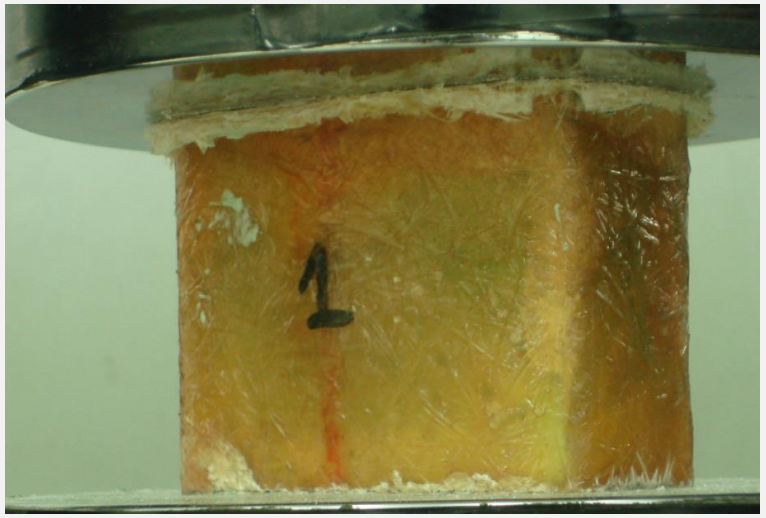
Πειραματικά αποτελέσματα

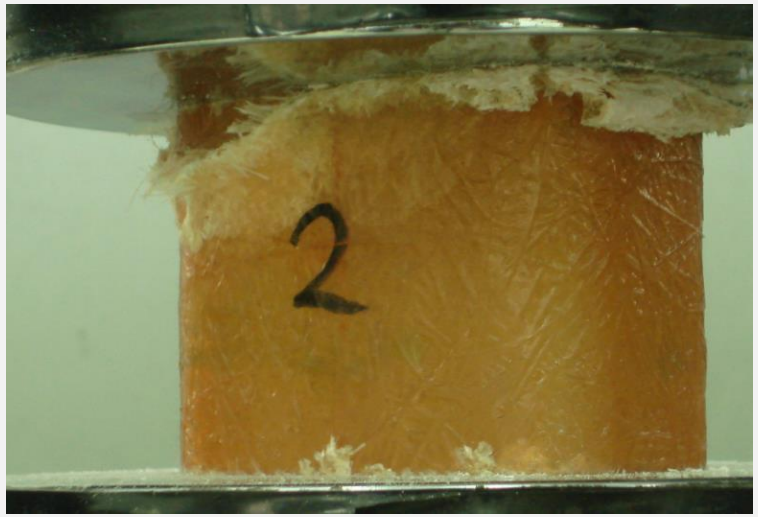
Εγκοπές στις 4 γωνίες









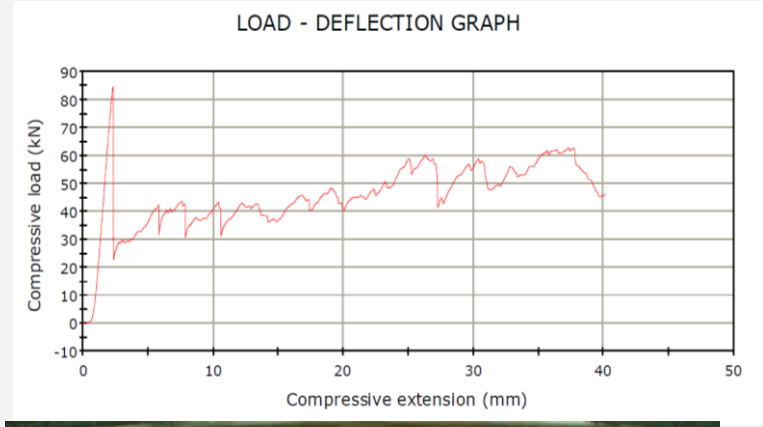


1-γέμιση με αφρό πολυουρεθάνης

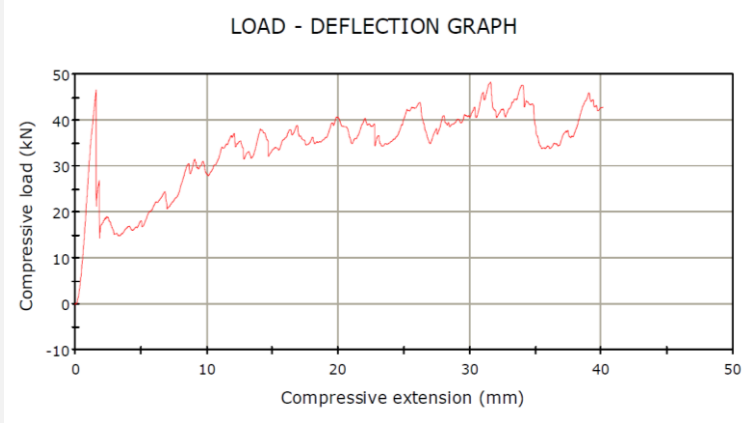
2

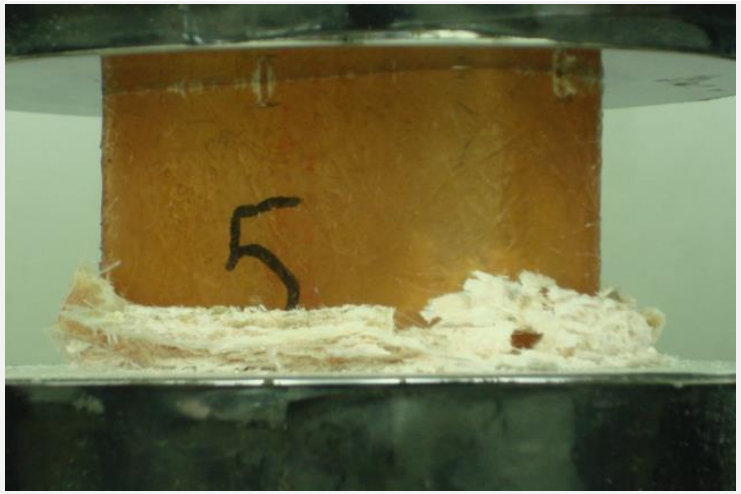
3

Εγκοπές στα μέσα των πλευρών

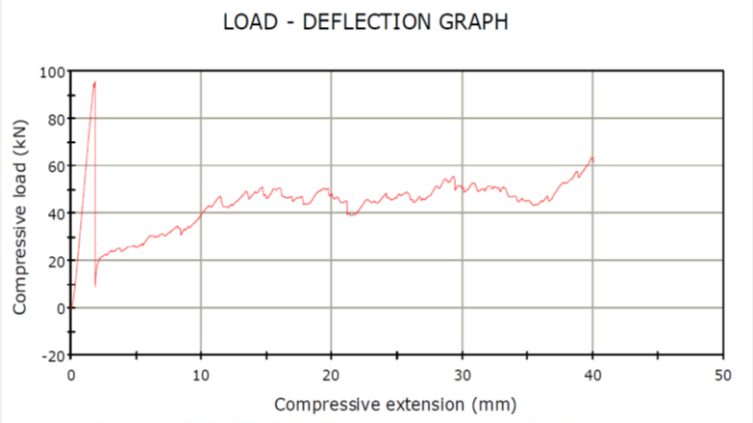


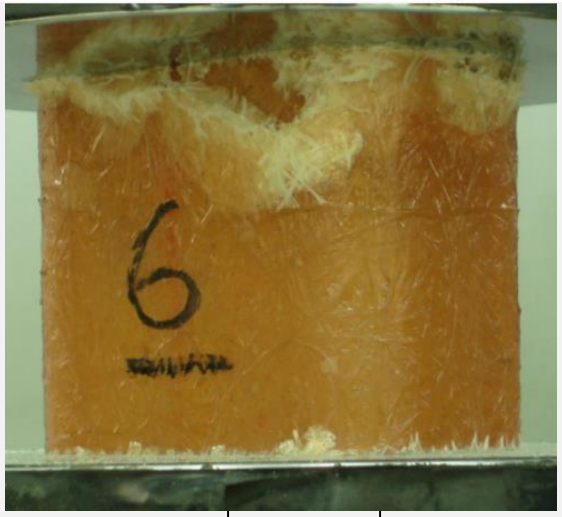
4-γέμιση με αφρό πολυουρεθάνης





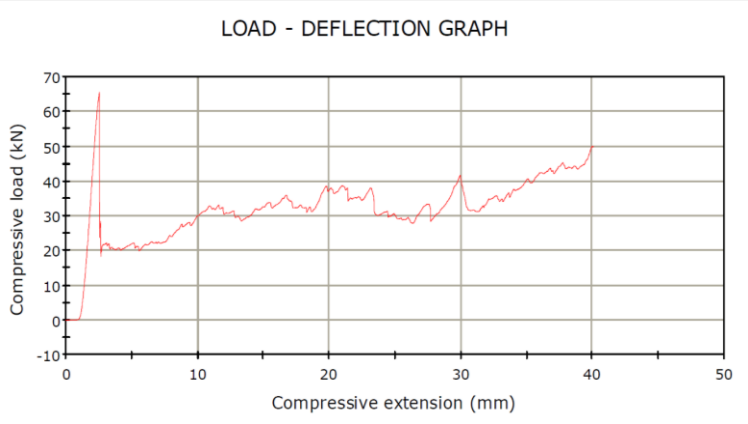
5



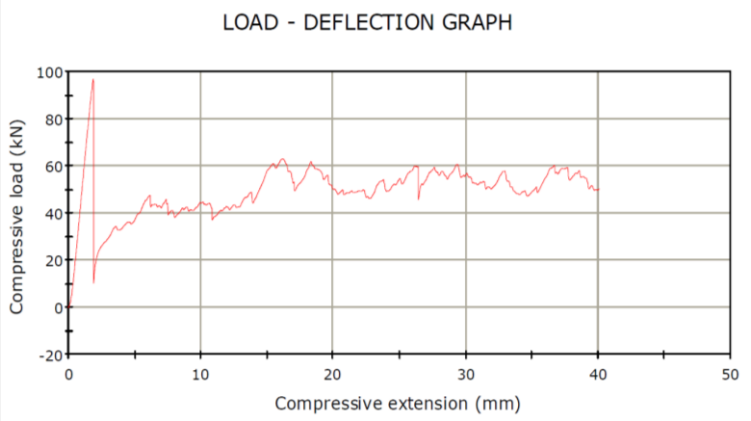


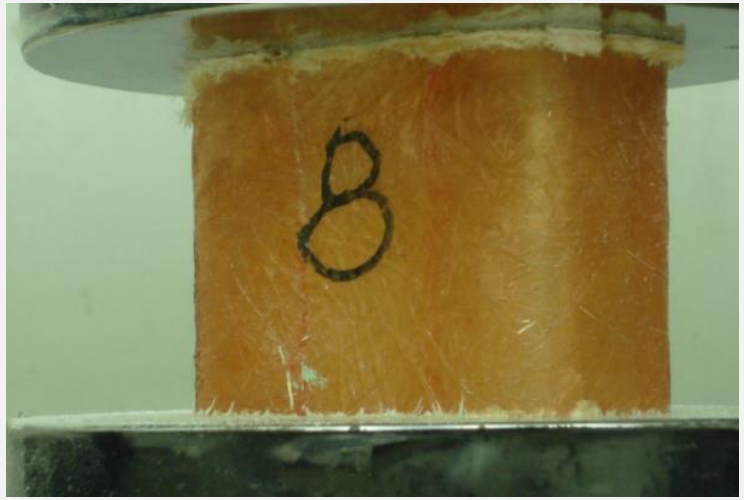
6

Εγκοπές στα 1/3 των πλευρών

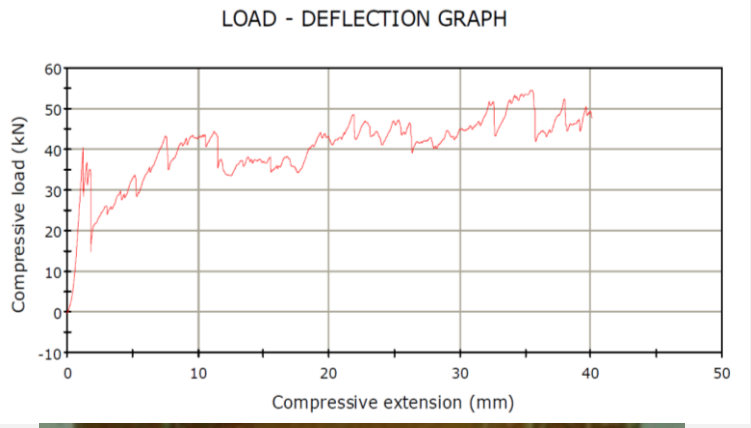


7- γέμιση με αφρό πολυουρεθάνης



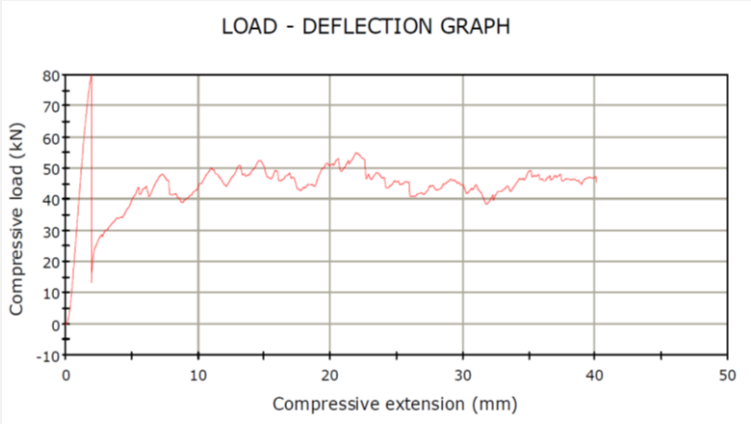


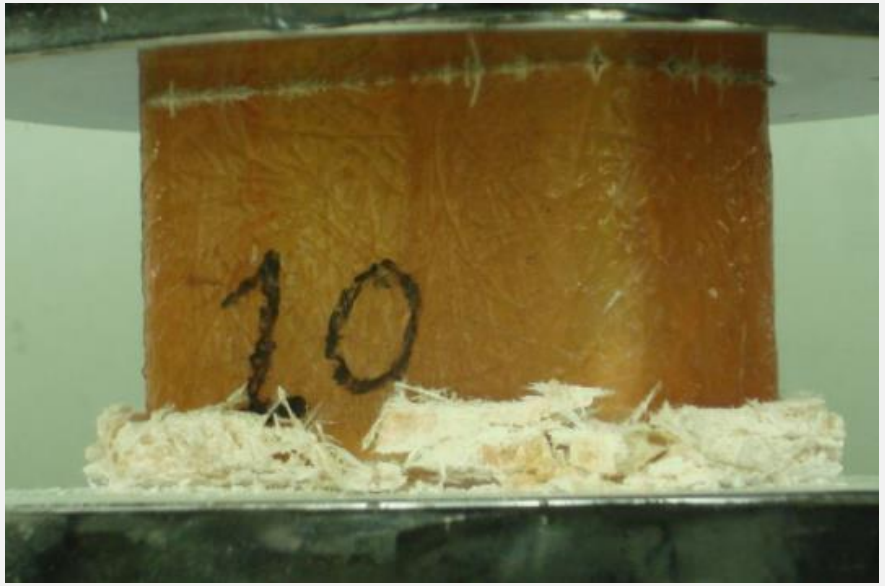
8



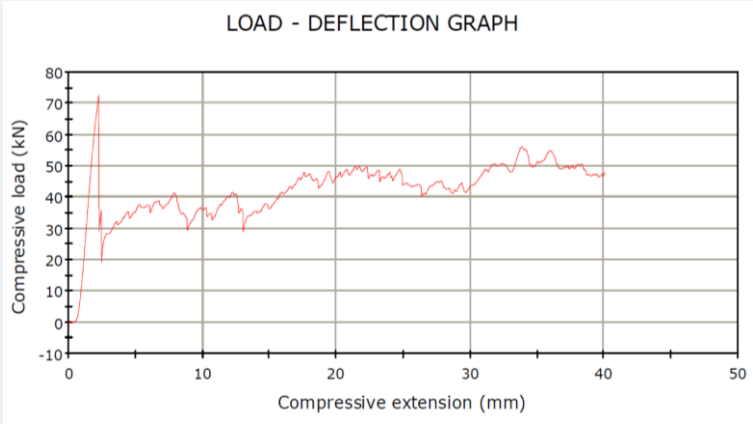
9

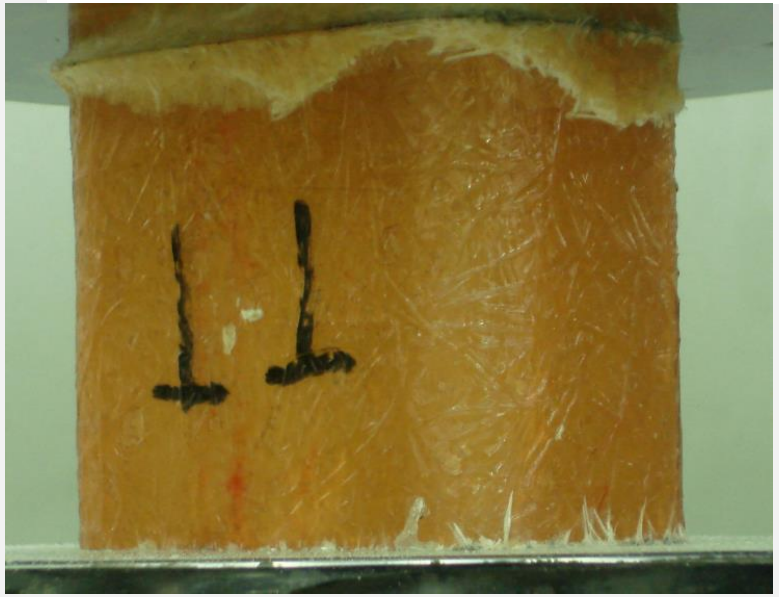
Πειραματικά αποτελέσματα





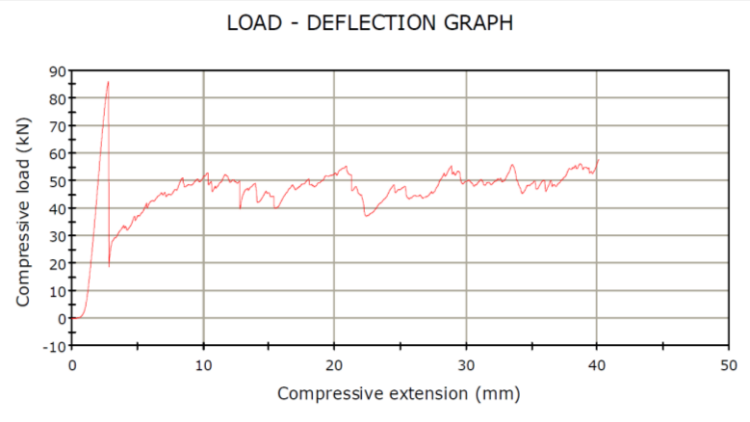
10



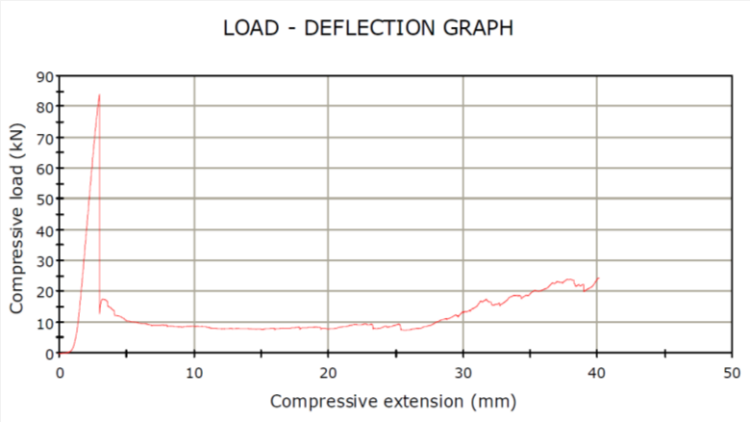


11

Πειραματικά αποτελέσματα



12- γέμιση με αφρό πολυουρεθάνης



13-γέμιση με αφρό πολυουρεθάνης

Έναρξη κατάρρευσης

1. Ξένα υλικά
2. Αέρας
3. Κακή ένωση των στρώσεων
4. Ανεπαρκής ποσότητα ρητίνης

Δημιουργία δύο στρωμάτων

Ένα μέρος του υλικού διαφεύγει προς τα μέσα, και ένα προς τα έξω

Mushrooming

Ανάλυση αποτελεσμάτων

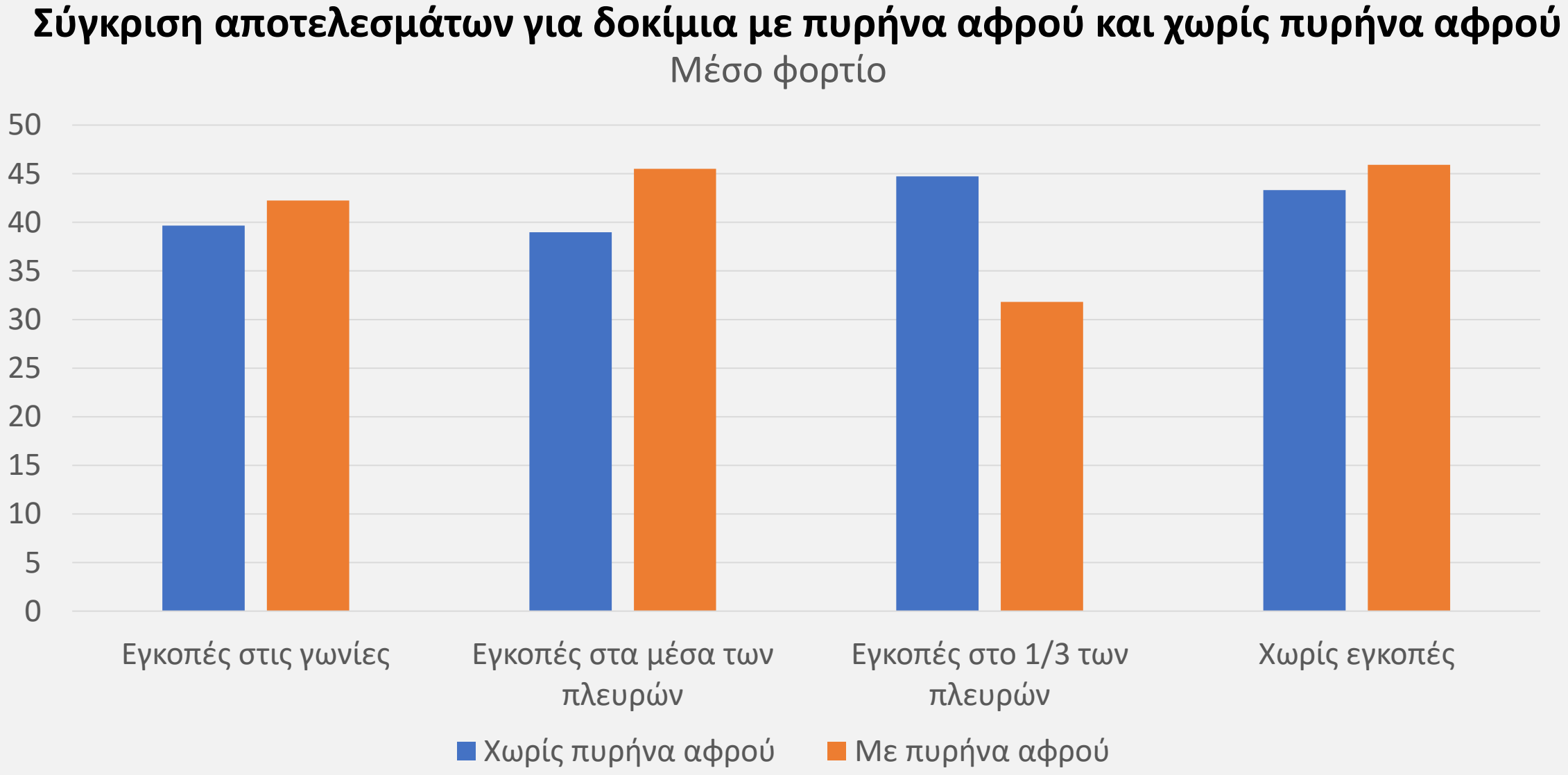
Ανάλυση αποτελεσμάτων

Συγκεντρωτικός πίνακας μετρήσεων πειράματος για σύνολο δοκιμίων

Δοκίμιο	Μέσο Φορτίο	Μέγιστο φορτίο	Δείκτης ομοιομορφίας φορτίου	Ενέργεια απορρόφησης	Διαδρομή εμβόλου για μέγιστο φορτίο	Συνολική διαδρομή εμβόλου
	Pmean (KN)	Pmax (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

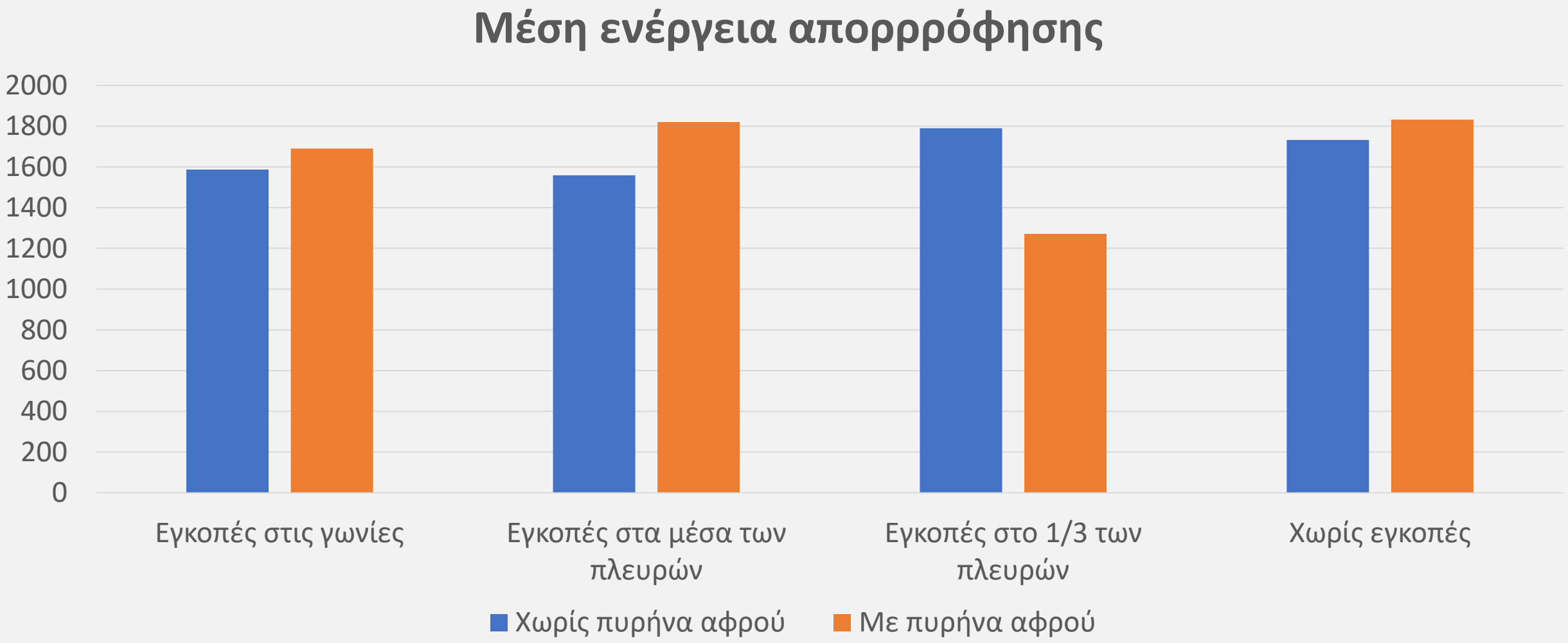
Ανάλυση αποτελεσμάτων

Ανάλυση αποτελεσμάτων



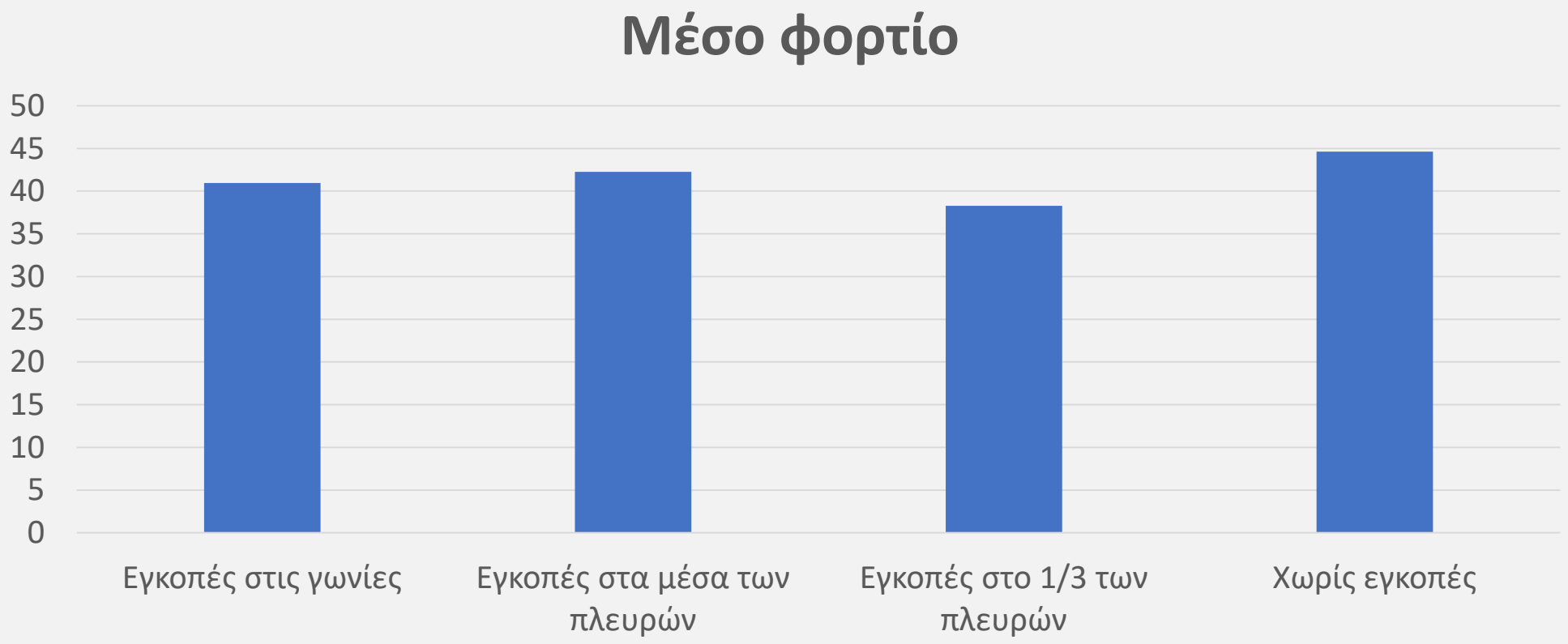
Ανάλυση αποτελεσμάτων

Σύγκριση αποτελεσμάτων για δοκίμια με πυρήνα αφρού και χωρίς πυρήνα αφρού

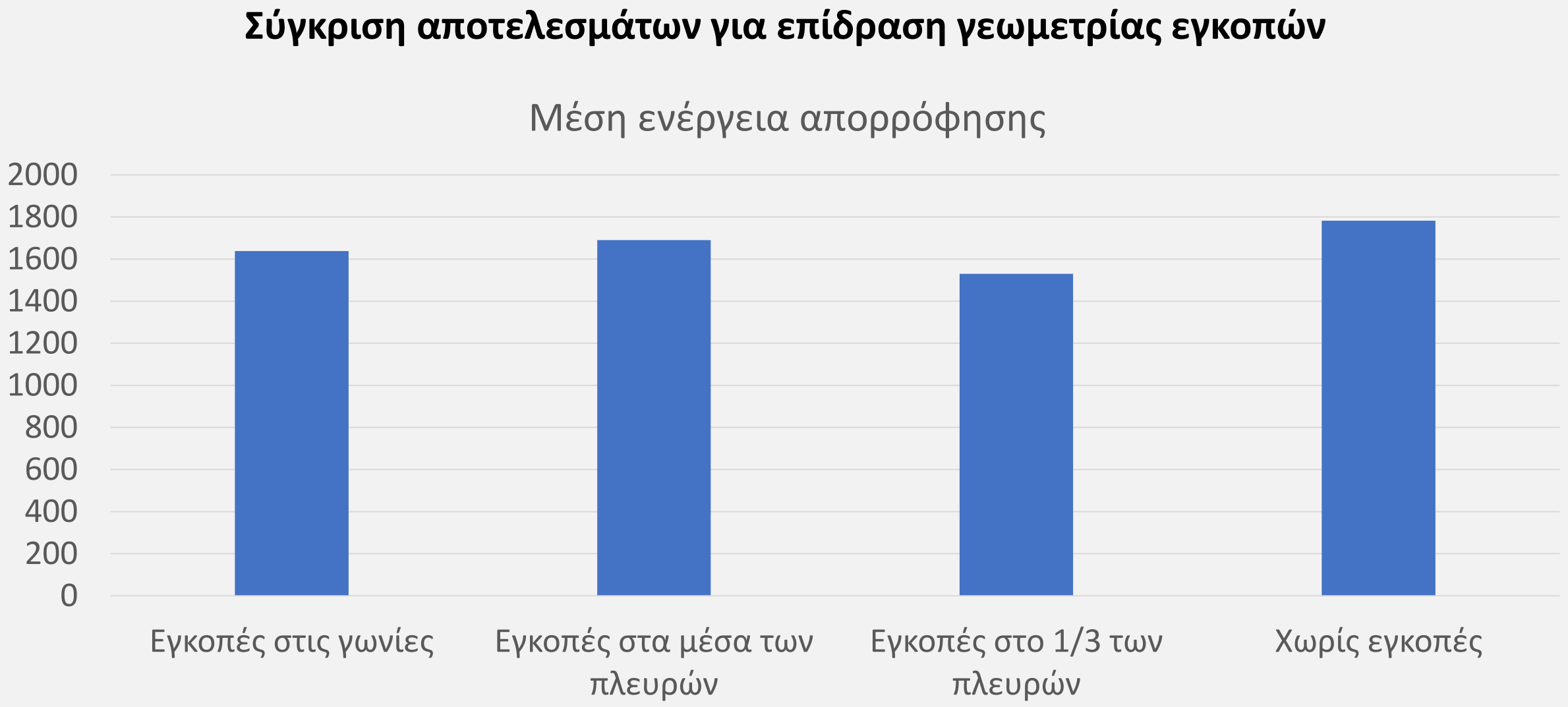


Ανάλυση αποτελεσμάτων

Σύγκριση αποτελεσμάτων για επίδραση γεωμετρίας εγκοπών



Ανάλυση αποτελεσμάτων



Ανάλυση αποτελεσμάτων

- Μέγιστη ενέργεια απορρόφησης είχε το Δοκίμιο 8 το οποίο είχε εγκοπές στο 1/3 των πλευρών του και μέσο πάχος 3.24 mm, (Eabs=1967 J)

- Ελάχιστη ενέργεια απορρόφησης είχε το Δοκίμιο 13 (Eabs=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).

- 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.

Ανάλυση αποτελεσμάτων

- 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

- Ελάχιστο δείκτη ομοιομορφίας φορτίου είχε το Δοκίμιο 13 (c.f.e=0.15), το οποίο κατέρρευσε σπάζοντας κατά μήκος.

- Ελάχιστο δείκτη ομοιομορφίας φορτίου (εκτός του δοκιμίου 13) είχε το δοκίμιο 2 (c.f.e=0,43), το οποίο είχε εγκοπές στις γωνίες, και μέσο πάχος 2,85mm.

- Μέγιστο μέσο φορτίο είχε το δοκίμιο 8 (Pmean=49.188 KN). Το δοκίμιο 8 είχε εγκοπές στο 1/3 των πλευρών του και μέσο πάχος 3.24 mm

- Ελάχιστο μέσο φορτίο είχε το δοκίμιο 13 (Pmean=13,084 KN).

Ανάλυση αποτελεσμάτων

- Ελάχιστο μέσο φορτίο (εκτός του δοκιμίου 13) είχε το δοκίμιο 7 (Pmean=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.

Ανάλυση αποτελεσμάτων

- **Αποτελέσματα σχετικά με την επίδραση των εγκοπών**

  - 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.

Ανάλυση αποτελεσμάτων

- **Αποτελέσματα σχετικά με την επίδραση των εγκοπών**

  - 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 παρατηροούμε πως τα αποτελέσματα για τα δοκίμια αυτά είναι κατά σχεδόν 10% καλύτερα από τις άλλες περιπτώσεις δημιουργίας εγκοπών.

Ανάλυση αποτελεσμάτων

- **Αποτελέσματα σχετικά με την επίδραση των εγκοπών**

  - Τέλος, και πιο σημαντικό, η εγκοπή που δημιουργήσαμε είναι κάθετη με την ρωγμή που χρησιμοποιεί η διαδικασία του mushrooming.
  - Εικάζουμε πως οι ατέλειες μεταξύ των στρώσεων του πολυμερούς παίζουν πιο μεγάλο ρόλο στην κατάρρευση από τις εγκοπές που εμείς δημιουργήσαμε.
  - Αντιστρόφως, ένα πολυμερές όπως το FGRP θα εμφάνιζε πολύ μεγαλύτερο Pmax και Pmean εάν είχαν αφαιρεθεί όλες οι ατέλειες και ο πιθανός αέρας ανάμεσα από τις στρώσεις.

Ανάλυση αποτελεσμάτων

- **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 οριακά την συμπεριφορά των δοκιμίων όσο αφορά τους δείκτες crashworthiness.

  - Σε όλες τις περιπτώσεις έχουμε 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.

Ανάλυση αποτελεσμάτων

- **Αποτελέσματα σχετικά με την επίδραση του αφρού στον πυρήνα**

  - Η διαφορά αυτή μπορεί να εξηγηθεί καθώς το δοκίμιο Νο 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.

Ευχαριστώ για την προσοχή σας