Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών

Διπλωματική Εργασία

# Αριθμητική μοντελοποίηση στοιχείου ενισχυμένου κελύφους από θερμοπλαστικά σύνθετα υλικά με μηχανισμούς διακοπής αποσύνδεσης

**ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ**

Επιβλέπων

Κωνσταντίνος Τσερπές, Καθηγητής

Εργαστήριο Τεχνολογίας & Αντοχής Υλικών

**ΠΑΤΡΑ 2024**




Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών

Βασιλείου Χαράλαμπος

© 2024 – Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος




Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε

από τον

Βασιλείου Χαράλαμπος

1054496



Εργαστήριο Τεχνολογίας & Αντοχής Υλικών

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας δεν υποδηλοί την αποδοχή των γνωμών του συγγραφέα.
Κατά τη συγγραφή τηρήθηκαν οι αρχές της ακαδημαϊκής δεοντολογίας.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

**ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ..... V**

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ ..... VII**

**ABSTRACT ..... VIII**

**ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ..... IX**

**ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ ..... XI**

**ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ ..... XII**

**1 Εισαγωγή ..... - 1 -**

1.1 Θερμοπλαστικά σύνθετα υλικά ..... - 1 -

1.1.1 Διαφορές με θερμοσκληρυνόμενα ..... - 2 -

1.2 Συνδέσεις θερμοπλαστικών συνθέτων υλικών ..... - 3 -

**2 Θεωρία ..... - 4 -**

2.1 Συμπολυμερισμός ..... - 4 -

2.2 Πολυαρυλαιθερκετόνη (PAEK) ..... - 5 -

2.3 Μηχανικές δοκιμές σε δομικά στοιχεία αεροσκάφους ..... - 5 -

2.3.1 Δομή ατράκτου αεροσκάφους ..... - 8 -

2.4 Μηχανισμοί διακοπής αποσύνδεσης ..... - 10 -

2.4.1 Ήλωση μέσω τριβής χαμηλής διάτμησης με επαγωγή ..... - 10 -

2.4.2 Σημειακή συγκόλληση μέσω τριβής και επαναπλήρωσης ..... - 11 -

2.5 Αριθμητικές μέθοδοι ..... - 13 -

**3 Τεχνολογικό πρόβλημα ..... - 17 -**

3.1 Τμήμα ατράκτου, υλικά και γεωμετρία ..... - 17 -

3.2 Πειραματική διαδικασία κελύφους-δοκίδας ..... - 19 -

**4 Ανάπτυξη αριθμητικών μοντέλων ..... - 22 -**

4.1 Διακριτοποίηση και γεωμετρία ..... - 22 -

4.2 Μοντέλα υλικών ..... - 24 -

4.3 Μηχανισμοί διακοπής αποσύνδεσης ..... - 26 -

4.4 Συνοριακές συνθήκες ..... - 28 -

4.5 Παράμετροι ..... - 29 -

**5 Αριθμητικά αποτελέσματα ..... - 29 -**

5.1 Αποτελέσματα προσομοιώσεων μοντέλων κελύφους - στοιχείων συνοχής - δοκιδας- 29 -

5.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων μοντέλων κελύφους-στοιχείων συνοχής-δοκίδας 500mm- 45 -

**6 Συμπεράσματα.....- 46 -**

**Βιβλιογραφία .....- 47 -**

# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε η αποτελεσματικότητα μηχανισμών διακοπής αποσύνδεσης σε διατάξεις κελύφους-στοιχείων συνοχής-δοκίδων(stringer) σε μονοαξονικές φορτίσεις. Για την εύρεση της βέλτιστης διάταξης εξετάστηκαν οι παράμετροι των μηχανισμών με βάση τη διάμετρο τους και την απόσταση από το σημείο έναρξης της αποσύνδεσης. Οι πλάκες συνθέτων υλικών που χρησιμοποιήθηκαν αποτελούνταν από θερμοπλαστική μήτρα πολυαρυλαιθερκετόνης χαμηλού σημείου τήξης με ενίσχυση άνθρακα οι οποίες προσομοιώθηκαν με σύνδεση συμπολυμερισμού με τη χρήση στοιχείων συνοχής μηδενικού πάχους. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η ήλωση μέσω τριβής χαμηλής διάτμησης με επαγωγή και η σημειακή συγκόλληση μέσω τριβής και επαναπλήρωσης.

Στην πρώτη μέθοδο ένας ήλος περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα ενώ ταυτόχρονα θερμαίνεται αυτός και οι πλάκες που θα συνδέσει και με εφαρμογή δύναμης τις διατρεί μέχρι το επιθυμητό βάθος. Η δεύτερη μέθοδος τήκει σημειακά τις πλάκες μέσω τριβής ενός περιστρεφόμενου πείρου και με τη χρήση δακτυλίων το υλικό αφαιρείται και επανατοποθετείται για να πληρώσει την οπή που δημιουργήθηκε.

Τα αποτελέσματα έδειξαν σημαντική αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό με την εφαρμογή των βέλτιστων ανά περίπτωση παραμέτρων. Κάποιες από αυτές τις διατάξεις παρουσίασαν ελάχιστη αύξηση της αντοχής στο πείραμα θλίψης ενώ σε εφελκυσμό παρουσίασαν καλύτερη απόκριση.

Το δεύτερο μέρος της εργασίας μελετήθηκε μια διαφορετική διάταξη σε θλίψη με αρχική αποσύνδεση στο μέσο της. Και σε αυτή την περίπτωση, η εφαρμογή των μηχανισμών βελτίωσε την απόκριση τους.

Λόγω των περιορισμένων πειραματικών δεδομένων, η πλήρης επαλήθευση των αποτελεσμάτων δεν είναι εφικτή. Παρ' όλα αυτά, η ακρίβεια μοντελοποίησης του φαινομένου κρίνεται καλή και τα αποτελέσματα ωθούν σε περαιτέρω μελέτη των μηχανισμών αυτών.

*Λέξεις κλειδιά*: Πολυαρυλαιθερκετόνη, *διαμήκης δοκίδα, μηχανισμός διακοπής αποσύνδεσης, ILSFSR, RFSSW*

# ABSTRACT

In this thesis, the effectiveness of crack arrest features was analyzed on models consisting of skin-cohesive elements-stringer. In order to find the best layout, the model parameters considered were the diameter of the mechanism and its distance from the crack initiation point. The plates used were made of composite materials consisting of a thermoplastic Low-Melt PAEK matrix reinforced with carbon fibers modeled as co-consolidated plates with zero thickness cohesive elements. The methods used were the Induction Low Shear Friction Spot Riveting and the Refill Friction Stir Spot Welding.

In the first method, a rotating rivet and the plates were heated while it was inserted until the desirable depth was reached. The second method melts the plates locally using friction and then the melted material is used to refill the hole created.

The results showed a significant increase in the strength of the models when loaded in tension under the optimal parameters. In some cases, the mechanisms worsened the strength under compression loading while all of them showed increased results in tension.

The second part of the thesis modeled another layout under compression with an initial crack at the middle of the stringer. The results in this case also showed increased strength after the optimal mechanisms were created.

Because of the limited data and analyses conducted, the verification of the effectiveness of the mechanisms is not feasible. The results however push towards further studying of these mechanisms and the use of composite materials in more applications due to their flexibility and high ratio of strength to weight.

*Keywords: Polyaryletherketone, stringer, crack arrest feature, ILSFSR, RFSSW*

# ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

**Σχήμα 1.1-1:Δομή άμορφων και ημικρυσταλλικών πολυμερών [3]** ..... - 2 -
**Σχήμα 2.3-1: Δοκιμή μελών που το απαρτίζουν [18]** ..... - 7 -
**Σχήμα 2.3-2: Δοκιμές πλήρους κλίμακας [18]** ..... - 8 -
**Εικόνα 2.3-3: Σχεδιασμός truss [19]** ..... - 8 -
**Σχήμα 2.3-4: Σχεδιασμός monocoque [20]** ..... - 9 -
**Σχήμα 2.3-5: Σχεδιασμός semi-monocoque [20]** ..... - 9 -
**Σχήμα 2.4-1: Διαδικασία ήλωσης μέσω τριβής χαμηλής διάτμησης με επαγωγή [23]** - 11 -
**Σχήμα 2.4-2: Διατομή ήλου διαμέτρου 5mm [23]** ..... - 11 -
**Σχήμα 2.4-4: Σημειακή συγκόλληση μέσω τριβής [25]** ..... - 12 -
**Σχήμα 2.4-4: Σημειακή συγκόλληση μέσω τριβής και επαναπλήρωσης [25]** ..... - 12 -
**Εικόνα 2.4-5: (a) friction stir spot welding, (b) refill riction stir spot welding [28]** ..... - 12 -
**Σχήμα 2.5-1: Στάδια διάδοσης ρωγμής [31]** ..... - 14 -
**Σχήμα 2.5-2: (α) ρωγμή σε πλάκα με προϋπάρχουσα οπή, (b) μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, (c) εκτεταμένη μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων [33]** ..... - 15 -
**Σχήμα 2.5-3: Νόμος έλξης – διαχωρισμού [35]** ..... - 16 -
**Σχήμα 2.5-4: Διγραμμικός νόμος έλξης - διαχωρισμού για μικτού τύπου φόρτιση** ..... - 16 -
**Σχήμα 3.1-1: Ιδιότητες πλακών μήτρας LMPAEK με ενίσχυση άνθρακα [37]** ..... - 18 -
**Εικόνα 3.1-2: Διαστάσεις δοκίδας** ..... - 19 -
**Σχήμα 3.2-1: Διάταξη κελύφους-δοκίδας** ..... - 19 -
**Σχήμα 3.2-2: Διάταξη κελύφους-δοκίδας με αρχική αποσύνδεση [23]** ..... - 20 -
**Σχήμα 3.2-3: Διαστάσεις κελύφους-δοκίδας με αρχική αποσύνδεση [23]** ..... - 20 -
**Σχήμα 3.2-4: Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης [23]** ..... - 21 -
**Εικόνα 3.2-5: Διάταξη κελύφους – δοκίδας [23]** ..... - 21 -
**Εικόνα 3.2-5: Φαινόμενο λυγισμού σε (α) δοκίμιο (b) μοντέλο [23]** ..... - 22 -
**Εικόνα 4.1-1: Κέλυφος-στοιχεία συνοχής-δοκίδα** ..... - 23 -
**Σχήμα 4.1-2: Πυκνότερο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων** ..... - 23 -
**Σχήμα 4.1-3: Διατομή δοκίδας** ..... - 23 -
**Σχήμα 4.2-1: Νόμος έλξης-διαχωρισμού [34]** ..... - 25 -
**Σχήμα 4.3-1: ILSFSR 25mm 5mm διάμετρος** ..... - 26 -
**Σχήμα 4.3-2: Μηχανισμοί διακοπής αποσύνδεσης** ..... - 28 -
**Σχήμα 5.1-1: Καμπύλη δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου αναφοράς** ..... - 29 -
**Σχήμα 5.1-2: Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης ILSFSR σε εφελκυσμό** ..... - 30 -
**Εικόνα 5.1-3: Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης ILSFSR σε θλίψη** ..... - 31 -
**Σχήμα 5.1-4: Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης RFSSW σε εφελκυσμό** ..... - 31 -
**Εικόνα 5.1-5: Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης RFSSW σε θλίψη** ..... - 32 -
**Σχήμα 5.1-6: Συγκεντρωτικό διάγραμμα δύναμης- μετατόπισης σε εφελκυσμό** ..... - 32 -
**Σχήμα 5.1-7: Συγκεντρωτικό διάγραμμα δύναμης- μετατόπισης σε θλίψη** ..... - 33 -
**Σχήμα 5.1-8: Σύγκριση ILSFSR-RFSSW σε εφελκυσμό** ..... - 34 -
**Εικόνα 5.1-9: Μέγιστη δύναμη ILSFSR-RFSSW σε εφελκυσμό** ..... - 34 -
**Σχήμα 5.1-10: Μέγιστη δύναμη ILSFSR-RFSSW θλίψη** ..... - 35 -
**Σχήμα 5.1-11: Συγκεντρωτική καμπύλη ILSFSR σε εφελκυσμό** ..... - 35 -
**Σχήμα 5.1-12: Συγκεντρωτικό διάγραμμα ILSFSR σε θλίψη** ..... - 36 -
**Σχήμα 5.1-13: Συγκεντρωτικό διάγραμμα RFSSW σε εφελκυσμό** ..... - 36 -

**Εικόνα 5.1-14: Συγκεντρωτικό διάγραμμα RFSSW σε θλίψη** ..... - 37 -
**Σχήμα 5.1-15: Μέγιστες δυνάμεις ILSFSR σε εφελκυσμό** ..... - 37 -
**Σχήμα 5.1-16: Συγκεντρωτικό διάγραμμα ILSFSR σε θλίψη** ..... - 37 -
**Σχήμα 5.1-17: Μέγιστες δυνάμεις RFSSW σε εφελκυσμό** ..... - 38 -
**Εικόνα 5.1-18: Μέγιστες δυνάμεις RFSSW σε θλίψη** ..... - 38 -
**Εικόνα 5.1-19: Συγκριτικό διάγραμμα ILSFSR-RFSSW σε εφελκυσμό** ..... - 39 -
**Εικόνα 5.1-20: Συγκριτικό διάγραμμα ILSFSR-RFSSW σε θλίψη** ..... - 39 -
**Σχήμα 5.2-21: Αναφορά σε εφελκυσμό** ..... - 40 -
**Σχήμα 5.2-22:ILSFSR 3mm σε εφελκυσμό** ..... - 40 -
**Σχήμα 5.2-23:ILSFSR 5mm σε εφελκυσμό** ..... - 41 -
**Σχήμα 5.2-24:RFSSW 6mm σε εφελκυσμό** ..... - 41 -
**Σχήμα 5.2-25:RFSSW 9mm σε εφελκυσμό** ..... - 42 -
**Σχήμα 5.2-26: Αναφορά σε θλίψη** ..... - 42 -
**Σχήμα 5.2-27:ILSFSR 3mm σε θλίψη** ..... - 43 -
**Σχήμα 5.2-28: ILSFSR 5mm σε θλίψη** ..... - 43 -
**Σχήμα 5.2-29: RFSSW 6mm θλίψη** ..... - 44 -
**Σχήμα 5.2-30: RFSSW 9mm θλίψη** ..... - 44 -
**Σχήμα 5.2-1: Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης ILSFSR-RFSSW σε θλίψη** ..... - 45 -
**Σχήμα 5.2-2: Μέγιστες δυνάμεις ILSFSR-RFSSW** ..... - 46 -

# ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

**Πίνακας 2.2-1:Ιδιότητες LMPAEK** ..... - 5 -
**Πίνακας 4.2-1: Ιδιότητες σύνθετων πλακών** ..... - 25 -
**Πίνακας 4.2-2: Ιδιότητες στοιχείων συνοχής** ..... - 26 -
**Πίνακας 4.3-1: Ιδιότητες υλικού MAT_4A_MICROMEC** ..... - 27 -
**Σχήμα 4.3-2: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης υλικού MAT_4A_MICROMEC** ..... - 27 -
**Πίνακας 4.3-3: Ιδιότητες σύνδεσης με στοιχεία συνοχής** ..... - 28 -
**Πίνακας 4.5-1: Παράμετροι πειράματος** ..... - 29 -
**Πίνακας 5.1-1: Βελτίωση απόκρισης** ..... - 39 -
**Πίνακας 5.1-2: πίνακας μοντέλων προσομοιώσεων** ..... **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**

# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παραμετρική προσομοίωση συνθέτων υλικών σε φόρτιση εφελκυσμού και θλίψης, η εξοικείωση με τις μηχανισμούς διακοπής αποσύνδεσης όπως και ολόκληρη η πειραματική διαδικασία αποτέλεσαν εμπειρίες και γνώσεις που δεν θα μπορούσα να έχω αποκτήσει διαφορετικά. Η παρατήρηση της απόκρισής τους στις συνθήκες του πειράματος και η σύγκριση των αποτελεσμάτων ήταν μια ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα διαδικασία και για αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Τσερπέ Κωνσταντίνο για την ευκαιρία που μου έδωσε.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω το διδάκτορα Σιούτη Ιωάννη για την καθοδήγηση και βοήθεια του στη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας όπως και της υποστήριξής του σε θέματα θεωρίας και πειραματικών μελετών.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υποστήριξη της σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάγκη για την αύξηση της αντοχής και της ανθεκτικότητας των κατασκευών με την ταυτόχρονη μείωση του βάρους τους οδήγησε στη μελέτη και ανάπτυξη των σύνθετων υλικών. Ως σύνθετα υλικά ορίζουμε εκείνα τα οποία αποτελούνται από δύο ή περισσότερες συνιστώσες υλικών οι οποίες είναι διακριτές τόσο στη μακροσκοπική όσο και στη μικροσκοπική κλίμακα. Τα υλικά αυτά προσφέρουν ευρύ φάσμα μηχανικών ιδιοτήτων που μπορούν να τροποποιηθούν ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε κατασκευής παρεμβαίνοντας στη μικροσκοπική κλίμακά τους.

Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από τη μήτρα και την ενίσχυση ανάμεσα στα οποία σχηματίζεται η διεπιφάνεια. Ο ρόλος της μήτρας είναι η προστασία της ενίσχυσης και η μεταφορά των φορτίων σε αυτή, ενώ ο ρόλος της ενίσχυσης είναι η παραλαβή των φορτίων [1].

Τα σύνθετα υλικά μπορούν να ταξινομηθούν στις παρακάτω ευρείς κατηγορίες [2]:

- Φυσικά σύνθετα υλικά (ξύλο, μπαμπού, μύες)
- Μικροσύνθετα (μεταλλικά κράματα, θερμοπλαστικά, πολύστρωτα σύνθετα υλικά)
- Μακροσύνθετα (ενισχυμένο σκυρόδεμα, γαλβανισμένος χάλυβας)

Πιο συγκεκριμένα, τα μικροσύνθετα υλικά μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με το σχήμα και το μέγεθος της ενίσχυσης ως [2]:

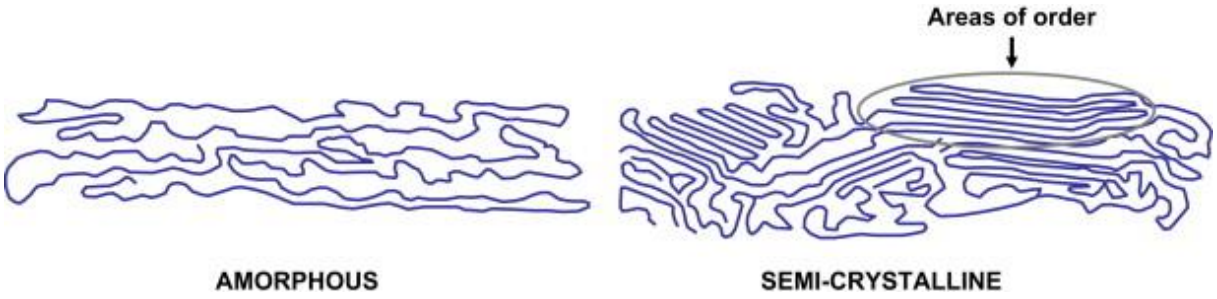
- Συνεχείς παράλληλες ίνες ή τυχαίας κατεύθυνσης
- Κοντές παράλληλες ίνες ή τυχαίας κατεύθυνσης
- Σωματίδια διαφόρων σχημάτων
- Ελασματοειδούς μορφής
- Αλληλοδιαχεόμενα δίκτυα
- Πολυσύνθετα υβριδικά ενισχυμένα με κόκκους και ίνες

## 1.1 ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Μία κατηγορία συνθέτων υλικών γνωστά για τη ευελιξία στη χρήση τους είναι τα θερμοπλαστικά υλικά. Το χαρακτηριστικό αυτής της κατηγορίας συνθέτων υλικών είναι η δυνατότητα μορφοποίησης τους όταν τους εφαρμοστεί πίεση σε συνδυασμό με θερμότητα, το οποίο τα καθιστά ανακυκλώσιμα και ευέλικτα στις εφαρμογές τους. Η σύνθεση τους αποτελείται από μακρομόρια τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με ασθενείς δεσμούς Van der Walls, οι οποίοι όταν θερμανθούν ασθενούν και τα μετατρέπουν σε ιξώδη ρευστά. Αυτή η διαδικασία είναι αναστρέψιμη καθώς με την ψύξη διατηρούν τη μορφή τους και η διαδικασία αυτή μπορεί να επαναληφθεί με μόνο μειονέκτημα την υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους. Η κατώτατη τιμή στη θερμοκρασιακή περιοχή κατά την οποία γίνεται μετάβαση των θερμοπλαστικών από στερεά σε υγρά ονομάζεται θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης,$T_g$. Η αντίστοιχη ανώτατη θερμοκρασία αυτής της περιοχής ονομάζεται θερμοκρασία τήξης, $T_m$. Τέλος το θερμοκρασιακό όριο πάνω από το οποίο το στοιχείο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κατασκευαστικό ονομάζεται θερμοκρασία εκτροπής.[1]

Τα θερμοπλαστικά σύνθετα υλικά μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με τη μοριακή δομή τους σε δύο κατηγορίες, τα άμορφα και τα ημικρυσταλλικά πολυμερή. Τα άμορφα πολυμερή δεν παρουσιάζουν κρυσταλλική δομή ούτε αλληλεπιδράσεις μεταξύ κοντινών μακρομορίων. Τα ημικρυσταλλικά πολυμερή παρουσιάζουν τάξη ανά περιοχές και μπορούν να στοιβαχτούν ή να

ευθυγραμμιστούν για να δημιουργήσουν κρυσταλλικές δομές με κάποιες άμορφες περιοχές. Το ποσοστό της κρυσταλλικότητας τους εξαρτάται από τη χημική δομή του πολυμερούς, η οποία καθορίζει την οργάνωση των πολυμερών αλυσίδων. Τα ημικρυσταλλικά θερμοπλαστικά υλικά είναι συνήθως αδιαφανή σε σχέση με τα άμορφα και έχουν καλύτερη αντοχή σε χημικά λόγω των λιγότερων άμορφων περιοχών τους. Στο παρακάτω σχήμα(σχήμα 1.1-1) παρουσιάζεται η διαφορά στη δομή των άμορφων και των ημικρυσταλλικών πολυμερών.[3]




***Σχήμα 1.1-1:Δομή άμορφων και ημικρυσταλλικών πολυμερών [3]***

Μερικά χαρακτηριστικά άμορφα πολυμερή είναι:[4]

- Πολυμεθακρυλικό μεθύλιο, Polymethyl methacrylate (PMMA / Acrylic)
- Πολυστυρένιο, Polystyrene (PS)
- Πολυανθρακικό, Polycarbonate (PC)
- Πολυσουλφόνη, Polysulfone (PSU)
- Πολυβινυλοχλωρίδιο, Polyvinyl chloride (PVC)
- Ακρυλονιτρίλιο-βουταδιένιο-στυρόλιο, Acrylonitrile butadiene styrene (ABS)
- Πολυαιθεριμίδιο, Polyetherimide (PEI)

Αντίστοιχα μερικά ημικρυσταλλικά πολυμερή είναι:[4]

- Πολυαιθυλένιο, Polyethylene (PE)
- Πολυπροπυλένιο, Polypropylene (PP)
- Τερεφθαλικό πολυβουτυλένιο, Polybutylene terephthalate (PBT)
- Τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο, Polyethylene terephthalate (PET)
- Πολυαιθεροαιθεροκετόνη, Polyetheretherketone (PEEK)
- Πολυαρυλαιθερκετόνη, Polyaryletherketone (PAEK)

Τα ημικρυσταλλικά πολυμερή έχουν οργανωμένη μοριακή δομή με διακριτό σημείο τήξης. Λόγω της δομής τους, τα περισσότερα αντανακλούν το φως και είναι αδιαφανή. Κατά τη στερεοποίηση τους, παρατηρείται σημαντική μείωση στον όγκο τους.

Τα άμορφα πολυμερή έχουν τυχαία μοριακή διάταξη και τήκονται σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών σε σχέση με τα ημικρυσταλλικά πολυμερή. Είναι διαφανή και η μείωση όγκου τους είναι μικρότερη. Τέλος, έχουν μικρότερη αντοχή σε χημικά και διαλύτες συγκριτικά με τα ημικρυσταλλικα. [5]

### 1.1.1 Διαφορές με θερμοσκληρυνόμενα

Σε αντίθεση με τα θερμοπλαστικά πολυμερή, τα θερμοσκληρυνόμενα είναι κατηγορία συνθέτων υλικών τα οποία όταν θερμανθούν πολυμερίζονται, διαδικασία η οποία είναι μη αντιστρεπτή και τα καθιστά μη ανακυκλώσιμα. Με περαιτέρω θέρμανση τους πάνω από τη θερμοκρασία εκτροπής, υπόκεινται σε υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους. Για αυτό το λόγο ο

ρυθμός και ο βαθμός πολυμερισμού του υλικού παίζουν σημαντικό ρόλο στις ιδιότητες του καθώς μπορούν να δημιουργηθούν προβλήματα και ατέλειες στη δομή του όπως[1]:

- Μερική διαβροχή των ινών
- Εγκλωβισμός αέρα και δημιουργία κενών χώρων
- Μη ικανοποιητική ποιότητα πρόσφυσης των ινών με τη μήτρα

Παρά τους περιορισμούς που παρουσιάζουν στη δημιουργία και το σχήμα τους, τα πλεονεκτήματα τους είναι:

- Υψηλή αντοχή σε κρούση
- Θερμική ευστάθεια με μεγαλύτερες θερμοκρασίες λειτουργίας από τα θερμοπλαστικά
- Χαμηλή θερμική αγωγιμότητα
- Υψηλή αντοχή σε διάβρωση και διαλύτες
- Εξαιρετική χημική αντίσταση
- Χαμηλότερο κόστος κατασκευής
- Ευρύ φάσμα μηχανικών ιδιοτήτων

Η βασική χρήση των θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών είναι ως μήτρα σε σύνθετα υλικά, οι οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε εποξειδικές, πολυεστερικές και βινυλεστερικές. Οι ιδιότητες τους εξαρτώνται από την πυκνότητα των δεσμών μεταξύ των μοριακών αλυσίδων τους με την αύξηση των οποίων επιτυγχάνεται αύξηση του μέτρου ελαστικότητας τους, καλύτερη θερμική ευστάθεια και χημική αντίσταση.

## 1.2 ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Οι τεχνικές σύνδεσης των θερμοπλαστικών υλικών κατατάσσονται σε τρεις ευρείς κατηγορίες:

- Μηχανικές συνδέσεις
- Συνδέσεις με κόλλα
- Συγκολλήσεις

Οι μηχανικές συνδέσεις προϋποθέτουν τη χρήση συνδέσμων όπως οι κοχλίες και οι ήλοι καθώς και την ύπαρξη ή δημιουργία οπών. Χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση όμοιων και ανόμοιων υλικών δημιουργώντας μόνιμες ή και προσωρινές συναρμογές. Ο σκοπός των συνδέσμων είναι η μεταφορά των φορτίων στα διάφορα εξαρτήματα της κατασκευής. Χρησιμοποιούνται εκτεταμένα λόγω της ευκολίας στη συναρμολόγηση και αποσυναρμολόγηση καθώς και γιατί δεν απαιτείται κάποια επιφανειακή κατεργασία. Οι προσωρινές συναρμογές προσφέρουν τη δυνατότητα ελέγχου και επιδιόρθωσης των εξαρτημάτων που την απαρτίζουν. Τα μειονεκτήματα αντιθέτως είναι η προσθήκη βάρους στην κατασκευή, συγκεντρώσεις τάσεων στις οπές καθώς και διάβρωση, παράγοντες οι οποίοι μπορεί αν είναι περιοριστικοί για τη χρήση τέτοιον μεθόδων. Για αυτό το λόγο πραγματοποιούνται πολλές έρευνες για τη μελέτη της αντοχής και της αξιοπιστίας τέτοιων συνδέσεων. Οι έρευνες αυτές σχετίζονται με τη μελέτη της συγκέντρωσης τάσεων γύρω από την οπή, το βέλτιστο σχεδιασμό των συνδέσμων καθώς και την κατανομή των φορτίων στην κατασκευή. [6],[7]

Στις συνδέσεις με κόλλα, γίνεται τοποθέτησή της μεταξύ των τμημάτων η οποία και έχει το ρόλο της μεταφοράς τον φορτίων. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε αεροναυπηγικές κατασκευές καθώς και στην αεροδιαστημική βιομηχανία λόγω των χαρακτηριστικών τους που τις κάνει ιδανικές σε τέτοιες εφαρμογές. Ο περιορισμός στο βάρος, η υψηλή αντοχή σε κόπωση, η

απόσβεση ηχητικών δονήσεων όπως και η δυνατότητα δημιουργίας αεροδυναμικών επιφανειών είναι μερικά από τα πολλά πλεονεκτήματα που προσφέρουν[8].

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν και οι συνδέσεις με διαλύτη η εφαρμογή του οποίου προσφέρει τη δυνατότητα ανάμιξης των πολυμερών αλυσίδων δύο τμημάτων. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται κυρίως σε υαλώδη άμορφα θερμοπλαστικά, όπως το πολυανθρακικό, το ακρυλικό και οι πολυστυρενικές ρητίνες. Μερικά από τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι:

- Η ταχύτητα δημιουργίας της σύνδεσης
- Το χαμηλό κόστος
- Η ομοιόμορφη κατανομή των φορτίων στην περιοχή αυτή
- Και ο υψηλός λόγος αντοχής προς βάρος της σύνδεσης

Τέλος οι συνδέσεις με διαλύτη εφαρμόζονται κυρίως σε άμορφα θερμοπλαστικά υλικά ενώ η σύνδεση με κόλλα σχεδόν σε όλα τα πολυμερή.[6]

Συγκόλληση χαρακτηρίζεται η διαδικασία σύνδεσης δύο πολυμερών με τη σύντηξη και στη συνέχεια ενοποίηση των επιφανειών τους που βρίσκονται σε επαφή. Με αυτό τον τρόπο οι ιδιότητες της σύνδεσης μπορούν να φτάσουν τις ιδιότητες του πολυμερούς. Όπως και στις συνδέσεις με κόλλα, δεν δημιουργούνται συγκεντρώσεις τάσεων λόγω οπών με αποτέλεσμα να κατανέμονται πιο ομοιόμορφα τα φορτία. Τέτοιων ειδών συνδέσεις προτιμώνται συγκριτικά με τις υπόλοιπες δύο καθώς είναι πιο ταχείς και με μεγαλύτερη δυνατότητα αυτοματοποίησης και δημιουργούν ένα συνεχή δεσμό μεταξύ των εξαρτημάτων χωρίς την ανάγκη δημιουργίας οπής και συγκέντρωσης τάσεων. Στα θερμοπλαστικά σύνθετα υλικά, λόγω της δυνατότητας επαναμορφοποίησης τους σε ένα εύρος θερμοκρασιών, τέτοιες μέθοδοι θεωρούνται ιδανικές καθώς γίνεται σύντηξη των προς σύνδεση επιφανειών και με την ψύξη τους επανακτούν τις ιδιότητες τους. [9][10]

Οι διαδικασίες συγκόλλησης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο ομάδες[11]:

1. Διαδικασίες που περιλαμβάνουν την κίνηση μηχανικών εξαρτημάτων όπως η συγκόλληση με υπέρηχους, συγκόλληση τριβής και συγκόλληση δόνησης
2. Διαδικασίες που περιλαμβάνουν θέρμανση, όπως η συγκόλληση θερμασμένων πλακών και η συγκόλληση θερμών αερίων

# 2 ΘΕΩΡΙΑ

## 2.1 ΣΥΜΠΟΛΥΜΕΡΙΣΜΟΣ

Ο συμπολυμερισμός ανήκει στις τεχνικές σύνδεσης που χρησιμοποιούν μαζική θέρμανση των τεμαχίων, όπως είναι η μορφοποίηση σε θερμαινόμενο θάλαμο πίεσης (autoclaving) και η μορφοποίηση με πίεση (compression moulding). Σε αυτή τη μέθοδο, ολόκληρο το σύνθετο υλικό φτάνει στη θερμοκρασία τήξης ενώ ταυτόχρονα του ασκείται πίεση. Στη συνέχεια η σύνδεση ψύχεται και η διαδικασία τερματίζεται. Αυτού του είδους η σύνδεση δεν απαιτεί κάποια επιφανειακή προετοιμασία των πλακών και το αποτέλεσμα είναι ένα σύνθετο υλικό με αντοχή και ιδιότητες που μπορεί να φτάσει αυτή των συνιστωσών του. Στην περίπτωση που οι επιφάνειες δεν είναι λείες, μία στρώση κόλλας σε υψηλή θερμοκρασία μπορεί να προστεθεί ανάμεσα τους για να επιτευχθεί καλύτερη επαφή και να διευρυνθεί ο χρόνος στον οποίο μπορεί να γίνει η επεξεργασία. Λόγω των θερμοκρασιών και της δύναμης που πρέπει να εφαρμοστούν σε όλη την έκταση του υλικού, το κόστος της σύνδεσης αυξάνεται καθώς απαιτείται ειδικός εξοπλισμός[12]. Ο ρυθμός ψύξης επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη μορφολογία και τις μηχανικές ιδιότητες του τελικού συνθέτου. Υψηλός ρυθμός ψύξης οδηγεί σε μεγαλύτερη αντοχή, χαμηλή

κρυσταλλικότητα και μέτρο κάμψης καθώς και υψηλή αντοχή σε διαστρωματική αποκόλληση.[13]

## 2.2 ΠΟΛΥΑΡΥΛΑΙΘΕΡΚΕΤΟΝΗ (PAEK)

Η πολυαρυλεθερκετόνη (PAEK) αποτελεί μια κατηγορία θερμοπλαστικών που χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή σε οξείδωση, καλή αντοχή σε κρούση, συγκολλησιμότητα και δεν είναι εύφλεκτα. Η ενίσχυση στα σύνθετα υλικά με μήτρα αυτής της κατηγορίας είναι συνήθως ίνες άνθρακα έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί η δυσκαμψία, η θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, με ταυτόχρονη μείωση του συνολικού βάρους του υλικού. Η διαδικασία κατασκευής των υλικών αυτών αποτελείται από τη δημιουργία μιας προεμποτισμένης στρώσης, όπως για παράδειγμα συνεχών ινών της ίδιας κατεύθυνσης, και η τοποθέτηση στρώσεων διαφορετικού προσανατολισμού με στόχο τη δημιουργία του τελικού συνθέτου. [14]

Η πολυαρυλαιθερκετόνη χαμηλού σημείου τήξης, γνωστή ως Low-Melt PAEK ή LMPAEK, αποτελεί ένα ημικρυσταλλικό πολυμερές με παρόμοιες ιδιότητες με αυτές της PEEK με τη σημαντική διαφορά ότι τήκεται σε θερμοκρασίες ακόμα και 60 βαθμών μικρότερες. Αυτή η θερμοκρασιακή διαφορά προσφέρει καλύτερη επεξεργασιμότητα με ταυτόχρονη αύξηση του χρονικού διαστήματος στο οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί. Μερικά από τα χαρακτηριστικά της είναι[15]:

- Εξαιρετική επεξεργασιμότητα λόγω χαμηλού ιξώδους τήξης
- Χαμηλότερες θερμοκρασίες τήξης
- Εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες
- Χαμηλή απορρόφηση υγρασίας
- Μονωτής ηλεκτρικού ρεύματος
- Εξαιρετική αντοχή σε χημικά και διαλύτες
- Υψηλός λόγος αντοχής προς βάρος
- Σχετικά χαμηλή θερμοκρασία επεξεργασίας

Μερικές από τις ιδιότητες της LMPAEK σε σύνθετο υλικό με ίνες άνθρακα 145 $g/m^2$ ,UD ταινία, 34% περιεκτικότητα όγκο κατ' όγκο ρητίνης παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα[15]:

| | |
|---|---|
| Πυκνότητα ρητίνης | 1.30 $g/cm^3$ |
| Όριο θραύσης σε εφελκυσμό (0°) | 2410 MPa |
| Μέτρο ελαστικότητας (0°) | 135 GPa |
| Όριο θραύσης σε εφελκυσμό (90°) | 86 MPa |
| Μέτρο ελαστικότητας (90°) | 10 GPa |
| Όριο θραύσης σε θλίψη (0°) | 1300 MPa |
| Όριο θραύσης σε εφελκυσμό (με οπή στο κέντρο) | 448 MPa |
| Αντοχή σε διαστρωματική αποκόλληση σε φόρτιση Τύπου I | 2.1 $kJ/m^2$ |
| Αντοχή σε διαστρωματική αποκόλληση σε φόρτιση Τύπου II | 2.6$kJ/m^2$ |

***Πίνακας 2.2-1:Ιδιότητες LMPAEK***

## 2.3 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΥΣ

Η φόρτιση κόπωσης είναι ο κύριος μηχανισμός αστοχίας της ατράκτου των αεροσκαφών λόγω της μεταβαλλόμενης φόρτισης στην οποία υπόκεινται στη διάρκεια ζωής τους. Η φόρτιση αυτή οδηγεί στη δημιουργία ρωγμής η οποία διαδίδεται στο υλικό μέχρι και την αστοχία του. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι τάσεις που απαιτούνται για την αστοχία ενός υλικού σε

κυκλική φόρτιση είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες τάσεις του ορίου διαρροής του. Τα στάδια αστοχίας του υλικού υπό φόρτιση κόπωσης είναι τα εξής.

1. Δημιουργία ρωγμής, σε σημεία που υπάρχει συγκέντρωση τάσεων ή και ατέλεια υλικού
2. Διάδοση της ρωγμής κατά τη διάρκεια της κυκλικής φόρτισης
3. Ξαφνική αστοχία του υλικού που προκύπτει όταν η ρωγμή έχει διαδοθεί πέρα από το σημείο που μπορεί η κατασκευή να φέρει τα φορτία που δέχεται

Τα κύρια σημεία στα οποία δημιουργούνται ρωγμές κάτω από την εφαρμογή δυναμικών συνθηκών φόρτισης είναι[16]:

- Κοχλίες, ήλοι και αντίστοιχες μηχανικές συνδέσεις
- Οπές
- Καμπύλες και γωνίες στη γεωμετρία
- Εγκοπές
- Γραμμή συγκόλλησης

Για να εγκριθούν τα αεροσκάφη για μαζική παραγωγή έχοντας την πιστοποίηση ασφαλής λειτουργίας πρέπει να περάσουν μια διαδικασία δοκιμών σε φόρτιση κόπωσης. Η αντοχή αυτών των κατασκευών σε δυναμικές και κυκλικές φορτίσεις είναι η κύρια μελέτη που πραγματοποιείται. Ο σχεδιασμός τους βασίζεται σε δύο βασικές φιλοσοφίες, την ασφαλή λειτουργία ανεξαρτήτου βλάβης(fail-safe), και την ασφαλή διάρκεια ζωής (safe-life)[17].

Στο σχεδιασμό με βάση τη φιλοσοφία ασφαλούς διάρκειας ζωής, τα δομικά στοιχεία του αεροσκάφους σχεδιάζονται για μια συγκεκριμένη διάρκεια ζωής, μετά το πέρας της οποίας πρέπει να αντικατασταθούν. Τα μέρη τα οποία θεωρούνται πιο κρίσιμα στη φόρτιση κόπωσης αναλύονται με βάση τριών τύπων δεδομένων:

- Το ιστορικό φόρτισης το οποίο προβλέπεται να εφαρμοστεί κατά τη λειτουργία του αεροσκάφους
- Η χαρακτηριστική καμπύλη τάσης-κύκλων φόρτισης (S-N) για την κατασκευή κάτω από τις αντίστοιχες συνθήκες φόρτισης
- Τη συσσωρευμένη βλάβη

Παρ’ όλα αυτά, λόγω της απρόβλεπτης φύσης των δυναμικών φορτίσεων στις οποίες υπόκεινται στη διάρκεια πτήσης τους, οι συνθήκες φόρτισης παρέχονται εμπειρικά βάση των δεδομένων που έχουν καταγραφεί σε αντίστοιχες κατασκευές.

Η ανεπάρκεια τέτοιων δεδομένων και η απόλυτη βάση του σχεδιασμού πάνω σε αυτή τη μέθοδο οδηγεί στη δεύτερη τεχνική , δηλαδή την ασφαλή λειτουργία ανεξαρτήτου βλάβης. Ο σχεδιασμός σε αυτή την περίπτωση γίνεται με στόχο την ασφαλή λειτουργία του αεροσκάφους σε περίπτωση βλάβης ή τη μετάβαση του σε ασφαλή λειτουργία χωρίς συνέπειες. Η μέθοδος αυτή έχει ως βάση:

- να καθιστά τα κρίσιμα σε κόπωση μέρη ικανά να διατηρήσουν τη δομική του ακεραιότητα κατά τη διάρκεια της πτήσης σε περίπτωση δημιουργίας ή και διάδοσης ρωγμής.
- Την παροχή μια διαδικασίας ανίχνευσης της ρωγμής πριν να φτάσει το κρίσιμο μήκος έτσι ώστε οι πιθανότητες αστοχίας λόγω της διάδοσης πριν τον εντοπισμό της να είναι μηδαμινές

Οι πειραματικές δοκιμές που σχετίζονται με τον ασφαλή σχεδιασμό των αεροσκαφών ανάλογα με την κλίμακα τους εκτείνονται στις εξής κατηγορίες[18]:

- Πειραματικές δοκιμές σε κλίμακα δοκιμίου

Λόγω του κόστους που επιφέρει το βάρος στις αεροναυπηγικές κατασκευές, οι κατασκευαστικές εταιρίες οδηγούνται σε μια διαρκή μελέτη νέων εναλλακτικών για τη μείωση του, με ταυτόχρονη κάλυψη των απαιτήσεων αντοχής των κατασκευών αυτών. Αυτές οι ανάγκες οδηγούν όλο και περισσότερο στη χρήση συνθέτων υλικών, ελαφρότερων κραμάτων όπως και στη χρήση κεραμικών. Στις πειραματικές δοκιμές σε κλίμακα δοκιμίου, τα υποψήφια υλικά εξετάζονται σε κυκλικές φορτίσεις εφελκυσμού, θλίψης, κάμψης και στρέψης.

- Πειραματικές δοκιμές των μελών που το απαρτίζουν

Σε αυτές τις πειραματικές δοκιμές, τα διάφορα μέλη του αεροσκάφους υπόκεινται σε κυκλικές φορτίσεις πολλαπλάσιες της αναμενόμενης διάρκειας ζωής τους. Τα φορτία αυτά είναι αντιπροσωπευτικά των συνθηκών πτήσης και σκοπός των δοκιμών είναι να εξασφαλίσουν τη δυνατότητα όλων των μελών να φέρουν τα αντίστοιχα φορτία με ασφάλεια. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν και τα στατικά πειράματα που πραγματοποιούνται στις πτέρυγες των αεροσκαφών. Σε αυτά, το μέγιστο φορτίο που αναμένεται να εφαρμοστεί πολλαπλασιασμένο με ένα συντελεστή ασφαλείας εφαρμόζεται κλιμακωτά μέχρι και την αστοχία του.



***Σχήμα 2.3-1: Δοκιμή μελών που το απαρτίζουν [18]***

- Πειραματικές δοκιμές πλήρους κλίμακας

Οι δοκιμές πλήρους κλίμακας προσομοιάζουν ποικίλες συνθήκες φόρτισης που εφαρμόζονται σε όλη την κατασκευή. Σε αυτές κατατάσσονται η ιδανική πτήση καθώς και η πτήση κάτω από ακραίες καιρικές συνθήκες, η προσγείωση, η ιδανική και η αναγκαστική απογείωση. Η τυπική διάρκεια τέτοιων δοκιμών είναι μερικά χρόνια.



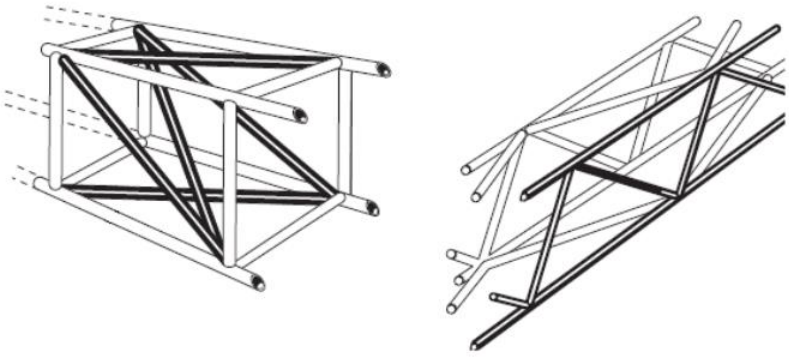
***Σχήμα 2.3-2: Δοκιμές πλήρους κλίμακας [18]***

### 2.3.1 Δομή ατράκτου αεροσκάφους

Ανάλογα με τον τρόπο που μεταφέρονται τα φορτία στην άτρακτο του αεροσκάφους, μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τις δομές της ατράκτου σε τρείς κατηγορίες[19]:

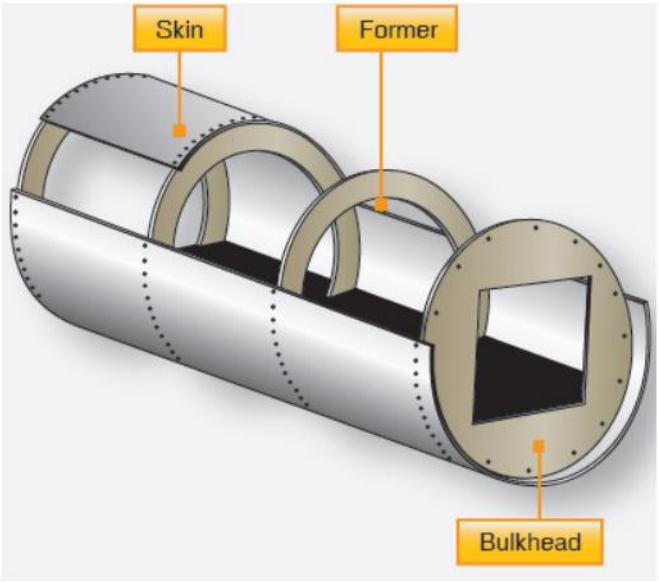
- Άτρακτος που αποτελείται από δοκούς (truss fuselage)
- Monocoque
- Semi-monocoque

Η πρώτη κατηγορία ατράκτου αποτελείται από ένα άκαμπτο πλαίσιο ράβδων, σωλήνων, στύλων και καλωδίων. Το κύριο δομικό της στοιχείο είναι τέσσερις διαμήκεις δοκοί που σχηματίζουν ένα πλαίσιο πάνω στις οποίες συγκολλούνται κάθετες και οριζόντιες αντηρίδες.



***Εικόνα 2.3-3: Σχεδιασμός truss [19]***

Στην κατηγορία monocoque, το εξωτερικό κέλυφος της ατράκτου παραλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος των φορτίσεων. Το σχήμα της είναι συνήθως σωληνοειδές ή κωνικό χωρίς εσωτερικά δομικά στοιχεία για την παραλαβή φορτίων με την εξαίρεση κάποιων πλαισίων που χρησιμοποιούνται για την αποφυγή εκτεταμένης παραμόρφωσής της. [20]

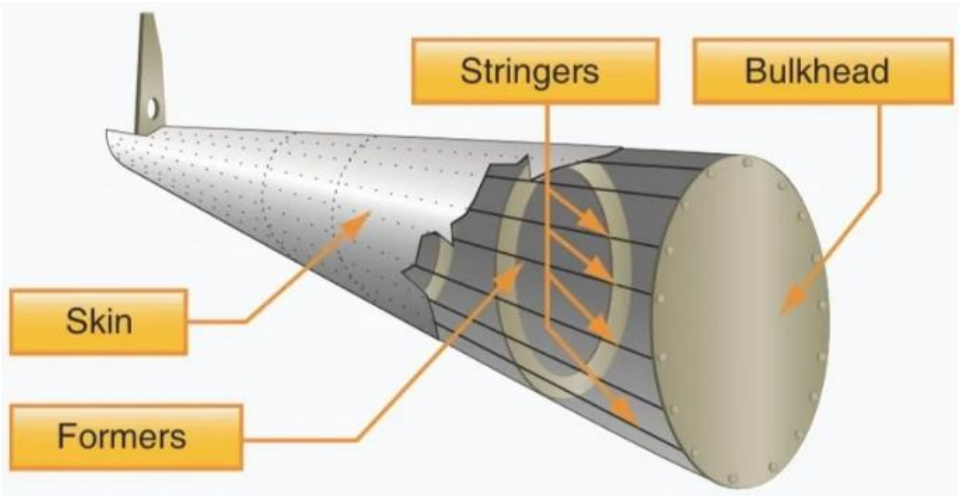



***Σχήμα 2.3-4: Σχεδιασμός monocoque [20]***

Η πλειοψηφία των σύγχρονων αεροσκαφών βασίζεται στον semi-monocoque σχεδιασμό ο οποίος συνδυάζει χαρακτηριστικά από τους δύο προηγούμενους. Το μεγαλύτερο μέρος της ατράκτου είναι κυλινδρικό ή σχεδόν κυλινδρικό. Η δομή του αποτελείται από[20][21]:

- Το κέλυφος της ατράκτου που παραλαμβάνει όλα τα αεροδυναμικά φορτία
- Τα πλαίσια (frames) που έχουν δακτυλιοειδές σχήμα και βοηθούν στη διατήρηση του σχήματος της ατράκτου
- Τα κύρια διαφράγματα (bulkheads) που ενισχύουν τη δομή και διατηρούν το σχήμα της ατράκτου καθώς και τη διαχωρίζουν σε διάφορα τμήματα
- Διαμήκεις δοκούς και δοκίδες (longerons και stringers) που συμβάλλουν στη δυσκαμψία και δυστρεψία της ατράκτου καθώς και στη στιβαρότητα που προσδίδουν. Ο βασικός τους ρόλος είναι η μεταφορά εφελκυστικών και θλιπτικών φορτίων λόγω των καμπτικών φορτίων στην άτρακτο και συνδέουν τα πλαίσια και τα κύρια διαφράγματα

Η ύπαρξη παραθύρων και πορτών δημιουργεί κενά στον κορμό του αεροσκάφους καθώς και συγκεντρώσεις τάσεων και έτσι πρέπει να ενισχύονται περιμετρικά.




***Σχήμα 2.3-5: Σχεδιασμός semi-monocoque [20]***

## 2.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΙΑΚΟΠΗΣ ΑΠΟΣΥΝΔΕΣΗΣ

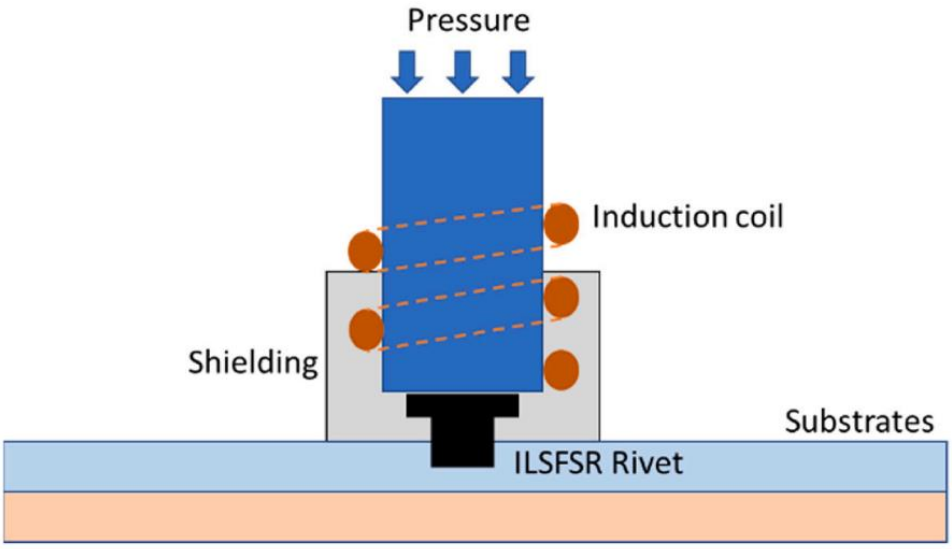
Τα σύνθετα υλικά, εξαιτίας του λόγου των φορτίων που μπορούν να φέρουν με αξιοπιστία ως προς το βάρος τους, ερευνώνται ως εναλλακτική για την εφαρμογή τους σε αεροναυπηγικές κατασκευές με αρκετές μελέτες να έχουν πραγματοποιηθεί τις τελευταίες δεκαετίες. Ο κύριος μηχανισμός αστοχίας τους σε τέτοιες κατασκευές είναι η διαστρωματική αποκόλληση με αποτέλεσμα τη δημιουργία ρωγμής η οποία διαδίδεται σε όλο το εξάρτημα. Η τεχνική σύνδεσής τους παίζει σημαντικό ρόλο στη δυνατότητα τους να φέρουν φορτία με ασφάλεια. Οι μηχανικές συνδέσεις όπως αναφέρθηκε απαιτούν τη δημιουργία οπών, καταλήγοντας σε συγκέντρωση τάσεων σε αυτές τις περιοχές καθώς και στην αύξηση του συνολικού βάρους της κατασκευής, παράγοντας που παίζει σημαντικό ρόλο σε αυτούς τους τομείς. Η συγκόλληση και η σύνδεση με κόλλα αποτελούν εναλλακτικές που επιτυγχάνουν ομοιόμορφη κατανομή τάσεων χωρίς σημαντική αύξηση του βάρους. Τέτοιες τεχνικές όμως δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην αεροναυπηγική χωρίς κάποιο μηχανισμό διακοπής αποσύνδεσης εξαιτίας των περιορισμών στους οποίους υπόκεινται. Πιο συγκεκριμένα ορίζεται βάσει EASA AMC 20-29[22]:

- Για κάθε σύνδεση με συγκόλληση θα πρέπει μέσω ανάλυσης, δοκιμών ή και των δύο να ορίζεται το μέγιστο φορτίο κάτω από το οποίο προκύπτει η μέγιστη αποκόλληση ή
- Να γίνονται δοκιμές στα υλικά που παράγονται στους δεσμούς των οποίων θα εφαρμοστεί το μέγιστο σχεδιαστικό φορτίο ή
- Να καθιερωθούν επαναλαμβανόμενες και έμπιστες τεχνικές μη καταστροφικού ελέγχου έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η αντοχή κάθε σύνδεσης.

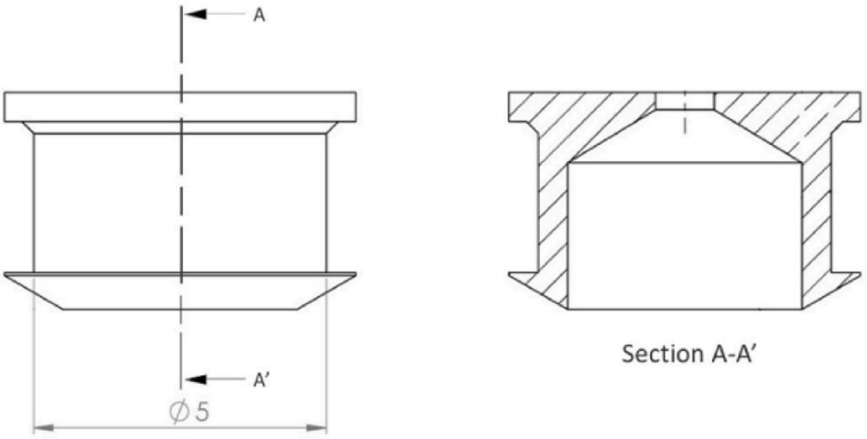
Αν και παρόμοιες διατάξεις στις συνδέσεις θερμοπλαστικών υλικών δεν είναι διαθέσιμες, είναι αναγκαία η εφαρμογή τους για διασφάλιση της αξιοπιστίας των δομικών στοιχείων με δομικά τμήματα που κατασκευάζονται από τα συγκεκριμένα υλικά. Η μείωση του ρυθμού διάδοσης της ρωγμής η ακόμα και της ολικής διακοπής της οδηγεί στις μελέτες για διαφορετικούς τρόπους σύνδεσης τους. Στις περισσότερες περιπτώσεις έχει προταθεί η χρήση κοχλιών και ηλών συμπληρωματικά της σύνδεσης με κόλλα ώστε να λειτουργούν ως μηχανισμοί ενίσχυσης διαμέσου του πάχους της κατασκευής.

### 2.4.1 Ήλωση μέσω τριβής χαμηλής διάτμησης με επαγωγή

Ένας από τους μηχανισμούς διακοπής αποσύνδεσης είναι η ήλωση μέσω τριβής χαμηλής διάτμησης με επαγωγή (Induction Low Shear Friction Spot Riveting). Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιεί την ικανότητα των θερμοπλαστικών ρητινών να τήκονται και με την ψύξη να στερεοποιούνται πάλι για την ήλωση τους χωρίς να απαιτείται δημιουργία οπής. Σε αυτή τη διαδικασία, ένα πηνίο θερμαίνει τοπικά μέσω επαγωγής τις πλάκες και τον ήλο ο οποίος περιστρέφεται με υψηλή ταχύτητα. Ένας υδραυλικά ελεγχόμενος κύλινδρος οδηγεί τον ήλο και μέσω της δύναμης που του ασκείται κάθετα στο δοκίμιο, πραγματοποιείται διάτρηση της άνω πλάκας μέχρι το επιθυμητό βάθος. Στη συνέχεια αφαιρείται ο οδηγός και η σύνδεση έχει πραγματοποιηθεί[23]. Ο μηχανισμός αυτός αποτελεί ευρεσιτεχνία της εταιρία KVE Composites B.V.[24]




*Σχήμα 2.4-1: Διαδικασία ήλωσης μέσω τριβής χαμηλής διάτμησης με επαγωγή [23]*

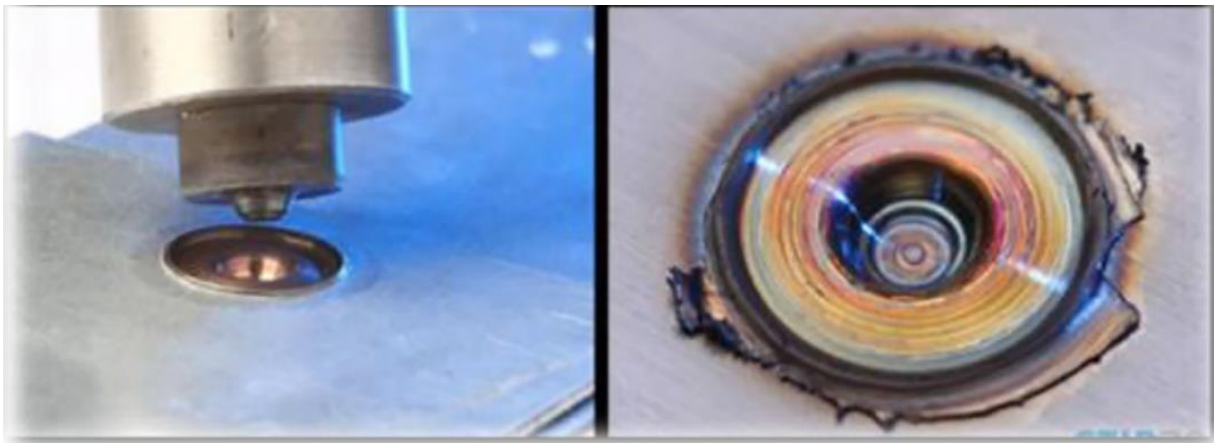



*Σχήμα 2.4-2: Διατομή ήλου διαμέτρου 5mm [23]*

Λόγω της περιορισμένης μελέτης και των πειραμάτων που έχουν πραγματοποιηθεί πάνω σε αυτή τη νέα μέθοδο, δεν υπάρχουν επαρκή δεδομένα για την αξιοπιστία και την αντοχή αυτής της σύνδεσης.

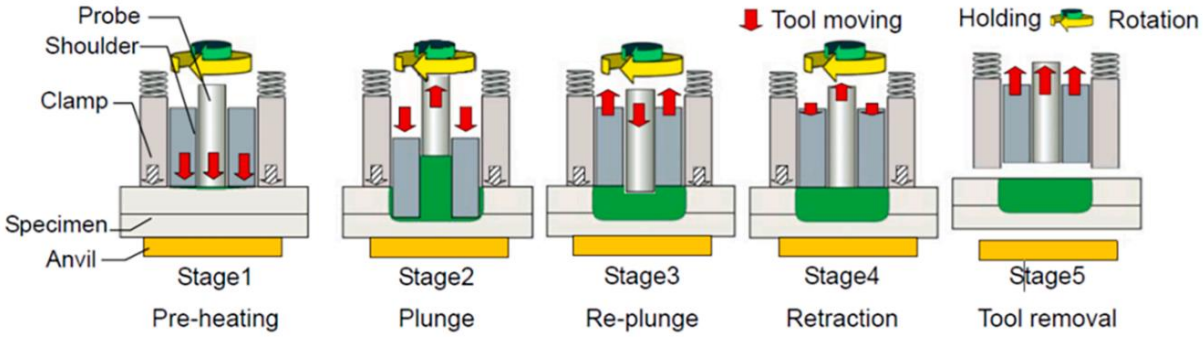
### 2.4.2 Σημειακή συγκόλληση μέσω τριβής και επαναπλήρωσης

Μία ακόμα μέθοδος δημιουργίας μηχανισμού διακοπής αποσύνδεσης είναι η σημειακή συγκόλληση μέσω τριβής (Friction Stir Spot Welding). Το εργαλείο αυτής της μεθόδου αποτελείται από ένα πείρο ο οποίος περιστρέφεται με υψηλή ταχύτητα με μια κατακόρυφη και κάθετη προς την άνω πλάκα κίνηση. Όταν έρχεται σε επαφή με την άνω επιφάνεια της πλάκας, λόγω της τριβής των δύο επιφανειών, εκείνη φτάνει τη θερμοκρασία τήξης. Στην συνέχεια το εργαλείο κατέρχεται μέχρι το επιθυμητό βάθος με σταθερό ρυθμό και έπειτα αφαιρείται. Το αρνητικό αυτής της μεθόδου είναι η δημιουργία τυφλής οπής στο σημείο συγκόλλησης. [25]

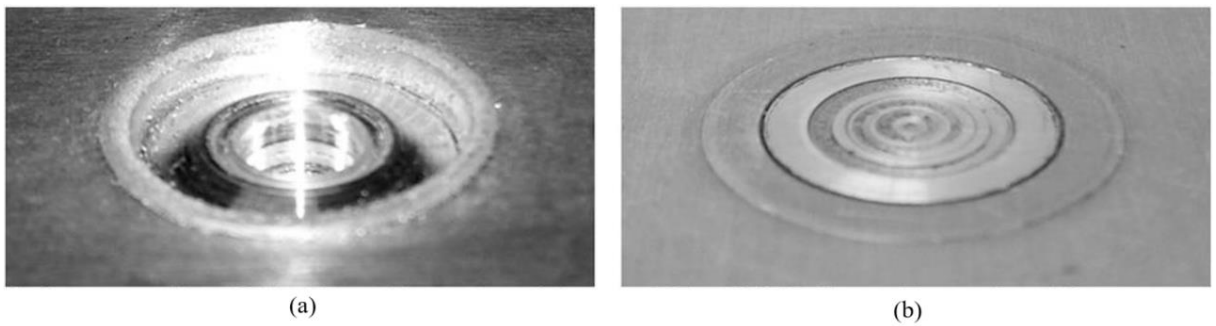


*Σχήμα 2.4-3: Σημειακή συγκόλληση μέσω τριβής [25]*

Η βελτιωμένη εκδοχή αυτής της μεθόδου είναι η σημειακή συγκόλληση μέσω τριβής και επαναπλήρωσης (Refill Friction Stir Spot Welding). Το εργαλείο που χρησιμοποιείται σε αυτή τη μέθοδο αποτελείται από τρεις ομόκεντρους κυλίνδρους, τον δακτύλιο σύσφιξης, το χιτώνιο και τον εσωτερικό κύλινδρο. Αρχικά ο σφιγκτήρας πιέζει τις δύο πλάκες ενώ το περιστρεφόμενο χιτώνιο εισέρχεται στην άνω πλάκα καθώς εκείνη τήκεται λόγω της τριβής που δημιουργείται. Ο εσωτερικός κύλινδρος έρχεται και αυτός σε επαφή με την άνω επιφάνεια της πλάκας μέχρι να φτάσει τοπικά τη θερμοκρασία τήξη της. Έπειτα αρχίζει την άνοδο αφαιρώντας υλικό ενώ το χιτώνιο συνεχίζει την περιστροφή του μέχρι το απαιτούμενο βάθος. Τέλος ο εσωτερικός κύλινδρος πιέζει το τηγμένο υλικό προς την οπή για την επαναπλήρωση της ενώ το χιτώνιο αφαιρείται. Αυτή η περιστροφή του εξαρτήματος όμως κόβει τις ίνες της ενίσχυσης αλλάζοντας τις τοπικές ιδιότητες του συνθέτου [26]. Ο μηχανισμός αυτός είναι πατέντα της εταιρίας Helmholtz-Zentrum Hereon[27].




*Σχήμα 2.4-4: Σημειακή συγκόλληση μέσω τριβής και επαναπλήρωσης [25]*




*Εικόνα 2.4-5: (a) friction stir spot welding, (b) refill riction stir spot welding [28]*

## 2.5 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Ο υπολογισμός της διάρκειας ζωής μέχρι την αστοχία μιας κατασκευής όπως και η πρόβλεψη και αποτροπή της εξέλιξης ρωγμής στο υλικό προέτρεψαν στην εύρεση εμπειρικών εξισώσεων και καμπυλών με σκοπό τη δημιουργία κατασκευών με το πρότυπο ασφαλούς διάρκειας ζωής. Οι καμπύλες τάσης-διάρκειας ζωής για παράδειγμα υπολογίζονται από επαναλαμβανόμενα πειράματα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ίδια υλικά για καθαρά εναλλασσόμενες τάσεις. Με τις καμπύλες αυτές γίνεται δυνατό να υπολογιστεί η διάρκεια ζωής σε κύκλους φόρτισης υπό συγκεκριμένες τάσεις και έτσι ακόμα και οι συνθήκες φόρτισης για κυκλική φόρτιση χωρίς αστοχία. Λόγω των δυναμικών φορτίων όμως που δέχονται οι περισσότερες κατασκευές, έγιναν τροποποιήσεις (κριτήριο Goodman, κριτήριο Soderberg) για την πρόβλεψη αστοχίας λαμβάνοντας έτσι στους υπολογισμούς τους τη μέση τιμή και το εύρος εναλλαγής των τάσεων. [29]

Η εξέλιξη των μεθόδων συνεχίστηκε καθώς ήταν απαραίτητη και η μελέτη της διάδοσης ρωγμών που δημιουργούνται και εξελίσσονται από κυκλικές φορτίσεις καθώς και η πρόβλεψη της αστοχίας εξαιτίας αυτών. Έγινε προφανές ότι η διάδοση τους δεν παραμένει σταθερή με το χρόνο αλλά εξαρτάται και από παράγοντες όπως η συγκέντρωση τάσεων και το συνολικό τους μήκος.[30]

Σε κυκλική φόρτιση, η διάδοση μια ρωγμής όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 2.5-1), χωρίζεται σε τρία στάδια. Στο πρώτο στάδιο παρατηρούμε τη δημιουργία ρωγμής μετά από μία τιμή του συντελεστή έντασης τάσεων. Στο δεύτερο στάδιο παρατηρούμε μια σχεδόν γραμμική αύξηση του μήκους της ρωγμής και σε αυτή την περιοχή ισχύει ο νόμος του Paris:

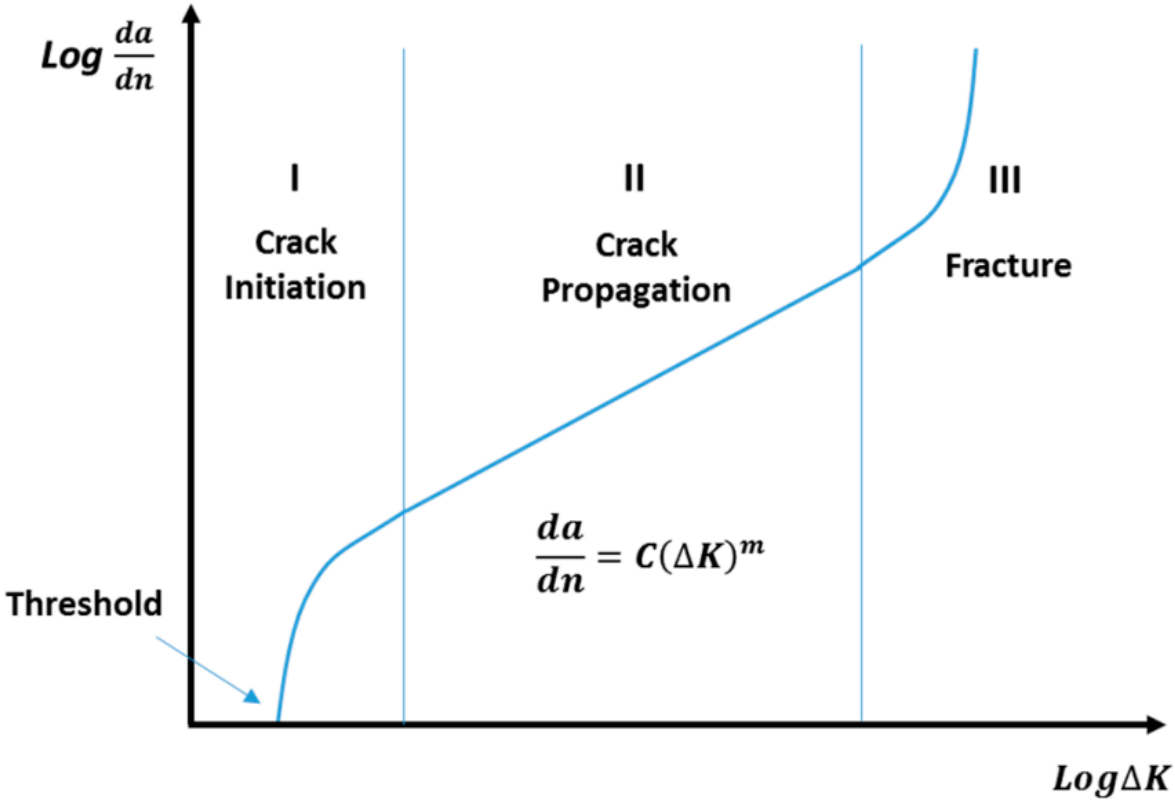
$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^m$$

*όπου* $\frac{da}{dN}$: ο ρυθμός διάδοσης της ρωγμής ανά κύκλο φόρτισης

C, m: σταθερές που εξαρτώνται από το υλικό

ΔK: ο συντελεστής έντασης εναλλασσόμενων τάσεων

Τέλος στο τρίτο στάδιο παρατηρείται ραγδαία αύξηση του μήκους της ρωγμής μέχρι και την αστοχία[31].




*Σχήμα 2.5-1: Στάδια διάδοσης ρωγμής [31]*

Μια μέθοδος με πληθώρα εφαρμογών στη θραυστομηχανική και την αντοχή υλικών είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Τέτοιες αναλύσεις χρησιμοποιούνται και για τη μοντελοποίηση ρωγμών υπό κυκλικά φορτία σε πολύπλοκες γεωμετρίες και κατασκευές. Η προσομοίωση της κατασκευής πραγματοποιείται με τη διακριτοποίηση της σε μικρότερα στοιχεία απλούστερης γεωμετρίας και η ρωγμή μοντελοποιείται με αντίστοιχα στοιχεία που διαγράφονται από τη γεωμετρία όταν συναντώνται κάποιες προϋποθέσεις, όπως ο ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας (G). Στα μοντέλα αυτά εφαρμόζονται οριακές συνθήκες για την εφαρμογή φορτίων, στηρίξεων και περιορισμό βαθμών ελευθερίας. Η μέθοδος αυτή καταλήγει σε ένα σύστημα εξισώσεων που υπολογίζουν τις μετατοπίσεις και τις τάσεις που εφαρμόζονται στα επιμέρους στοιχεία της κατασκευής. Για μόνιμες καταστάσεις, οι εξισώσεις αυτές καταλήγουν σε αλγεβρικές, ενώ για μεταβλητές καταστάσεις καταλήγουν σε διαφορικές[32].

Ένας τομέας που υστερεί αυτή η μέθοδος είναι η διακριτοποίηση γεωμετριών με την ύπαρξη ατελειών και ρωγμών στις γεωμετρίες τους. Ο μόνος τρόπος είναι η προσαρμογή του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων βάση της γραμμής ή της επιφάνειας της ατέλειας. Έτσι οδηγούμαστε στην επανα-διακριτοποίηση των πλεγμάτων. Μια παραλλαγή αυτής της μεθόδου είναι η εκτεταμένη μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (eXtended Finite Element Method, XFEM) με την κύρια διαφορά ότι δεν πραγματοποιείται επανα-διακριτοποίηση του πλέγματος στοιχείων που έχει δημιουργηθεί. Ένα άμεσο πλεονέκτημα είναι η χαμηλότερη υπολογιστική απαίτηση σε προβλήματα πολύπλοκων γεωμετριών που φορτίζονται μέχρι την αστοχία. Στη μέθοδο αυτή γίνεται εισαγωγή συναρτήσεων για τη μοντελοποίηση ατελειών όπως οι ρωγμές. Η μοντελοποίηση περιλαμβάνει την επιλογή τέτοιων περιοχών στο πλέγμα και έτσι επιτρέπει τη διάδοση της ρωγμής ακόμα και στο εσωτερικό των πεπερασμένων στοιχείων με ελάχιστη ή και καθόλου επανα-διακριτοποίηση του πλέγματος. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση βελτιωμένων συναρτήσεων (enrichment functions) και όρων όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση[33]:

$$u(x) = \sum_{i=1}^{N} N_i(x)\bar{u}_\iota + \beta\varepsilon\lambda\tau\iota\omega\mu\acute{\varepsilon}\nu o\iota\ \acute{o}\rho o\iota$$

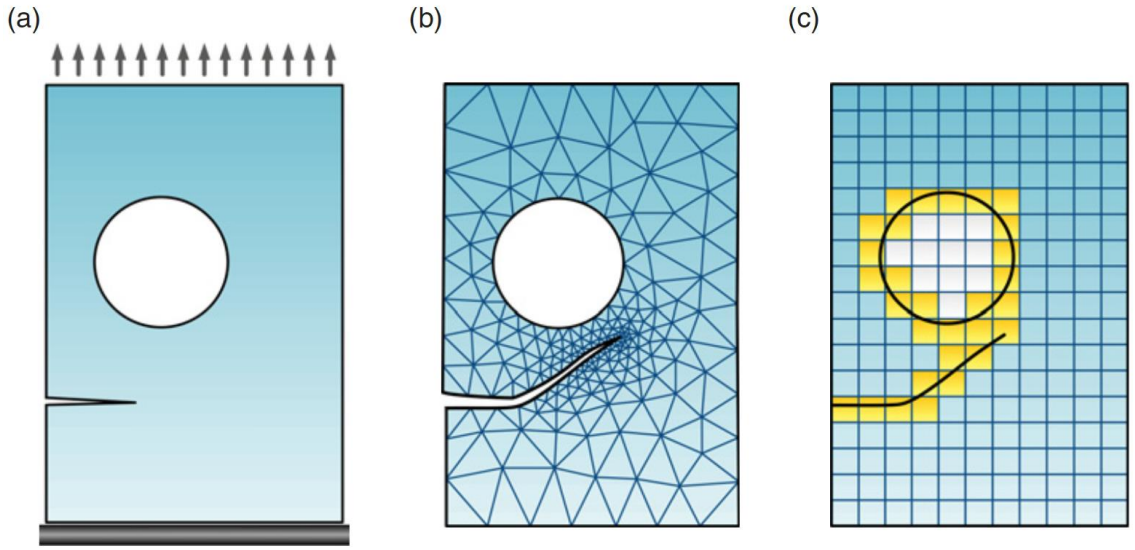
*όπου:* $u(x)$, *η συνολική μετατόπιση στο συγκεκριμένο κόμβο*

$N$, *οι κόμβοι του πλέγματος*

$N_i(x)$, *η συνάρτηση μορφής στην περιοχή του κάθε στοιχείου*

$\bar{u}_\iota$, *άγνωστες τιμές των μετατοπίσεων στους αντίστοιχους κόμβους που πρέπει να προσδιοριστούν*

Οι διαφορές στην προσέγγιση της κάθε μεθόδου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα




***Σχήμα 2.5-2: (a) ρωγμή σε πλάκα με προϋπάρχουσα οπή, (b) μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, (c) εκτεταμένη μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων [33]***

Η αριθμητική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι το μοντέλο ζώνης συνοχής (cohesive zone model). Το μοντέλο αυτό εφαρμόζεται για την προσομοίωση ψευδοστατικών προβλημάτων θραύσης και πιο συγκεκριμένα για την προσομοίωση της διαστρωματικής αποκόλλησης στα σύνθετα υλικά και της αποσύνδεσης σε συνδέσεις με κόλλα. Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει μελετηθεί και για φορτίσεις κόπωσης στην οποία υπολογίζεται ο ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας (G) για την εκτίμηση της διάδοσης της αποσύνδεσης. Η σχέση μεταξύ του συντελεστή έντασης τάσεων (stress intensity factor) και του ρυθμού εξέλιξης ρωγμής λόγω κόπωσης εκφράζεται ως εξής:

$$\frac{da}{dN} = B\Delta G^d$$

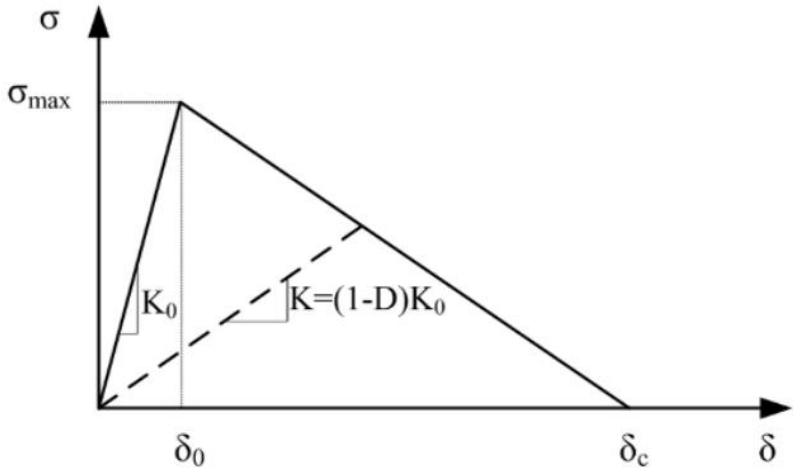
όπου:

B, d: παράμετροι που εξαρτώνται από το υλικό και το είδος φόρτισης

A: το μήκος της αποσύνδεσης

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο διγραμμικό νόμο έλξης-διαχωρισμού όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.5-3. Στο τμήμα της καμπύλης μέχρι το σημείο ($\delta_0$ , $\sigma_{max}$), το υλικό συμπεριφέρεται

γραμμικά ελαστικά χωρίς τη δημιουργία βλάβης ενώ στην περίπτωση αποφόρτισης ακολουθεί την ελαστική γραμμή. Από το σημείο ($\delta_0$ , $\sigma_{max}$) μέχρι και το ($\delta_c$ , 0) το υλικό εισέρχεται στην περιοχή υποβάθμισης. Αν η μετατόπιση φτάσει την τιμή $\delta_c$ τότε γίνεται πλήρης αποχωρισμός μεταξύ των τμημάτων υπό σύνδεση. Ο διγραμμικός νόμος ισχύει για τη φόρτιση τύπου I. [34]




*Σχήμα 2.5-3: Νόμος έλξης – διαχωρισμού [35]*

Όπου: $\sigma_{max}$ η μέγιστη τάση

$K_0$: η αρχική δυσκαμψία

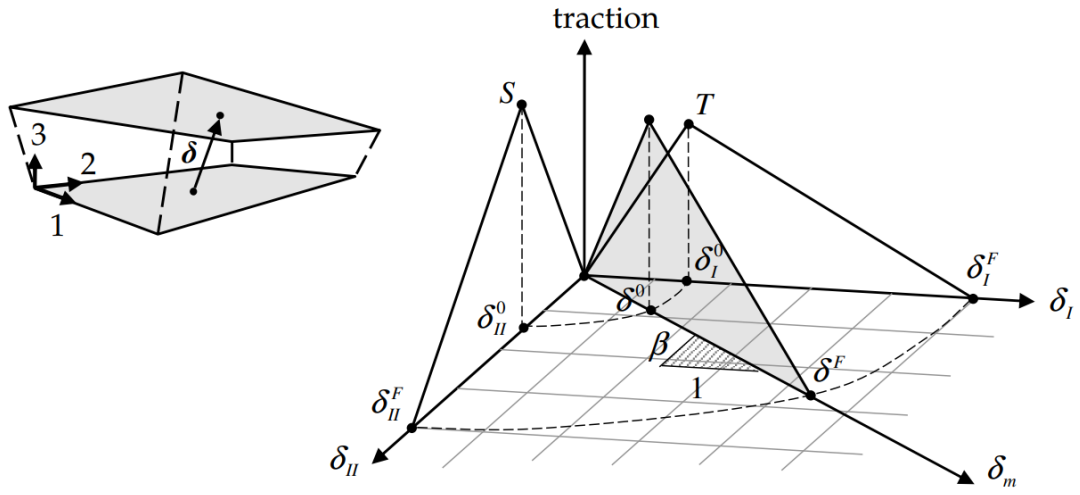
$\delta_c$: το κρίσιμο μήκος της ρωγμής

Η σταθερά D εξαρτάται από τις ατέλειες του υλικού, όπως μικρορωγμές και κενά στη δομή του, η οποία επηρεάζει τη δυσκαμψία του μειώνοντας την όπως υπολογίζεται από τη σχέση:

$$D = \frac{A_d}{A_e}$$

Με $A_d$ την ονομαστική επιφάνεια και $A_e$ τη συνολική επιφάνεια των ατελειών.

Στην περίπτωση μικτού τύπου φόρτισης, πχ τύπου I-II, ο διγραμμικός νόμος παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 2.5-4)




*Σχήμα 2.5-4: Διγραμμικός νόμος έλξης - διαχωρισμού για μικτού τύπου φόρτιση*

Οι απόλυτες μετατοπίσεις $\delta_I^F$, $\delta_{II}^F$ είναι οι κάθετες και εφαπτόμενες σχετικές μετατοπίσεις αντίστοιχα τη στιγμή που το υλικό έχει αστοχήσει πλήρως. Γνωρίζοντας ότι η τιμή του κρίσιμου βαθμού απελευθέρωσης ενέργειας ισούται με το εμβαδό του τριγώνου του σχήματος 2.5-3, οι τιμές για φόρτιση τύπου-I και τύπου-II έχουμε:

$$G_{IC} = T * \delta_I^F/2$$

$$G_{IIC} = S * \delta_{II}^F/2$$

*Όπου* $G_{IC}$, $G_{IIC}$ οι κρίσιμοι ρυθμοί απελευθέρωσης ενέργειας για φόρτιση τύπου-I και τύπου-II αντίστοιχα, T και S οι μέγιστες έλξεις σε εφελκυσμό και διάτμηση αντίστοιχα και $\delta_I^F$, $\delta_{II}^F$ οι μέγιστες ορθές και διατμητικές σχετικές μετατοπίσεις.

Στη γενικευμένη περίπτωση φόρτισης μικτού τύπου η σχετική μετατόπιση δίνεται από την εξίσωση:

$$\delta_m = \sqrt{\delta_I^2 + \delta_{II}^2}$$

Όπου $\delta_1 = \delta_3$ και $\delta_{II} = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2}$ είναι η σχετική μετατόπιση κάθετα στο επίπεδο του στοιχείου συνοχής και η μετατόπιση στο επίπεδο του στοιχείου συνοχής αντίστοιχα.

Η έναρξη της υποβάθμισης πραγματοποιείται όταν η συνολική σχετική μετατόπιση φτάσει την τιμή:

$$\delta^0 = \delta_I^0 \delta_{II}^0 \sqrt{\frac{1+\beta^2}{(\delta_{II}^0)^2 + (\beta\delta_I^0)^2}}$$

Όπου $\delta_I^0 = T/E_n$ ($E_n$ : η δυσκαμψία κάθετα στο επίπεδο του στοιχείου συνοχής) και

$\delta_{II}^0 = S/E_t$ ($E_t$ : η δυσκαμψία στο επίπεδο του στοιχείου συνοχής), οι σχετικές μετατοπίσεις για έναρξη της αποκόλλησης σε μονού τύπου φόρτιση

και $\beta = \delta_{II}/\delta_I$

Αντίστοιχα, για αστοχία μικτού τύπου, η ολική σχετική μετατόπιση δίνεται από το νόμο των Benzeggagh-Kenane: [36]

$$\delta^F = \frac{2}{\delta^0(\frac{1}{1+\beta^2}E_n + \frac{\beta}{1+\beta^2}E_t}\left[G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC})\left(\frac{\beta^2 E_t}{E_n + \beta^2 E_t}\right)^2\right]$$

# 3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

## 3.1 ΤΜΗΜΑ ΑΤΡΑΚΤΟΥ, ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετήθηκε ένα τμήμα της ατράκτου του αεροσκάφους το οποίο αποτελείται από:

- το εξωτερικό κέλυφος
- μια διαμήκη δοκίδα

Λόγω απλότητας του μοντέλου, το εξωτερικό κέλυφος δεν θεωρήθηκε καμπύλο. Το κέλυφος της ατράκτου καθώς και της δοκίδας αποτελείται από πολύστρωτες πλάκες θερμοπλαστικής μήτρας Low-Melt PAEK TC1225 ενισχυμένη με ίνες άνθρακα. Η διαστρωματική διάταξη του κελύφους της ατράκτου ήταν ψευδοϊσότροπη [45/-45/0/-45/90/45]s ενώ της δοκίδας [45/0/-45/0/90/0/-45/0/45]. Επίσης, το κέλυφος δημιουργήθηκε με συμπολυμερισμό. Οι ιδιότητες των πλακών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα[37]:

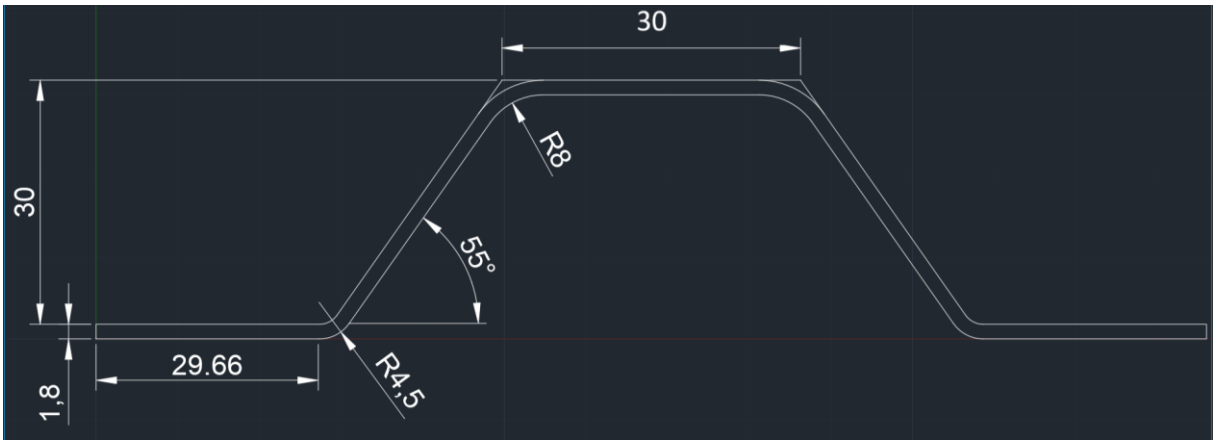
| Standard Modulus Carbon 145gsm UD Tape 34% RC | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Property** | **Condition** | **Test Method** | **Results** | |
| Tensile Strength 0° | RTD | ASTM D 3039 | 2410 MPa | 350 ksi |
| Tensile Modulus 0° | RTD | ASTM D 3039 | 135 GPa | 19.5 Msi |
| Tensile Strength 90° | RTD | ASTM D 3039 | 86 MPa | 12.5 ksi |
| Tensile Modulus 90° | RTD | ASTM D 3039 | 10 GPa | 1.4 Msi |
| Compression Strength 0° | RTD | ASTM D 6641 | 1300 MPa | 189 ksi |
| Compression Modulus 0° | RTD | ASTM D 6641 | 124 GPa | 18 Msi |
| In-Plane Shear Strength | RTD | ASTM D 3518 | 152 MPa | 22 ksi |
| In-Plane Shear Strength 2% Offset | RTD | ASTM D 3518 | 42.0 MPa | 6.1 ksi |
| In-Plane Shear Modulus | RTD | ASTM D 3518 | 4.3 GPa | 0.62 Msi |
| Flexural Strength 90° | RTD | ASTM D 790 | 152 MPa | 22 ksi |
| Interlaminar Shear Strength (SBS) 0°/90° | RTD | ASTM D 2344 | 96.5 MPa | 14 ksi |
| Open-Hole Tensile Strength | RTD | ASTM D 5766 | 448 MPa | 65 ksi |
| Open-Hole Tensile Strength | CTD | ASTM D 5766 | 448 MPa | 65 ksi |
| Open-Hole Compression Strength | RTD | ASTM D 6484 | 310 MPa | 45 ksi |
| Open-Hole Compression Strength | ETD | ASTM D 6484 | 262 MPa | 38 ksi |
| Compression After Impact Strength 30.5 J (270 in/lb) Impact Energy | RTD | ASTM D 7137 | 310 MPa | 45 ksi |
| Mode I Interlaminar Fracture Toughness ($G_{IC}$ Strain Energy Release Rate) | RTD | ASTM D 5528 | 2.1 kJ/m² | 12.0 in-lb/in² |
| Mode II Interlaminar Fracture Toughness ($G_{IIC}$ Strain Energy Release Rate) | RTD | ASTM D 7905 | 2.6 kJ/m² | 15.0 in-lb/in² |
| Room Temperature Dry (RTD)<br>Cold Temperature Dry (CTD) is -54°C (-65°F)<br>Elevated Temperature Dry (ETD) is 121°C (250°F) | | | | |

***Σχήμα 3.1-1: Ιδιότητες πλακών μήτρας LMPAEK με ενίσχυση άνθρακα [37]***

Η γεωμετρία του κελύφους ήταν η εξής:

- Μήκος: 1000mm
- Πλάτος: 226mm
- Πάχος: 2.4mm

Το μήκος της δοκίδας ήταν 800mm και η γεωμετρία της παρουσιάζεται το παρακάτω σχήμα:

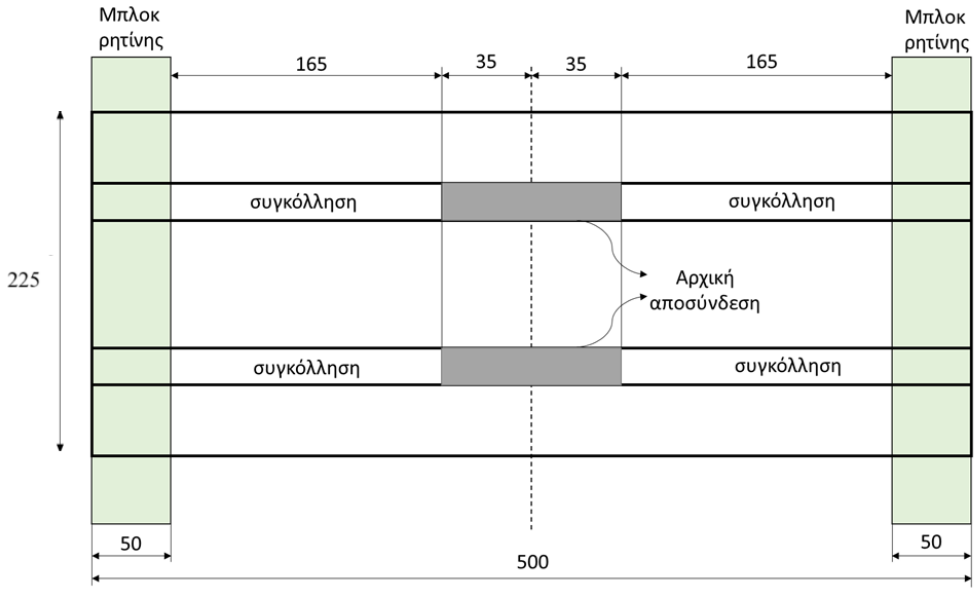



*Εικόνα 3.1-2: Διαστάσεις δοκίδας*

Το τμήμα της ατράκτου δοκιμάστηκε σε εφελκυσμό και θλίψη με σταθερό ρυθμό 500mm/s στο ένα άκρο του, ενώ στο άλλο εφαρμόστηκαν οριακές συνθήκες πάκτωσης. Λόγω explicit ανάλυσης και ενεργειακής ευστάθειας, η διάρκεια της προσομοίωσης ορίστηκε στα 0.02s με αποτέλεσμα τη μεγάλη μετατόπιση των κόμβων.

## 3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΕΛΥΦΟΥΣ-ΔΟΚΙΔΑΣ

Στο πλαίσιο της διπλωματικής μελετήθηκε άλλη μία διάταξη κελύφους-δοκίδας με αρχική αποσύνδεση 70 χιλιοστών συμμετρική ως προς το κέντρο του, συνολικού ύψους 34mm και διαστάσεις όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



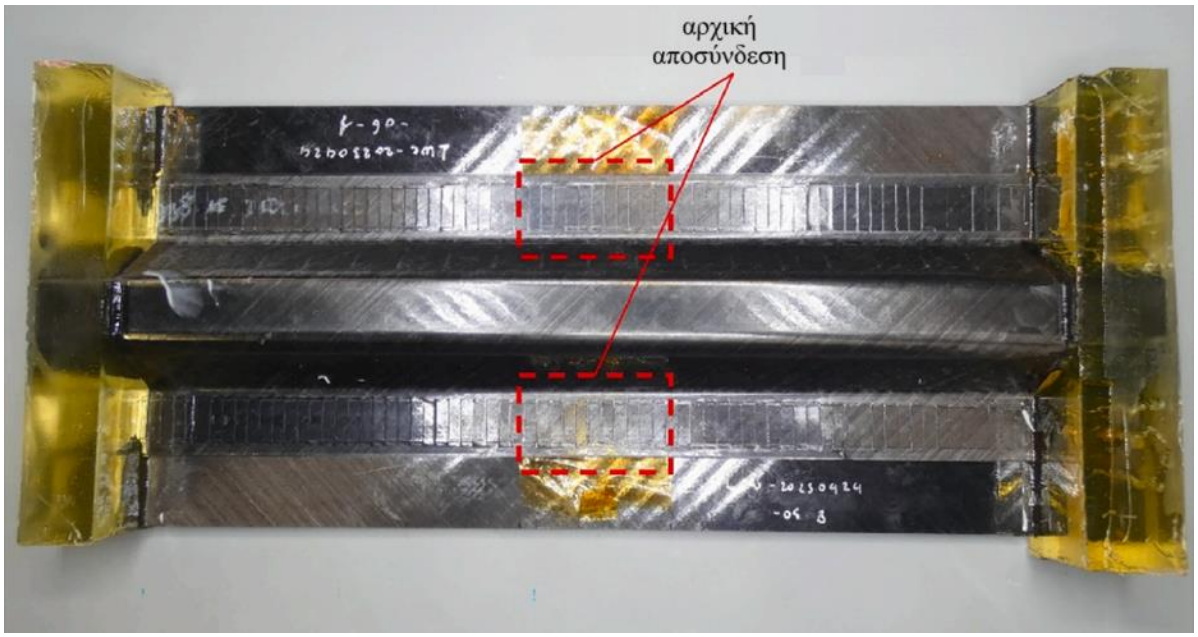

*Σχήμα 3.2-1: Διάταξη κελύφους-δοκίδας*

Για αυτή την πειραματική διαδικασία δημιουργήθηκαν άλλα δύο δοκίμια με μηχανισμούς διακοπής αποσύνδεσης ILSFSR διαμέτρου 5mm και RFSSW 9mm σε απόσταση 25mm του κέντρου του μηχανισμού από το άκρο της αρχικής αποσύνδεσης στο κέντρο του πέλματος. Το υλικό του κελύφους καθώς και της δοκίδας παρέμεινε σύνθετο μήτρας Low-Melt PAEK TC1225. Η διαστρωματική διάταξη της δοκίδας ήταν [45/0/-45/0/90/0/-45/0/45] και του κελύφους ψευδοϊσότροπη [45/-45/0/-45/90/45]s. Στα άκρα της διάταξης και για 50mm τοποθετήθηκαν block ρητίνης για την καλύτερη μεταφορά των δυνάμεων στο δοκίμιο. Η

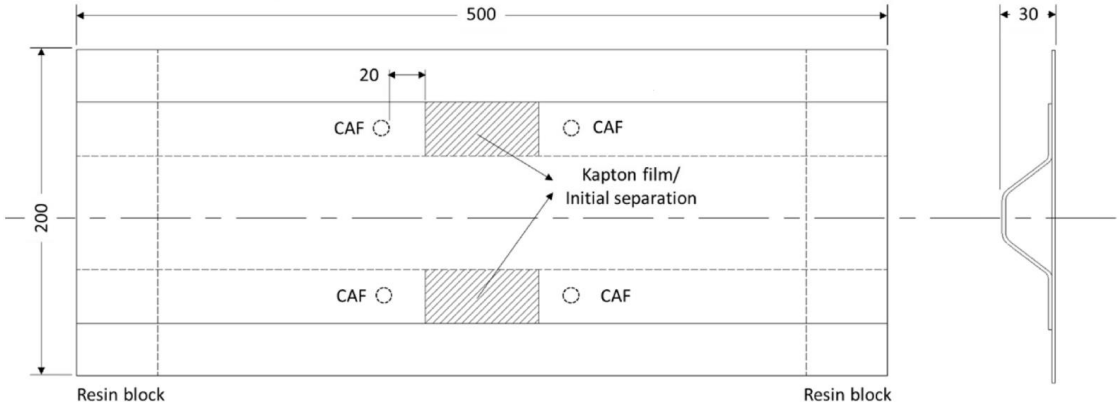
φόρτιση που του επιβλήθηκε ήταν θλιπτική με τη μία αρπάγη να μετακινείται με ρυθμό 100mm/s και διάρκεια προσομοίωσης 0.02s.

Μία παρόμοια διάταξη με μικρές διαφορές στις διαστάσεις της είχε μελετηθεί θεωρητικά και πειραματικά σε φόρτιση θλίψης με ρυθμό μετατόπισης της αρπάγης 1mm/min. Το υλικό των δοκιμίων όπως και η διαστρωματική διάταξη του κελύφους και της δοκίδας ήταν η ίδια με της διάταξη του παραπάνω σχήματος. Η σύνδεση της δοκίδας με το κέλυφος πραγματοποιήθηκε με επαγωγική θερμοπλαστική συγκόλληση και λόγω έλλειψης πειραματικών δεδομένων, οι ιδιότητες αστοχίας της συγκόλλησης σε σχέση με τη σύνδεση με στοιχεία συνοχής θεωρήθηκαν υποβαθμισμένες κατά 30%. Οι διάμετροι των ILSFSR και RFSSW μηχανισμών ήταν 5mm και 9mm αντίστοιχα [23].

Το δοκίμιο και οι διαστάσεις του φαίνονται το παρακάτω σχήμα (σχήμα 3.2-2).

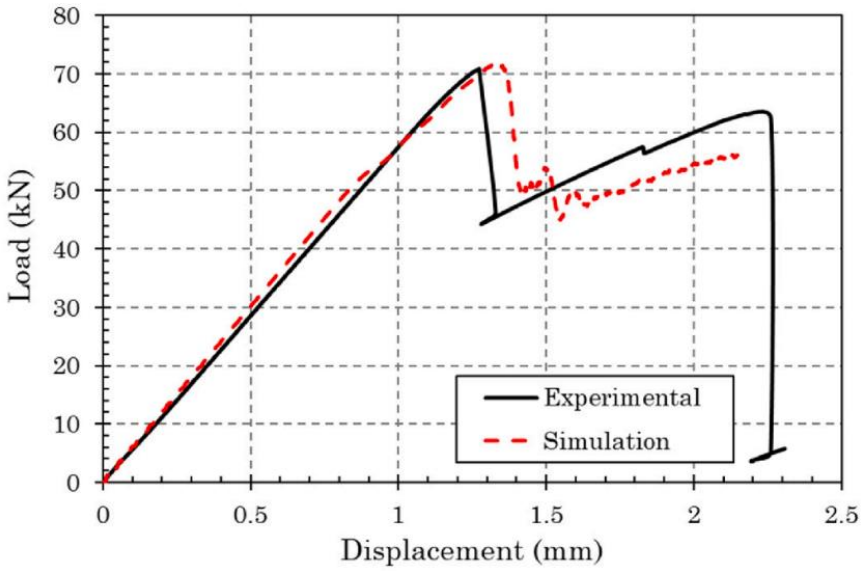



***Σχήμα 3.2-2: Διάταξη κελύφους-δοκίδας με αρχική αποσύνδεση [23]***




***Σχήμα 3.2-3: Διαστάσεις κελύφους-δοκίδας με αρχική αποσύνδεση [23]***

Η φόρτιση πραγματοποιήθηκε αρχικά σε δοκίμιο αναφοράς πειραματικά και θεωρητικά (μέσω προσομοίωσης), και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα.

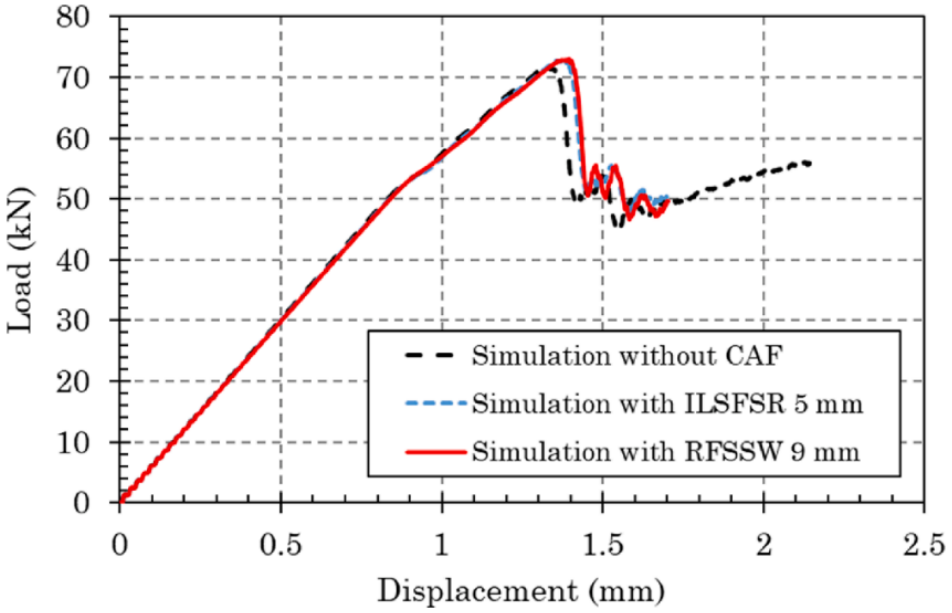



*Σχήμα 3.2-4: Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης [23]*

Παρατηρούμε πολύ καλή προσέγγιση της συμπεριφοράς του σε μονοαξονική θλίψη και οι αποκλίσεις στη μέγιστη δύναμη είναι ελάχιστες. Έχοντας έτσι τις βέλτιστες παραμέτρους για κάθε μέθοδο όπως φαίνονται παρακάτω, δημιουργήθηκαν οι αντίστοιχοι μηχανισμοί στη διάταξη κελύφους-κόλλα-δοκίδας.

ILSFSR: διάμετρος 5mm, απόσταση από την αποσύνδεση 20mm

RFSSW: διάμετρος 9mm, απόσταση από την αποσύνδεση 20mm




***Εικόνα 3.2-5: Διάταξη κελύφους – δοκίδας [23]***

Τα αποτελέσματα έδειξαν μικρή αύξηση στη μέγιστη δύναμη που μπορεί να φέρει η διάταξη με τη δημιουργία των μηχανισμών διακοπής αποσύνδεσης με τις βέλτιστες παραμέτρους που μελετήθηκαν. Παρ' όλα αυτά έγινε φανερό ότι η διάμετρος του μηχανισμού, η απόσταση από την αποσύνδεση καθώς και το βάθος του παίζουν σημαντικό ρόλο στην αποδοτικότητα τους. Τέλος και στο μοντέλο της προσομοίωσης καθώς και στο δοκίμιο του πειράματος παρουσιάστηκε λυγισμός ο οποίος και προσομοιώθηκε με μεγάλη ακρίβεια.




***Εικόνα 3.2-6: Φαινόμενο λυγισμού σε (α) δοκίμιο (b) μοντέλο [23]***

# 4 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

## 4.1 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ

Η μοντελοποίηση της ατράκτου, της σύνδεσης και των στοιχείων συνοχής πραγματοποιήθηκε με το υπολογιστικό πακέτο LS-Dyna. Καθώς δεν υπάρχει επιλογή μονάδων μέτρησης, τα αποτελέσματα που προκύπτουν ακολουθούν τις μονάδες μέτρησης που ορίζονται από το υπολογιστικό πακέτο ώστε να υπάρχει μια συνέπεια στα αποτελέσματα. Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν οι μονάδες μέτρησης με σημείο αναφοράς την πυκνότητα μάζας και το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα είναι οι ακόλουθες[38]:

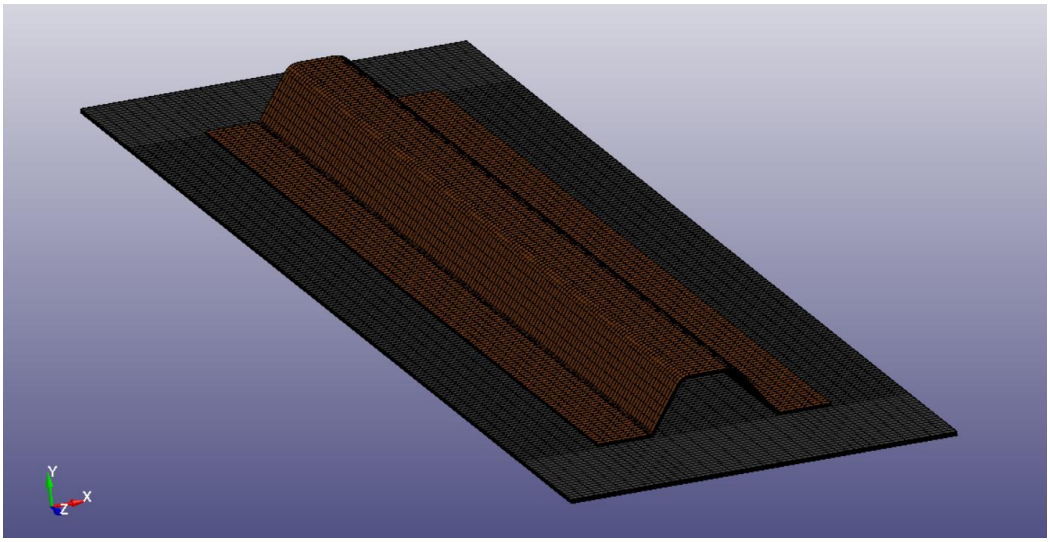
| Μέγεθος | Μονάδα μέτρησης |
|---|---|
| Μάζα | Ton |
| Μήκος | mm |
| Χρόνος | ms |
| Δύναμη | N |
| Τάση | Mpa |
| Ενέργεια | N-mm |
| Πυκνότητα | $7.83*10^{-9}$ |
| Μέτρο ελαστικότητας | $2.07*10^{5}$ |

Η διακριτοποίηση του κελύφους πραγματοποιήθηκε με κυβικά πεπερασμένα στοιχεία τριών βαθμών ελευθερίας ανά κόμβο. Για τις πλευρές του κελύφους και τη μοντελοποίηση τους έχουμε:

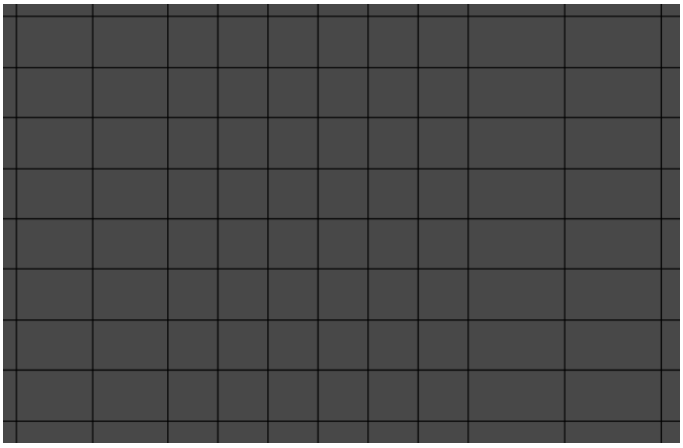
- Μήκος (1000mm): 200 πεπερασμένα στοιχεία ίδιο μήκους
- Πλάτος (226mm): 32 πεπερασμένα στοιχεία διαφορετικών διαστάσεων
- Πάχος (2.4mm): 12 πεπερασμένα στοιχεία ίδιο μήκους

Στις περιοχές σύνδεσης με τα πέλματα της δοκίδας, η διακριτοποίηση έγινε με πιο πυκνό πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων για καλύτερη μελέτη των δυνάμεων και των μετατοπίσεων των κόμβων, όπως και σε μια περιοχή 30mmx30mm με κέντρο το μηχανισμό διακοπής

αποσύνδεσης που είναι και η περιοχή ενδιαφέροντος για την εξέλιξη της ρωγμής και της αστοχία του μηχανισμού.

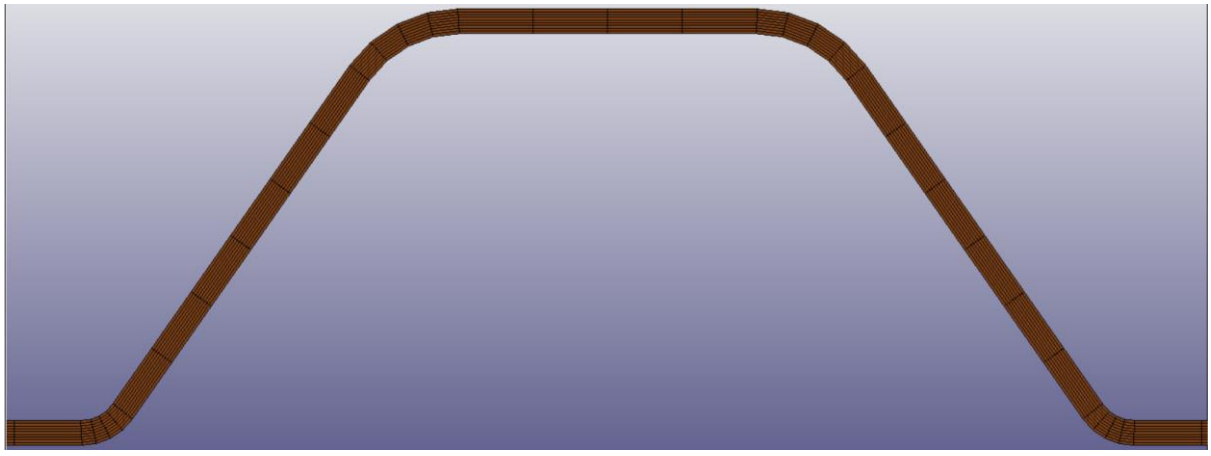


***Εικόνα 4.1-1: Κέλυφος-στοιχεία συνοχής-δοκίδα***



***Σχήμα 4.1-2: Πυκνότερο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων***

Για τη διακριτοποίηση της δοκίδας έχουμε 160 πεπερασμένα στοιχεία κατά το μήκος της και στα πέλματα όμοια με τις επιφάνειες επαφής της δοκίδας με το κέλυφος.



***Σχήμα 4.1-3: Διατομή δοκίδας***

## 4.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΥΛΙΚΩΝ

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση του κελύφους και της δοκίδας ήταν το MAT_054 (μοντέλο προοδευτικής βλάβης). Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για ορθότροπα υλικά με την επιλογή ψαθυρής αστοχίας για σύνθετα υλικά. Ως κριτήριο αστοχίας χρησιμοποιείται το κριτήριο Tsai-Wu κατά το οποίο για τις ίνες του συνθέτου ισχύει[39]:

$$\text{Για εφελκυστικά φορτία: } \sigma_{\alpha\alpha} > 0 \Rightarrow e_f^2 = \left(\frac{\sigma_{\alpha\alpha}}{X_t}\right)^2 + \beta\left(\frac{\sigma_{\alpha b}}{S_c}\right)^2 - 1$$

$$\text{Για θλιπτικά φορτία: } \sigma_{\alpha\alpha} < 0 \Rightarrow e_c^2 = \left(\frac{\sigma_{\alpha\alpha}}{X_c}\right)^2 - 1$$

Όπου αν:

- $e_f^2 \geq 0$ έχουμε αστοχία των ινών
- $e_f^2 < 0$ έχουμε ελαστική παραμόρφωση των ινών

Για τη μήτρα του συνθέτου το κριτήριο αστοχίας είναι το ίδιο με το κριτήριο Chang-Chang για εφελκυσμό και θλίψη:

$$\text{Για εφελκυστικά φορτία: } \sigma_{bb} > 0 \Rightarrow e_m^2 = \left(\frac{\sigma_{bb}}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\alpha b}}{S_c}\right)^2 - 1$$

$$\text{Για θλιπτικά φορτία: } \sigma_{bb} < 0 \Rightarrow e_d^2 = \left(\frac{\sigma_{bb}}{2S_c}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{2S_c}\right)^2 - 1\right]\frac{\sigma_{bb}}{Y_c} + \left(\frac{\sigma_{\alpha b}}{S_c}\right)^2 - 1$$

Όπου αν:

- $e_d^2 \geq 0$ έχουμε αστοχία της μήτρας
- $e_d^2 < 0$ έχουμε ελαστική παραμόρφωση της μήτρας

Όπου:

$X_t$ = όριο θραύσης σε εφελκυσμό στη διαμήκη διεύθυνση

$X_c$ = όριο θραύσης σε θλίψη στη διαμήκη διεύθυνση

$Y_t$ = όριο θραύσης σε εφελκυσμό στην εγκάρσια διεύθυνση

$Y_c$ = όριο θραύσης σε θλίψη στην εγκάρσια διεύθυνση

$S_c$ = όριο διάτμησης στο επίπεδο a-b

σ = τάσεις στις αντίστοιχες διευθύνσεις

a,b,c = δείκτες διεύθυνσης στο κύριο σύστημα συμμετρίας

Οι ιδιότητες υλικού όπως εμφανίζονται στο υπολογιστικό πακέτο παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

| ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ | ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ | ΤΙΜΗ |
|---|---|---|
| RO | Πυκνότητα μάζας | $1.59 \times 10^9$ g/cc |
| EA | Μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό στη διαμήκη διεύθυνση | 135 GPa |

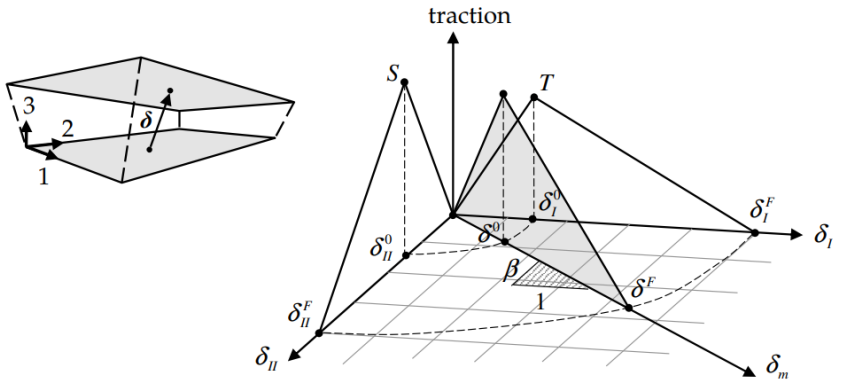
| | | |
|---|---|---|
| EB | Μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό στην εγκάρσια διεύθυνση | 10 GPa |
| PRBA | Λόγος Poisson | 0.075 |
| GAB | Μέτρο διάτμησης $G_{12}$ | 4300 MPa |
| GBC | Μέτρο διάτμησης $G_{23}$ | 4000 MPa |
| GCA | Μέτρο διάτμησης $G_{31}$ | 4300 MPa |
| DFAILM | Επιμήκυνση θραύσης μήτρας σε εφελκυσμό και θλίψη | 0.024 |
| DFAILS | Διατμητική επιμήκυνση θραύσης μήτρας σε εφελκυσμό και θλίψη | 0.03 |
| TFAIL | Χρονικό βήμα για τη διαγραφή στοιχείων | $1.2 \times 10^9$ |
| DFAILT | Επιμήκυνση θραύσης ινών σε εφελκυσμό | 0.0174 |
| DFAILC | Επιμήκυνση θραύσης ινών σε θλίψη | -0.0116 |
| XC | Όριο θραύσης σε θλίψη | 1300 MPa |
| XT | Όριο θραύσης σε εφελκυσμό | 2410 MPa |
| YC | Όριο θραύσης σε θλίψη εγκάρσια διεύθυνση | 152 MPa |
| YT | Όριο θραύσης σε εφελκυσμό εγκάρσια διεύθυνση | 86 MPa |
| SC | Αντοχή σε διάτμηση | 152 MPa |
| CRIT | Κριτήριο αστοχίας | 54, Tsai-Wu |

***Πίνακας 4.2-1: Ιδιότητες σύνθετων πλακών***

Η σύνδεση συμπολυμερισμού μεταξύ των πλακών μοντελοποιήθηκε με το υλικό MAT_138 (μοντέλο ζώνης συνοχής). Αυτό το μοντέλο υλικού ακολουθεί το νόμο έλξης -διαχωρισμού (σχήμα4.2-1) και οι ρυθμοί απελευθέρωσης ενέργειας υπολογίζονται από τις ακόλουθες εξισώσεις[34]:

$$GIC = Tx\frac{UND}{2}$$

$$GIIC = Tx\frac{UTD}{2}$$




***Σχήμα 4.2-1: Νόμος έλξης-διαχωρισμού [34]***

Οι ιδιότητες της παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

| ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ | ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ | ΤΙΜΗ |
|---|---|---|
| RO | Πυκνότητα μάζας | 1.3 x $10^{-9}$g/cc |
| EN | Δυσκαμψία κάθετα στο επίπεδο του στοιχείου συνοχής | 8 GPa |
| ET | Δυσκαμψία στο επίπεδο του στοιχείου συνοχής | 5 GPa |
| GIC | Ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας σε φόρτιση τύπου I | 2.1 J/$mm^2$ |
| GIIC | Ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας σε φόρτιση τύπου II | 2.6 J/$mm^2$ |
| T | Μέγιστη έλξη σε εφελκυσμό | 86 MPa |
| S | Μέγιστη έλξη σε διάτμηση | 42 MPa |
| UND | Επιμήκυνση θραύσης στη διαμήκη διεύθυνση | 0.0488 |
| UTD | Επιμήκυνση θραύσης στην εφαπτομενική διεύθυνση | 0.123 |

***Πίνακας 4.2-2: Ιδιότητες στοιχείων συνοχής***

## 4.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΙΑΚΟΠΗΣ ΑΠΟΣΥΝΔΕΣΗΣ

Οι μηχανισμοί διακοπής αποσύνδεσης που δημιουργήθηκαν ήταν οι ILSFSR και RFSSW.

- ILSFSR

Οι κορμοί των ήλων σε αυτή τη μέθοδο μοντελοποιήθηκαν με 15 πεπερασμένα στοιχεία κατά το πάχος των σύνθετων πλακών (0.2mm ανά στοιχείο) και διάμετρο 3mm και 5mm(σχήμα 4.3-1). Η κεφαλή των ήλων μοντελοποιήθηκε με 1 πεπερασμένο στοιχείο κατά το πάχος της και διάμετρος 5mm και 7 mm αντίστοιχα για τον κορμό των 3mm και 5mm. Ως υλικό επιλέχθηκε ο χάλυβας με μοντέλο MAT_001(ELASTIC).

- RFSSW

Σε αυτή την περίπτωση έχουμε ένα το ίδιο σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας LM-Paek ενισχυμένο με ίνες άνθρακα με τη διαφορά ότι στην περιοχή της σύνδεσης οι ιδιότητες του έχουν διαφοροποιηθεί λόγω της ενίσχυσης με κοντές ίνες. Ο μηχανισμός δοκιμάστηκε με διάμετρο 6mm και 9mm ενώ η διακριτοποίηση παρέμεινε στα 15 πεπερασμένα στοιχεία κατά το πάχος των πλακών.

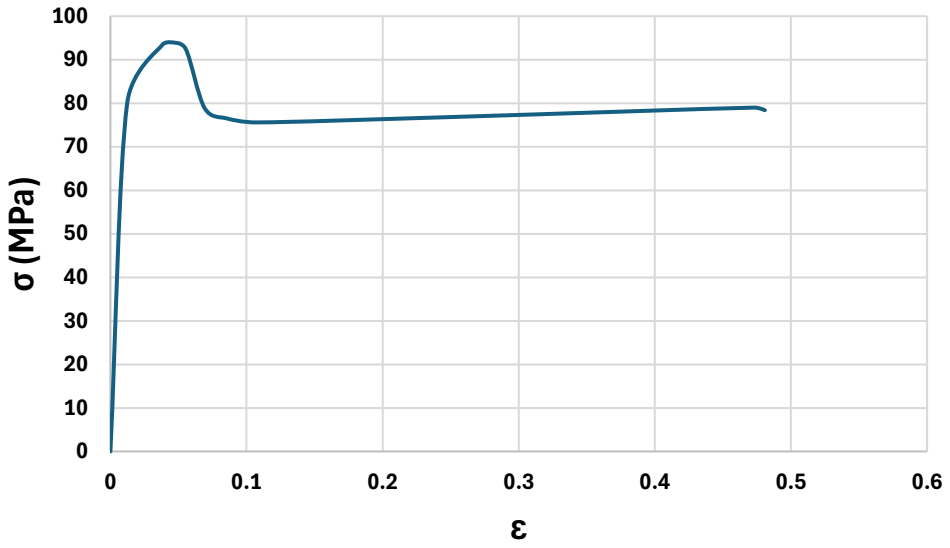


***Σχήμα 4.3-1: ILSFSR 25mm 5mm διάμετρος***

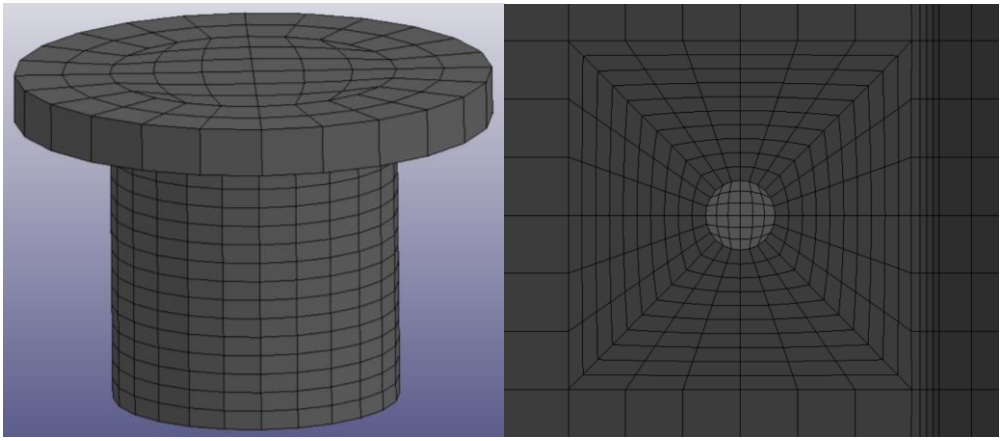
| ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ | ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ | ΤΙΜΗ |
|---|---|---|
| MMOPT | Επιλογή για πλαστική συμπεριφορά του υλικού εκτός από ελαστική | 1 |
| FAILM | Πλαστική παραμόρφωση θραύσης της μήτρας | 0.4808 |
| FVF | Περιεκτικότητα κατά μάζα των ινών | 0.66 |
| ROF | Πυκνότητα μάζας των ινών | $1.59 \times 10^{9}$ g/cc |
| EL | Μέτρο ελαστικότητας των ινών στη διαμήκη διεύθυνση | $2.3 * 10^{5}$ MPa |
| ET | Μέτρο ελαστικότητας των ινών στην εγκάρσια διεύθυνση | $1.5 * 10^{4}$ MPa |
| GLT | Μέτρο διάτμησης στη διαμήκη διεύθυνση | |
| PRTL | $\nu_{xz}$ | 0.07 |
| PRTT | $\nu_{xy}$ | 0.2 |
| XT | Αντοχή ινών σε εφελκυσμό στη διαμήκη διεύθυνση | 3530 MPa |
| ROM | Πυκνότητα μάζας μήτρας | $1.37 \times 10^{-9}$g/cc |
| E | Μέτρο ελαστικότητας μήτρας | 4100 MPa |
| PR | Λόγος Poisson μήτρας | 0.4 |
| SIGYT | Όριο διαρροής | 70.9 MPa |
| ETANT | Εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας της μήτρας σε εφελκυσμό | 3600 MPa |

***Πίνακας 4.3-1: Ιδιότητες υλικού MAT_4A_MICROMEC***

Η μοντελοποίηση του μηχανισμού πραγματοποιήθηκε με το υλικό MAT_4A_MICROMEC. Αυτού του είδους το υλικό ξεχωρίζει τις ιδιότητες της μήτρας με αυτές της ενίσχυσης και προτείνεται για ανισότροπα και θερμοπλαστικά υλικά. Η μήτρα μοντελοποιείται με ισότροπη ελαστική-βισκοπλαστική συμπεριφορά με βάση το κριτήριο von Mises ενώ οι ίνες ως εγκαρσίως ισότροπες. Λόγω της πολυπλοκότητας των υπολογισμών αυτού του μοντέλου, η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης της μήτρας [30] απαιτείται για τη σωστή παραμετροποίηση της η οποία και φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 4.3-2).




***Σχήμα 4.3-2: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης υλικού MAT_4A_MICROMEC***



*Σχήμα 4.3-2: Μηχανισμοί διακοπής αποσύνδεσης*

Επιπλέον των μηχανισμών διακοπής αποσύνδεσης, εφαρμόστηκε και επαφή τύπου AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK που δίνει την δυνατότητα προσδιορισμού σύνδεσης με στοιχεία συνοχής χωρίς την ύπαρξη των αντίστοιχων στοιχείων. Οι παράμετροι αυτής της επαφής αντιστοιχήθηκαν με τις ιδιότητες των στοιχείων συνοχής όπως φαίνεται παρακάτω:

| Παράμετρος επαφής | Ιδιότητα στοιχείων συνοχής | Τιμή |
|---|---|---|
| NFLS | T | 86 |
| SFLS | S | 42 |
| PARAM | XMU | 1 |
| ERATEN | GIC | 2.1 |
| ERATES | GIIC | 2.6 |
| $CT_2CN$ | ET/EN | 0.625 |
| CN | EN | 8000 |

*Πίνακας 4.3-3: Ιδιότητες σύνδεσης με στοιχεία συνοχής*

## 4.4 ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Οι μετατοπίσεις καθώς και οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν στο κέλυφος μοντελοποιήθηκαν με τη χρήση σταθερών μετατοπίσεων καθώς και περιορισμών βαθμών ελευθερίας στους κόμβους του. Για τον περιορισμό βαθμών ελευθερίας χρησιμοποιήθηκε η 'λέξη κλειδί' SPC_SET ενώ για την εφαρμογή των μετατοπίσεων η PRESCRIBED_MOTION_SET

Αρχικά η μετατόπιση του δοκιμίου ορίστηκε με την με τιμή 500 mm/s στον άξονα z, η οποία εφαρμόστηκε στους εξωτερικούς κόμβους της ανώτερης και κατώτερης στρώσης του κελύφους για τα πρώτα 100 mm. Επίσης περιορίστηκαν όλοι οι βαθμοί ελευθερίας αυτών των κόμβων εκτός από την κίνηση στον άξονα Z.

Για την ακίνητη αρπάγη, περιορίστηκαν όλοι οι βαθμοί ελευθερίας των εξωτερικών κόμβων της ανώτερης και κατώτερης στρώσης του κελύφους για τα πρώτα 100 mm. Τέλος εφαρμόστηκε περιορισμός της κατακόρυφης κίνησης (άξονας Y) στις πλευρές του κελύφους για την αποφυγή του λογισμού.

Εξαιτίας του προγραμματισμού του Ls-Dyna, όλες οι επαφές μεταξύ πεπερασμένων στοιχείων που δεν ανήκουν στην ίδια στρώση πρέπει να ορίζονται και έτσι με τη χρήση του AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE τέθηκε επαφή μεταξύ όλων των επιφανειών των στοιχείων του μοντέλου.

### 4.5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

Οι βασικές 'λέξεις κλειδιά' που χρησιμοποιήθηκαν στη δημιουργία του μοντέλου ακολουθούν αλφαβητικά:

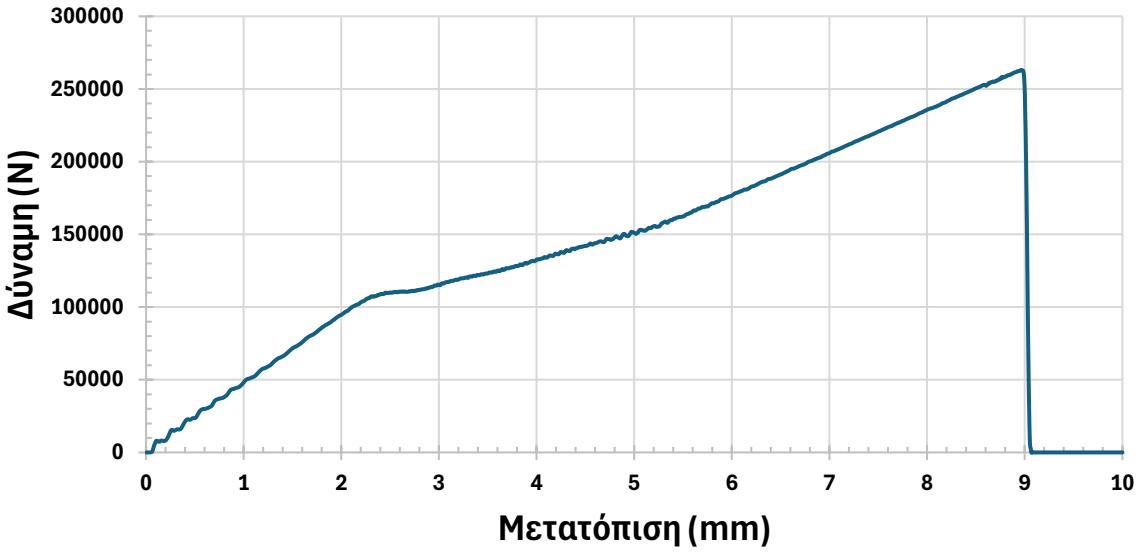
| ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ | ΤΙΜΕΣ |
|---|---|
| CONTROL | |
| ACCURACY | OSU = 1, INN = 3 |
| ENERGY | HGEN = RWEN = SLNTEN = RYLEN = 2 |
| HOURGLASS | IHQ = 1, QH = 0.1 |
| TERMINATION | ENDTIM = 0.02 |
| DAMPING | |
| GLOBAL | VALDMP=800<br>STX=STY=STZ=SRX=SRY=SRZ=1 |
| PART_STIFFNESS_SET | 0.1 |
| DATABASE | |
| ASCII option | GLSTAT=SPCFORC=$10^{-5}$ |
| BINARY_D3PLOT | DT=$10^{-5}$ |
| SECTION | |
| ELFORM | 1 για στερεά στοιχεία<br>19 για στοιχεία συνοχής |

***Πίνακας 4.5-1: Παράμετροι πειράματος***

# 5 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 5.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΕΛΥΦΟΥΣ - ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΥΝΟΧΗΣ - ΔΟΚΙΔΑΣ

Η δημιουργία των μοντέλων ακολούθησε την ακόλουθη πορεία για την εύρεση της βέλτιστης θέσης δημιουργίας του μηχανισμού διακοπής αποσύνδεσης. Αρχικά δοκιμάστηκε η διάταξη σε εφελκυσμό και θλίψη χωρίς την ύπαρξη των μηχανισμών έτσι ώστε να έχουμε δεδομένα δοκιμίου αναφοράς για να γίνει η σύγκριση αποδοτικότητας.

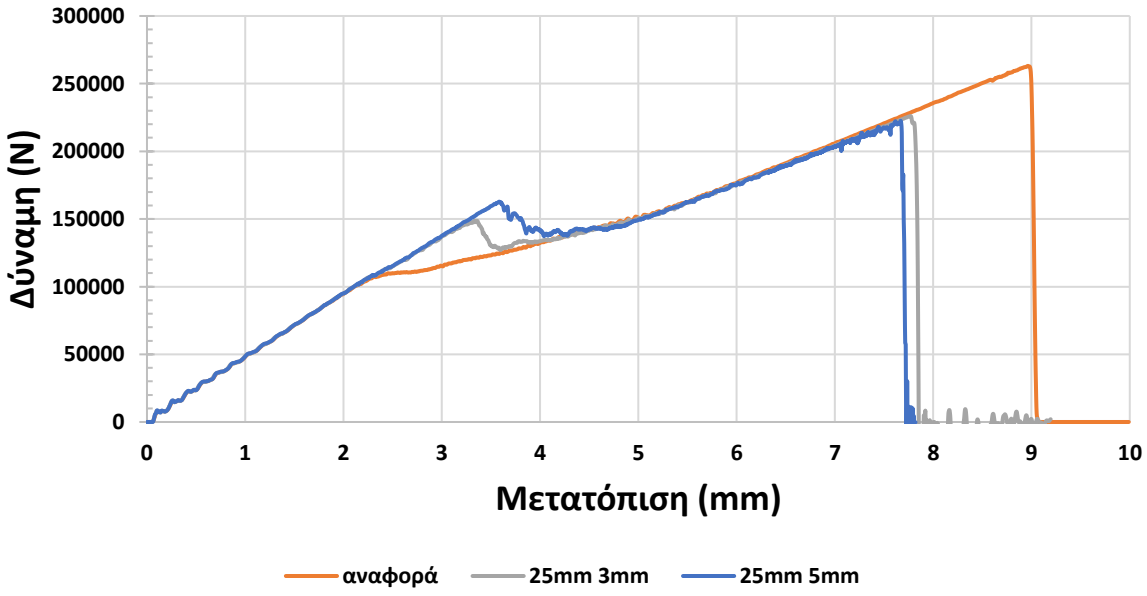



***Σχήμα 5.1-1: Καμπύλη δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου αναφοράς***

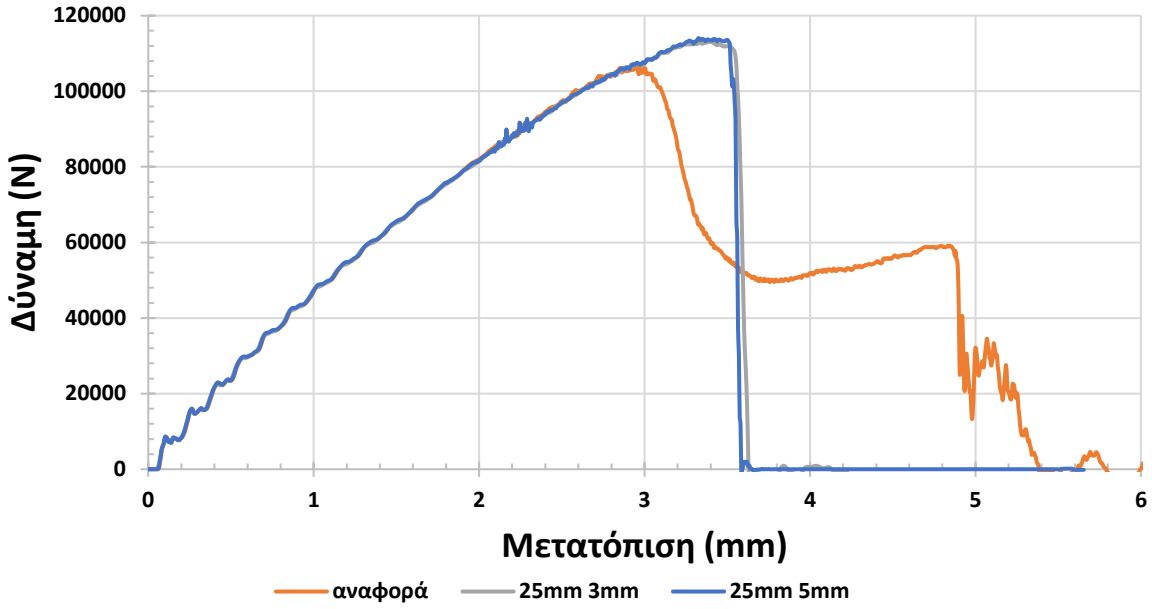
Έπειτα δημιουργήθηκαν τέσσερα μοντέλα με τις εξής διατάξεις:

- ILSFSR με διάμετρο 3mm στα 25mm από τα άκρα της δοκίδας
- ILSFSR με διάμετρο 5mm στα 25mm από τα άκρα της δοκίδας
- RFSSW με διάμετρο 6mm στα 25mm από τα άκρα της δοκίδας
- RFSSW με διάμετρο 9mm στα 25mm από τα άκρα της δοκίδας

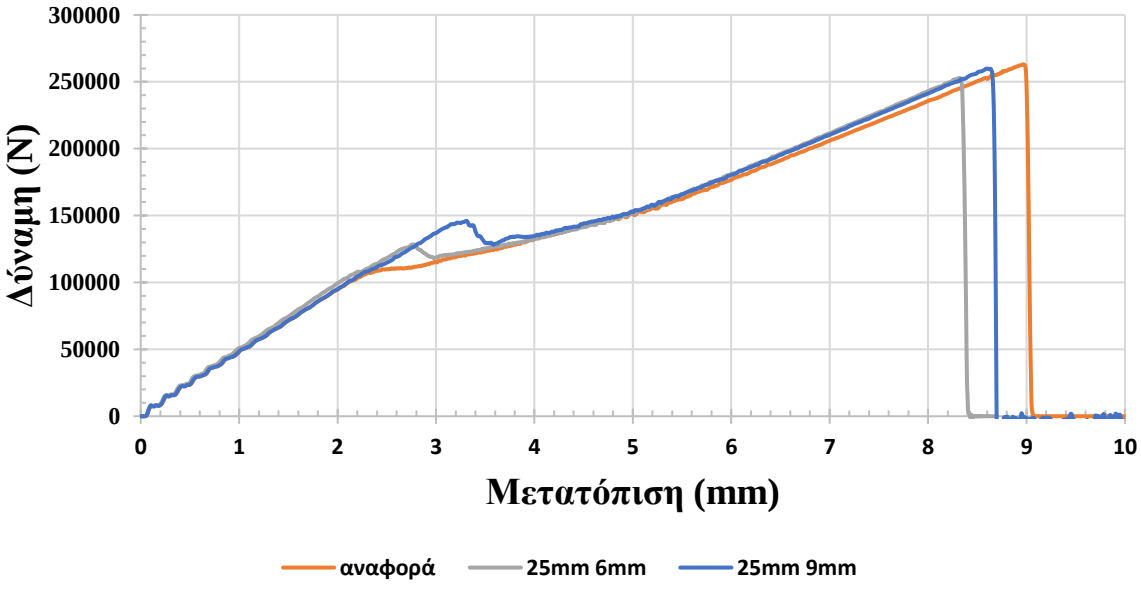
Οι μηχανισμοί τοποθετήθηκαν στο μέσο των πελμάτων στις αντίστοιχες αποστάσεις κατά το μήκος της δοκίδας. Στα παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η καμπύλη δύναμης-μετατόπισης για τη διάταξη ILSFSR με διάμετρο ήλου 3mm και 5mm σε απόσταση 25mm από τα άκρα της δοκίδας σε σύγκριση με τη διάταξη αναφοράς σε εφελκυσμό (σχήμα 5.1-2) και θλίψη (σχήμα 5.1-3). Στο σχήμα 5.1-3 αντίστοιχα παρατηρούμε τα διαγράμματα για τη διάταξη RFSSW διαμέτρου 6mm και 9mm συγκριτικά με την καμπύλη αναφοράς σε εφελκυσμό και θλίψη. Τέλος στο σχήμα 5.1-4 παρατηρούμε τις συγκεντρωτικές καμπύλες των δύο μεθόδων για το πείραμα του εφελκυσμού.



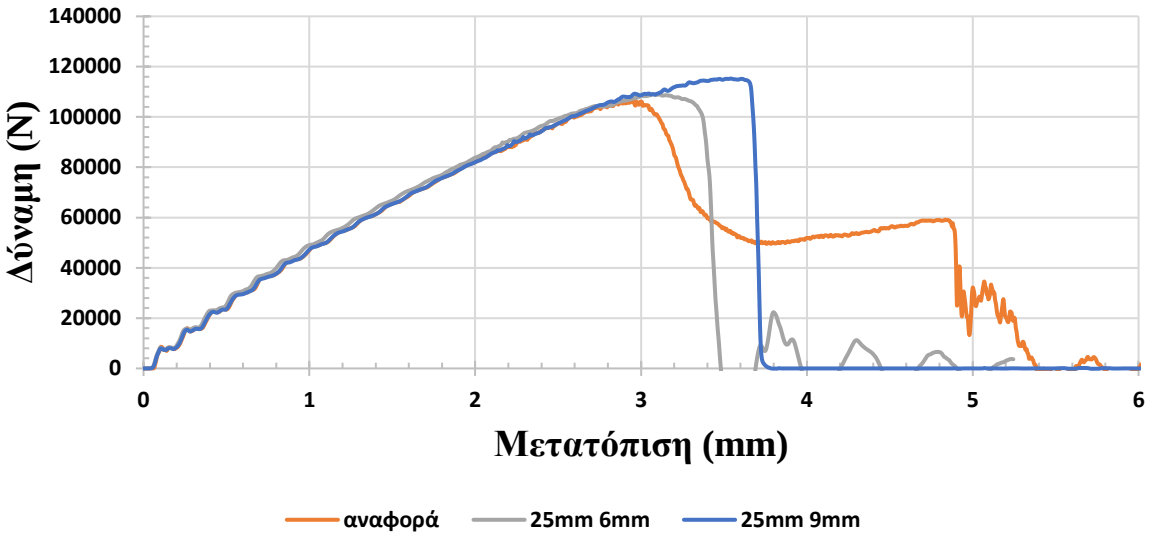

*Σχήμα 5.1-2: Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης ILSFSR σε εφελκυσμό*



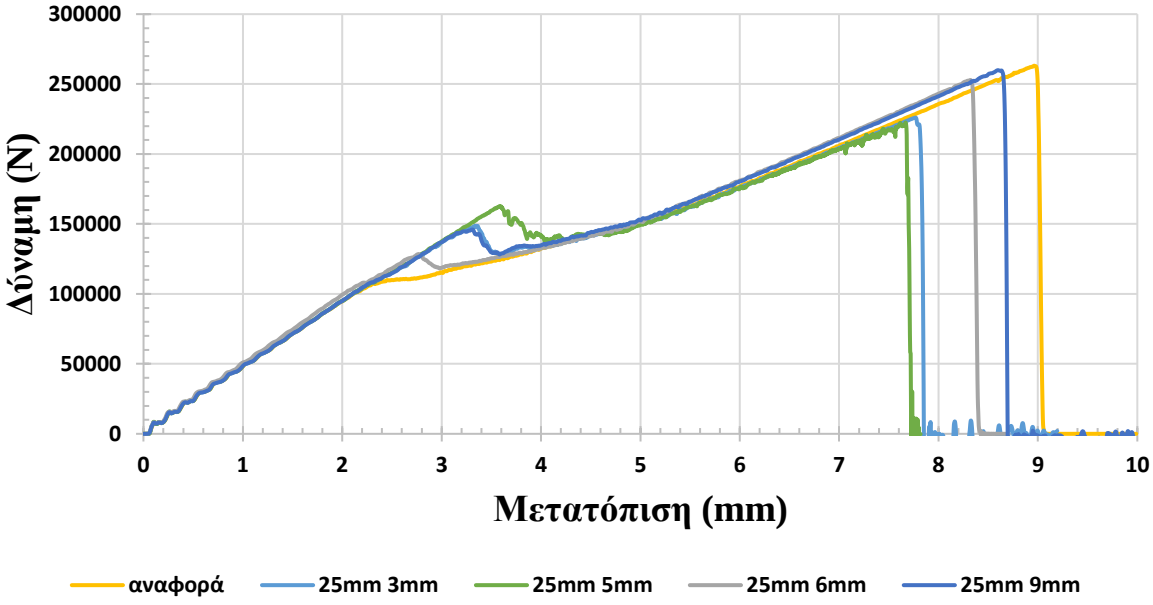

*Εικόνα 5.1-3: Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης ILSFSR σε θλίψη*



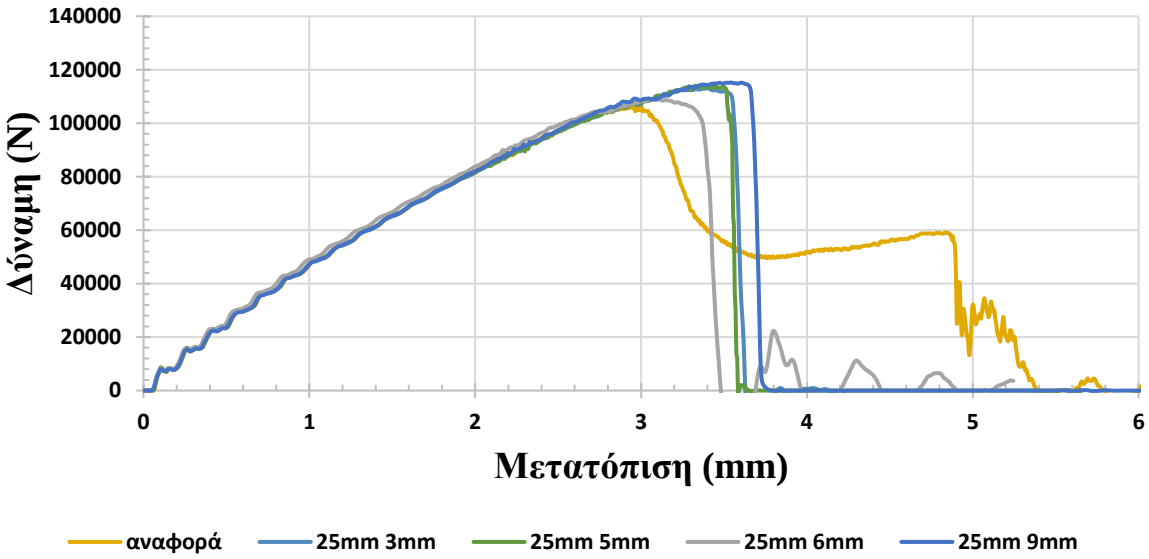

*Σχήμα 5.1-4: Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης RFSSW σε εφελκυσμό*




*Εικόνα 5.1-5: Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης RFSSW σε θλίψη*

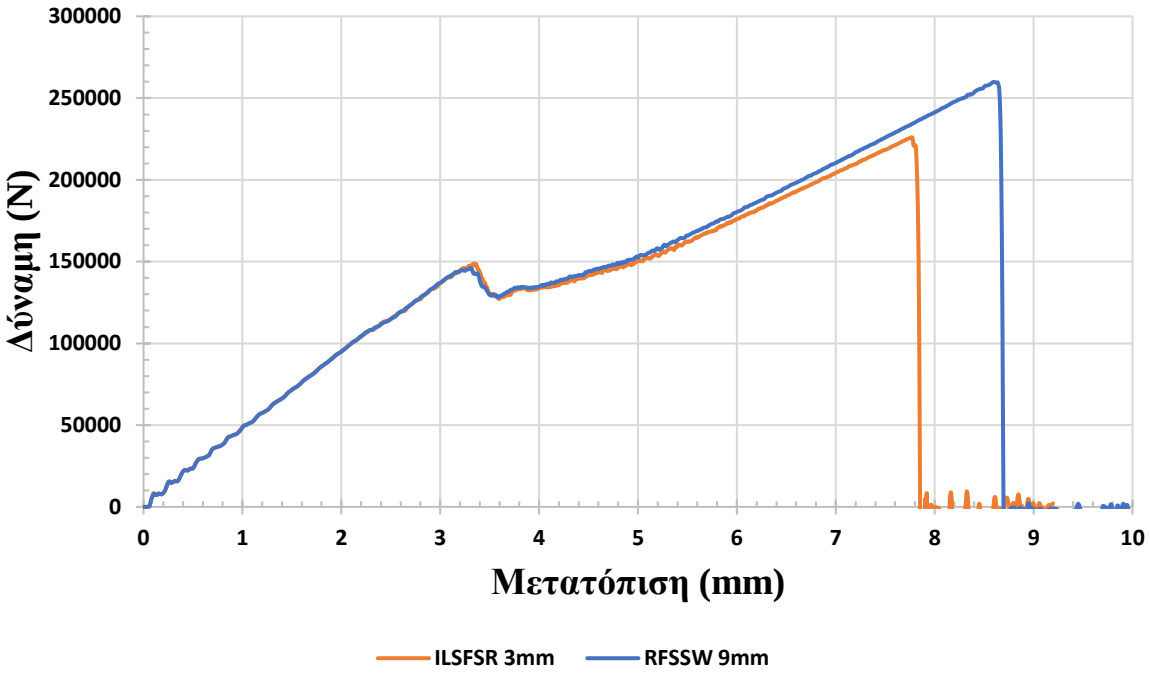



*Σχήμα 5.1-6: Συγκεντρωτικό διάγραμμα δύναμης- μετατόπισης σε εφελκυσμό*

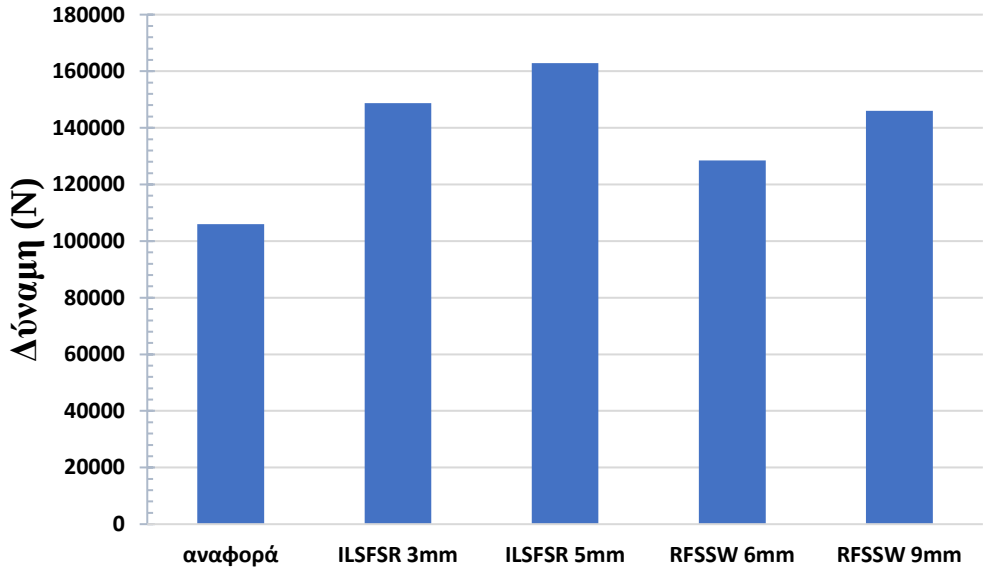



*Σχήμα 5.1-7: Συγκεντρωτικό διάγραμμα δύναμης- μετατόπισης σε θλίψη*

Παρατηρώντας τα διαγράμματα του πειράματος εφελκυσμού, γίνεται φανερό ότι για μεγαλύτερη διάμετρο του μηχανισμού, αυξάνεται το μέγιστο φορτίο που μπορεί να φέρει η διάταξη μέχρι την πλήρη αποσύνδεση της δοκίδας από το κέλυφος. Σημαντική επίσης είναι η και η διαφορά μεταξύ των μέγιστων φορτίων με την εφαρμογή των δύο μηχανισμών. Με το μηχανισμό ILSFSR για 3mm διάμετρο μηχανισμού παρατηρούμε ελάχιστη διαφορά στο μέγιστο φορτίο που μπορεί να φέρει η διάταξη πριν την αστοχία του μηχανισμού RFSSW για διάμετρο μηχανισμού 9mm (σχήμα 5.1-8). Παρακάτω γίνεται σύγκριση της δύναμης που απαιτείται για την αστοχία των μηχανισμών σε σχέση με τη δύναμη στο μοντέλο αναφοράς που ξεκινάει η αστοχία τους στοιχείου συνοχής με μεγάλο ρυθμό. Για το μοντέλο αναφοράς θεωρήθηκε η δύναμη που αντιστοιχεί στην αύξηση του ρυθμού διάδοση της ρωγμής στο στοιχείο συνοχής σε απόσταση 25 mm. Στο σχήμα 5.1-9 παρουσιάζονται οι μέγιστες δυνάμεις που φέρει κάθε διάταξη μέχρι την αστοχία σε γράφημα στηλών.

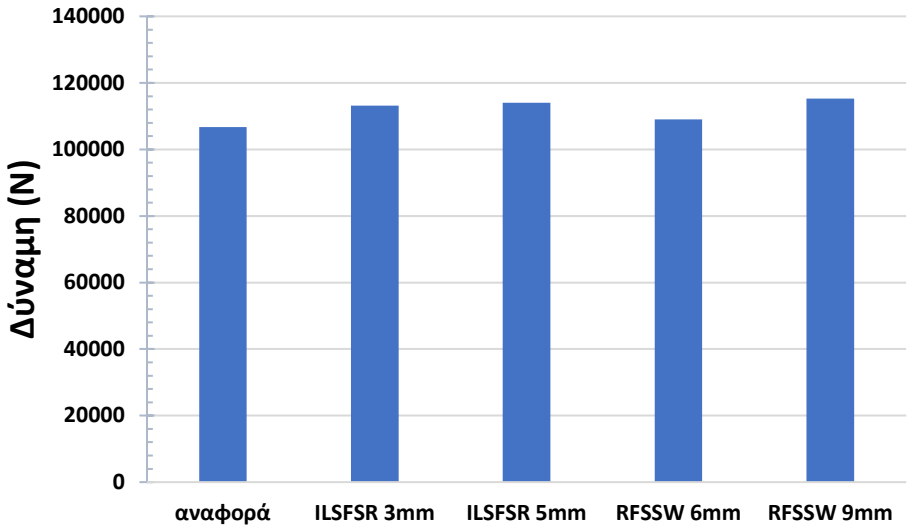



*Σχήμα 5.1-8: Σύγκριση ILSFSR-RFSSW σε εφελκυσμό*



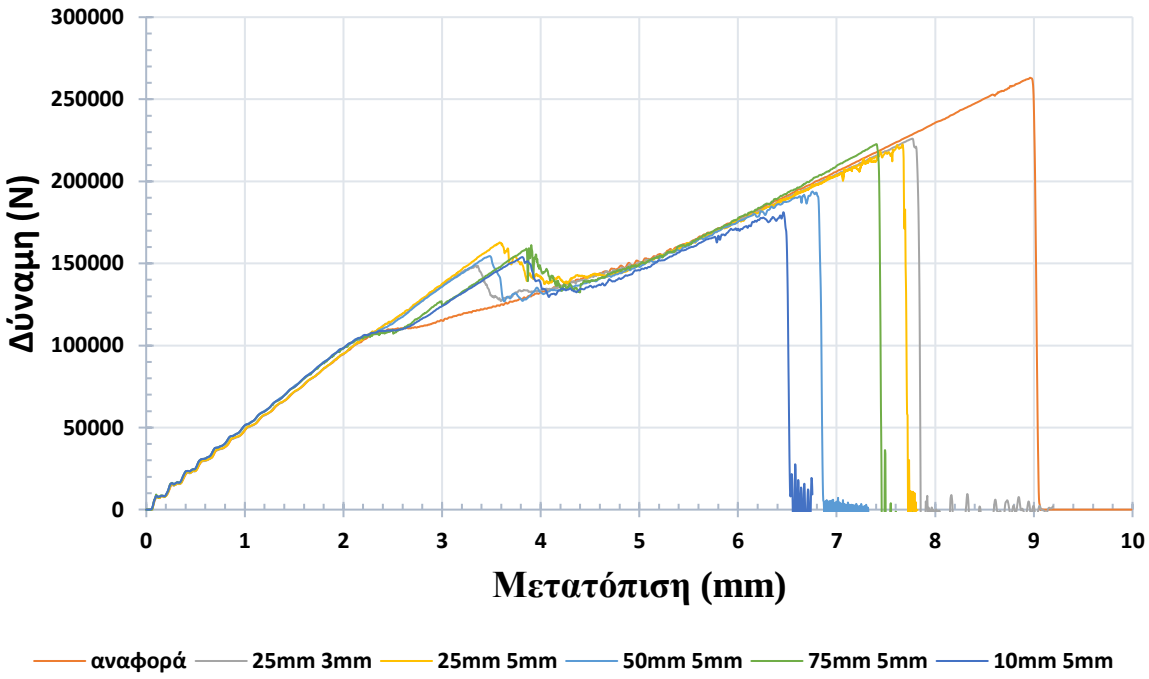

*Εικόνα 5.1-9: Μέγιστη δύναμη ILSFSR-RFSSW σε εφελκυσμό*

Στο πείραμα θλίψης (σχήμα 5.1-14), ως βέλτιστη διάταξη βρέθηκε ο μηχανισμός RFSSW με διάμετρο 9mm με τη διαφορά του με των 6mm να μην είναι σημαντική. Οι δύο μηχανισμοί ILSFSR ομοίως αποκρίθηκαν με παρόμοιο τρόπο έχοντας μικρή απόκλιση στο μέγιστο φορτίο. Παρ' όλα αυτά, η δημιουργία του μηχανισμού με τις βέλτιστες σε κάθε περίπτωση παραμέτρους αύξησε της μέγιστη δύναμη που απαιτείται στο πείραμα εφελκυσμού για την αστοχία του στοιχείου συνοχής πέρα των 25mm κατά 53% ενώ στο πείραμα θλίψης επέφερε βελτίωση μόνο 8%.

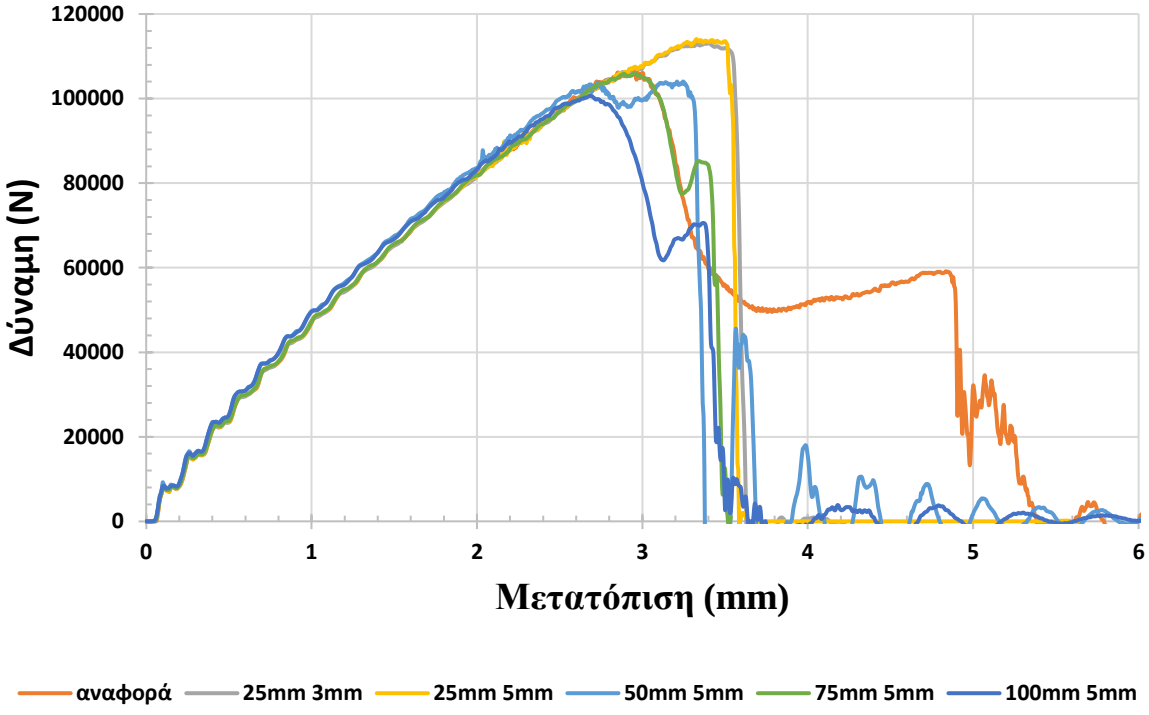



*Σχήμα 5.1-10: Μέγιστη δύναμη ILSFSR-RFSSW θλίψη*

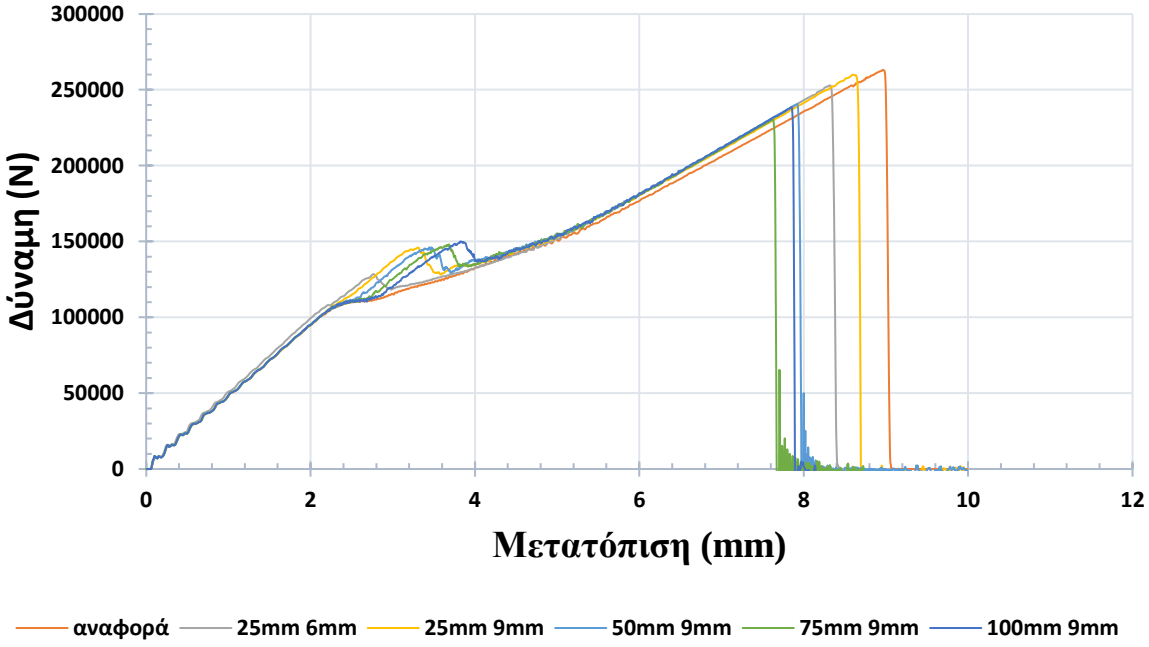
Παρατηρούμε επίσης ότι το φορτίο δεν αυξάνεται γραμμικά ακόμα και στα αρχικά στάδια του πειράματος, γεγονός το οποίο δεν μπορεί να αποφευχθεί ακόμα και με την αύξηση τις πυκνότητας των πεπερασμένων στοιχείων του μοντέλου λόγω της πολυπλοκότητας του. Στα διαγράμματα εφελκυσμού, λίγο πριν η τιμή της μετατόπισης να φτάσει τα 2.5mm, παρατηρείται και μια απόκλιση από τη γραμμική απόκριση του λόγω του φαινόμενου του λυγισμού. Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν άλλες τρεις διατάξεις για κάθε μηχανισμό σε αποστάσεις 50mm, 75mm και 100mm από τα άκρα της δοκίδας με τη βέλτιστη αντίστοιχα διάμετρο, η οποία βρέθηκε στα 5mm για την ILSFSR και στα 9mm για την RFSSW. Στα παρακάτω διαγράμματα (σχήμα 5.1-11 – 5.1-14) παρουσιάζονται οι συγκεντρωτικές καμπύλες των διατάξεων ILSFSR και RFSSW σε εφελκυσμό και θλίψη, καθώς και οι μέγιστες δυνάμεις ανά πείραμα και μηχανισμό σε γράφημα(σχήμα 5.1.15 - 5.1-18).



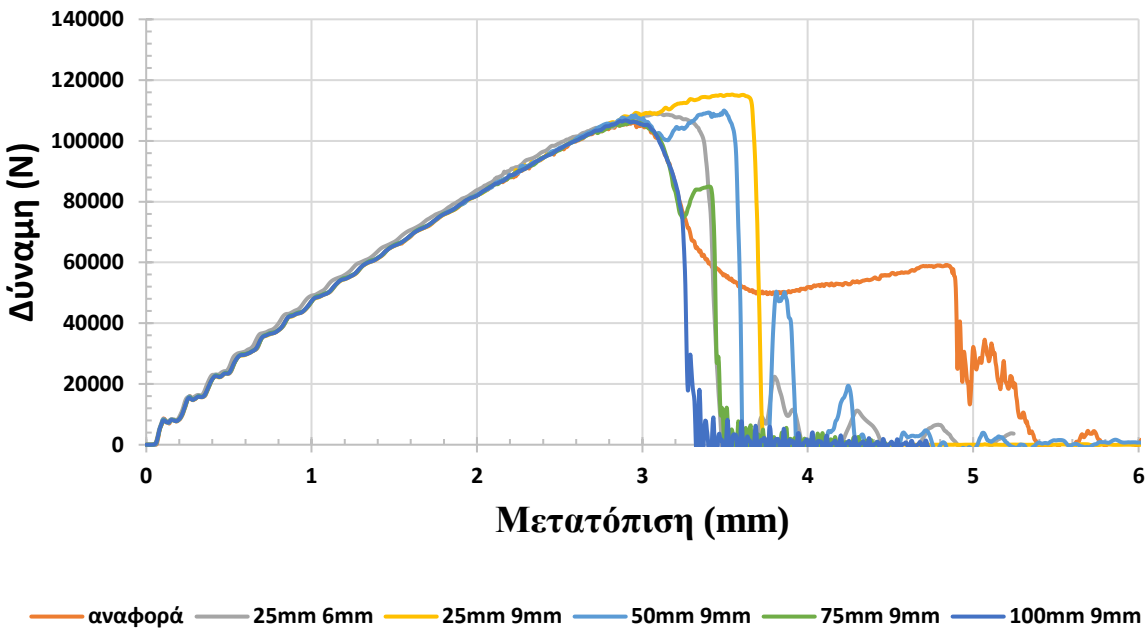

*Σχήμα 5.1-11: Συγκεντρωτική καμπύλη ILSFSR σε εφελκυσμό*



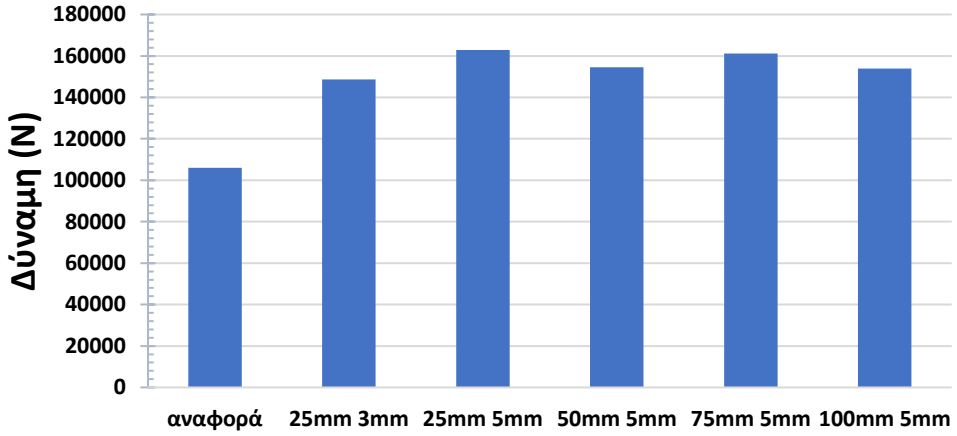

*Σχήμα 5.1-12: Συγκεντρωτικό διάγραμμα ILSFSR σε θλίψη*



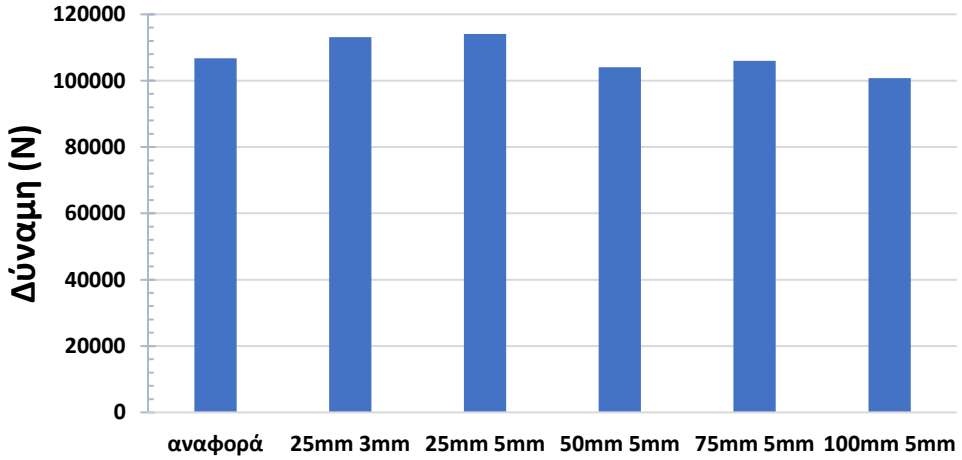

*Σχήμα 5.1-13: Συγκεντρωτικό διάγραμμα RFSSW σε εφελκυσμό*



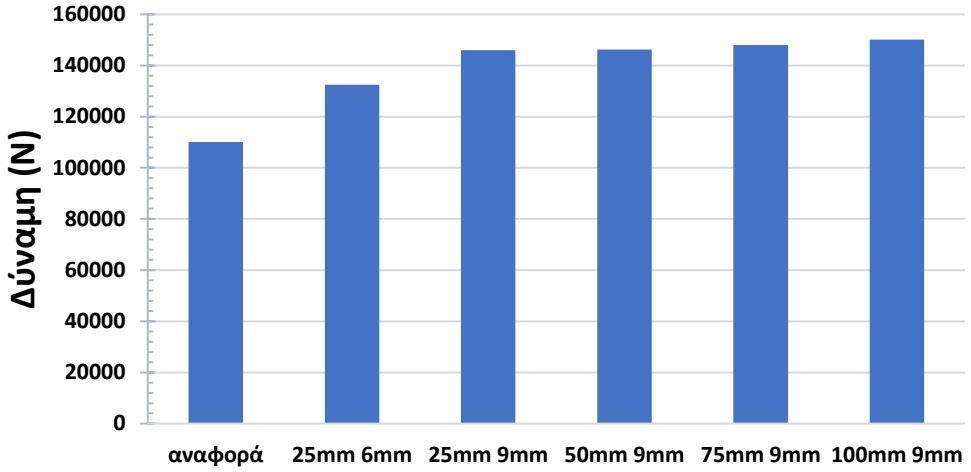

*Εικόνα 5.1-14: Συγκεντρωτικό διάγραμμα RFSSW σε θλίψη*



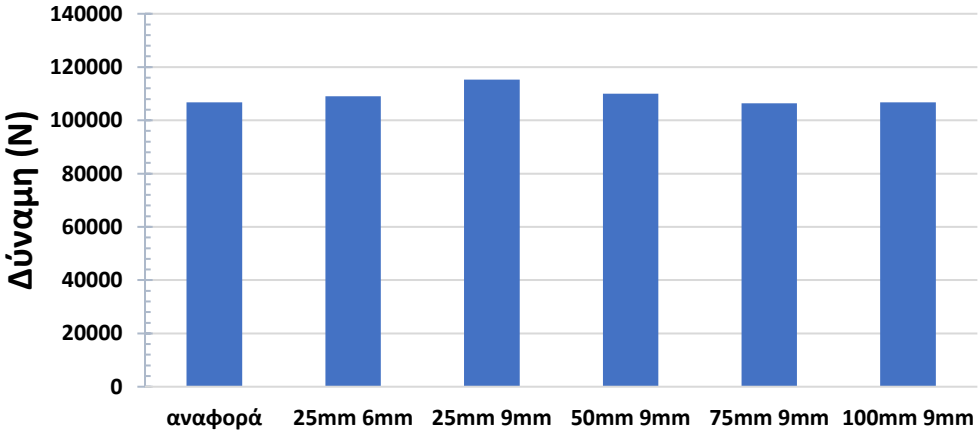

*Σχήμα 5.1-15: Μέγιστες δυνάμεις ILSFSR σε εφελκυσμό*




*Σχήμα 5.1-16: Συγκεντρωτικό διάγραμμα ILSFSR σε θλίψη*




*Σχήμα 5.1-17: Μέγιστες δυνάμεις RFSSW σε εφελκυσμό*



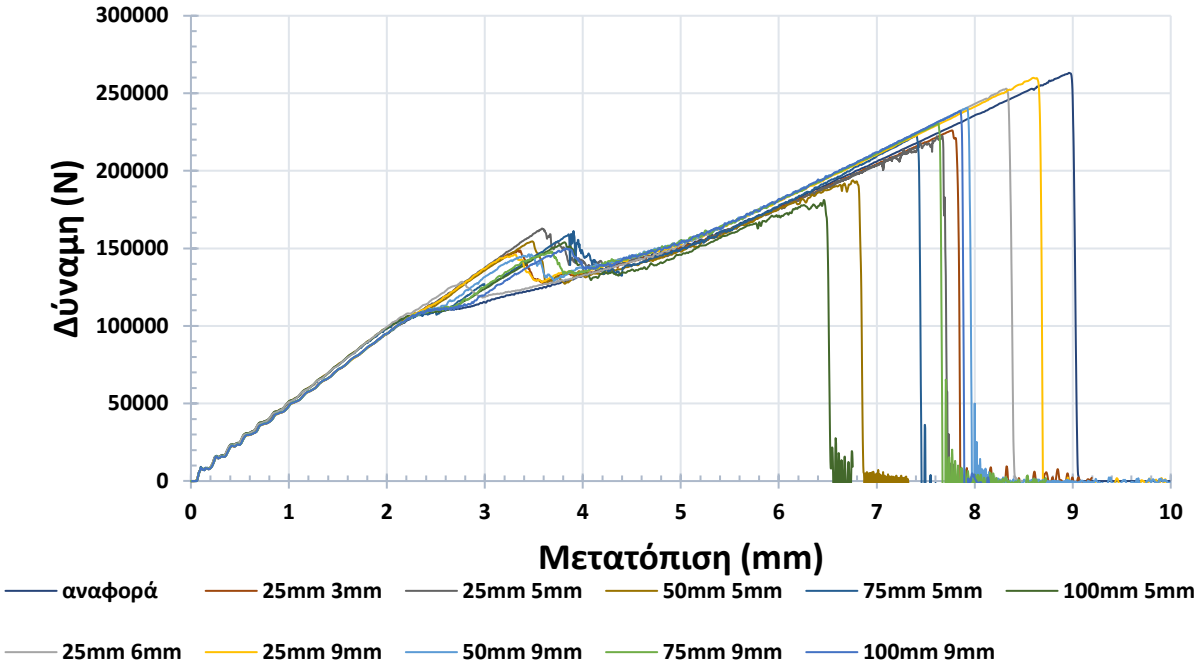

*Εικόνα 5.1-18: Μέγιστες δυνάμεις RFSSW σε θλίψη*

Παρατηρείται ότι για το μηχανισμό ILSFSR η βέλτιστη τοποθέτηση του ήλου παρέμεινε στα 25mm και με την αύξηση της απόστασης του από το σημείου έναρξης της αστοχίας της σύνδεσης δεν αυξάνεται και η απαιτούμενη για την αστοχία του μηχανισμού δύναμη. Οι καμπύλες δύναμης-μετατόπισης παρουσιάζουν απότομες μεταβολές μετά την αστοχία της σύνδεσης και οι ασταθείς περιοχές που υπάρχουν οφείλονται εν μέρει στο γεγονός ότι οι ήλοι έχουν μοντελοποιηθεί με υλικό που δεν παραμετροποιεί την αστοχία του και έτσι μπορούν να παραμορφωθούν περισσότερο από όσο θα ήταν στην πραγματικότητα δυνατό χωρίς αστοχία. Μία άλλη αιτία δημιουργίας των ασταθών αυτών περιοχών είναι η ταχύτητα εφαρμογής της μετατόπισης στο άκρο του κελύφους, με τη μείωση της οποίας πιθανόν να υπήρχαν μικρότερες απότομες μεταβολές των δυνάμεων. Για την περίπτωση του μηχανισμού RFSSW παρατηρείται ελάχιστη αύξηση της μέγιστης δύναμης με την αύξηση της απόστασης του μηχανισμού από το σημείο έναρξης της αστοχίας της σύνδεσης. Στο πείραμα της θλίψης παρατηρούμε ότι οι μηχανισμοί που βρίσκονταν πιο κοντά στην αρχική αποσύνδεση ήταν και εκείνοι που καθυστέρησαν την αστοχία της διάταξης περισσότερο. Αξιοσημείωτο είναι επίσης ότι η εφαρμογή των μηχανισμών ILSFSR σε μεγαλύτερες αποστάσεις όχι μόνο δεν αύξησαν την απαιτούμενη δύναμη, αλλά οδήγησαν σε χειρότερη απόκριση. Στην περίπτωση των RFSSW αντίστοιχα μπορούμε να παρατηρήσουμε ελάχιστη μείωση στην απαιτούμενη δύναμη όταν η απόσταση του μηχανισμού από την αρχική αποσύνδεση ξεπεράσει τα 50mm. Η καλύτερη τοποθέτηση του μηχανισμού βρέθηκε στα 25mm για διάμετρο 9mm καθώς η συνδυαστική

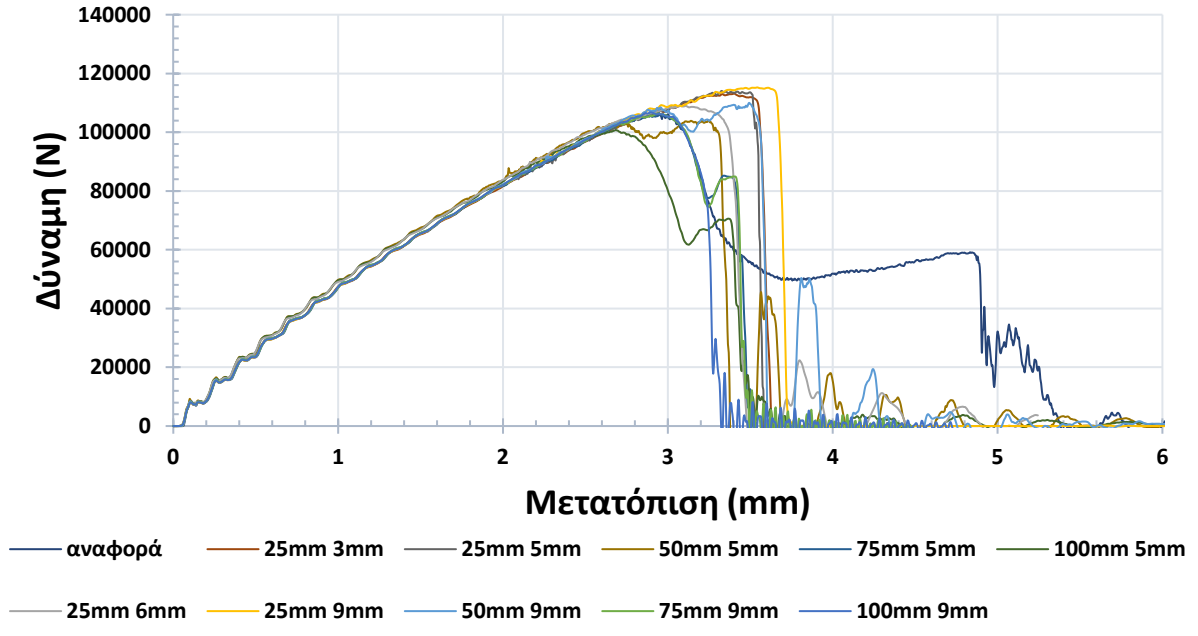
απόκριση του σε εφελκυσμό και θλίψη κρίθηκε καλύτερη. Συγκριτικά με τα μοντέλα αναφοράς, οι βέλτιστες διατάξεις σε κάθε μηχανισμό αύξησαν τη μέγιστη δύναμη όπως φαίνεται στον πίνακα 5.1-1.

| | εφελκυσμός | θλίψη |
|---|---|---|
| ILSFSR: 25mm 5mm | 53.57% | 6.83% |
| RFSSW: 25mm 9mm | 32.69% | 7.95% |

***Πίνακας 5.1-1: Βελτίωση απόκρισης***

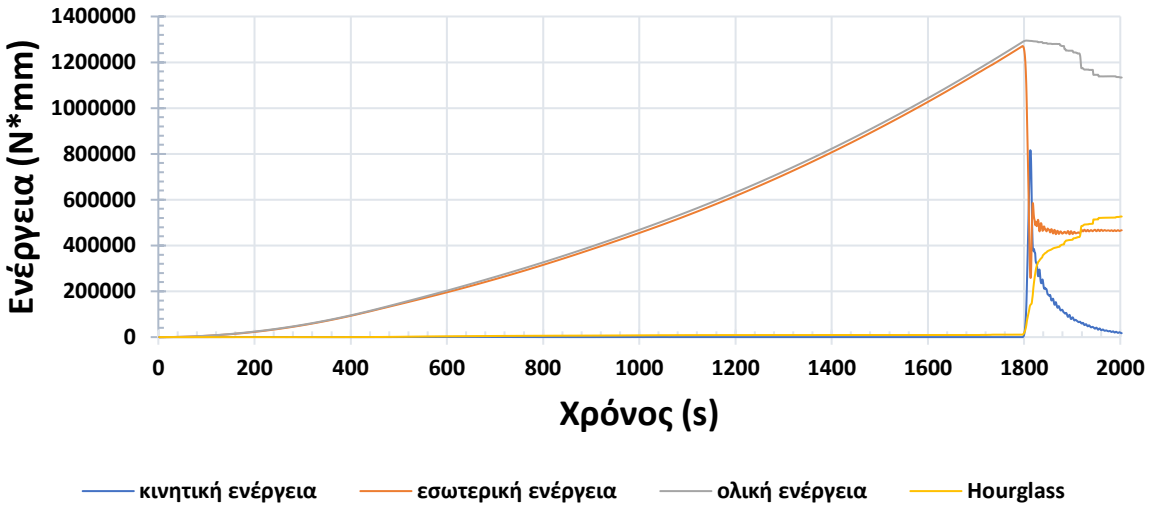



***Εικόνα 5.1-19: Συγκριτικό διάγραμμα ILSFSR-RFSSW σε εφελκυσμό***

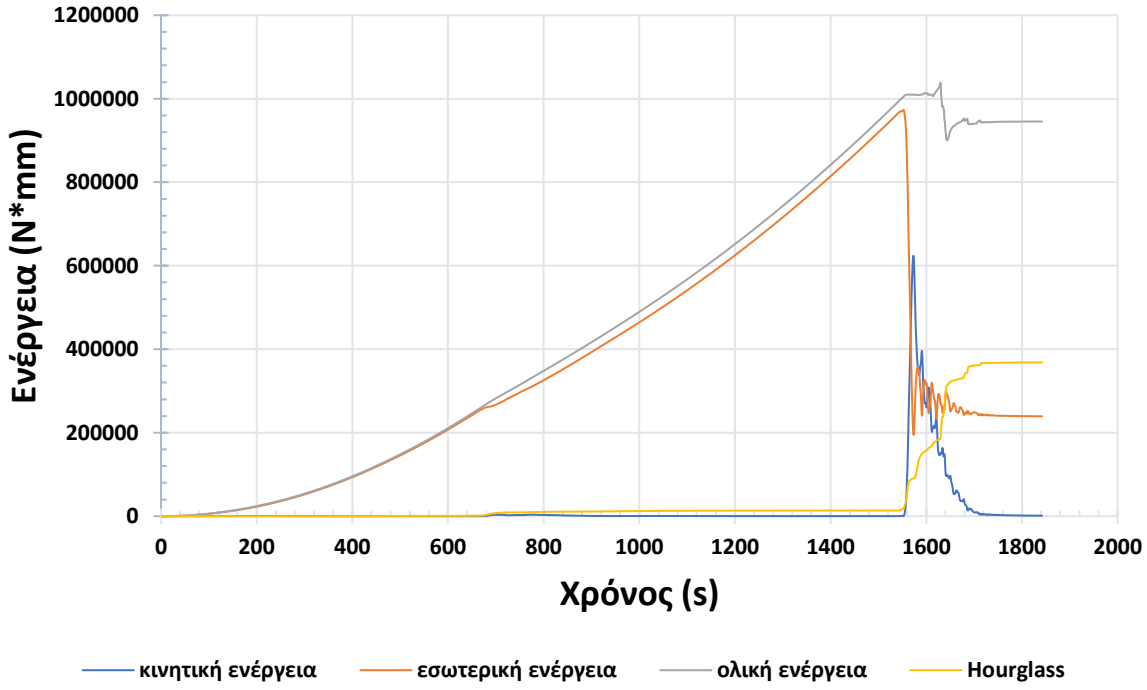



***Εικόνα 5.1-20: Συγκριτικό διάγραμμα ILSFSR-RFSSW σε θλίψη***

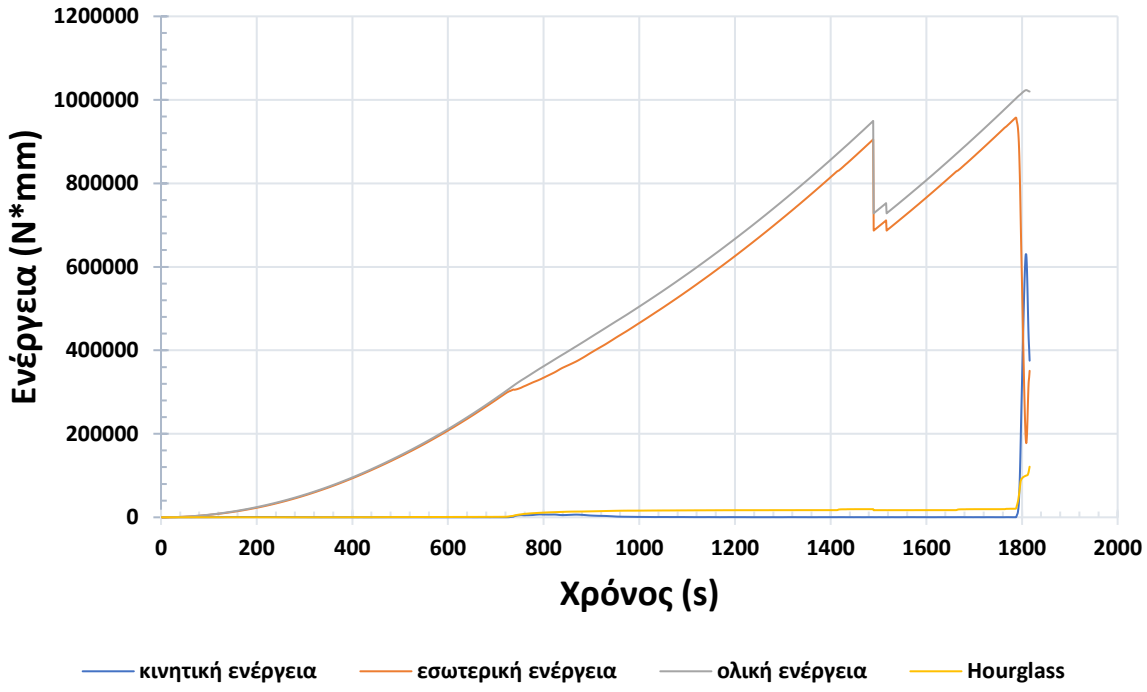
Τέλος για την ευστάθεια των μοντέλων και την προσέγγιση σε μεγαλύτερο βαθμό των συνθηκών κανονικού πειράματος πρέπει να γίνει έλεγχος των διαφόρων ενεργειών του μοντέλου. Το hourglass είναι λειτουργία που δημιουργεί παραμορφώσεις χωρίς τάσεις και χωρίς ενέργεια. Ιδανικά το hourglass πρέπει να έχει τιμή μέχρι 10% της ολικής ενέργειας του μοντέλου αλλιώς επηρεάζεται η ευστάθεια του. Η τιμή του hourglass μας ενδιαφέρει μέχρι και την αστοχία της σύνδεσης. Παρακάτω (σχήμα 5.2-21 – 5.2-30) παρουσιάζονται τα μοντέλα αναφοράς, ILSFSR 3mm και 5mm και RFSSW 6mm και 9mm για απόσταση 25mm από την έναρξη της αποσύνδεσης.



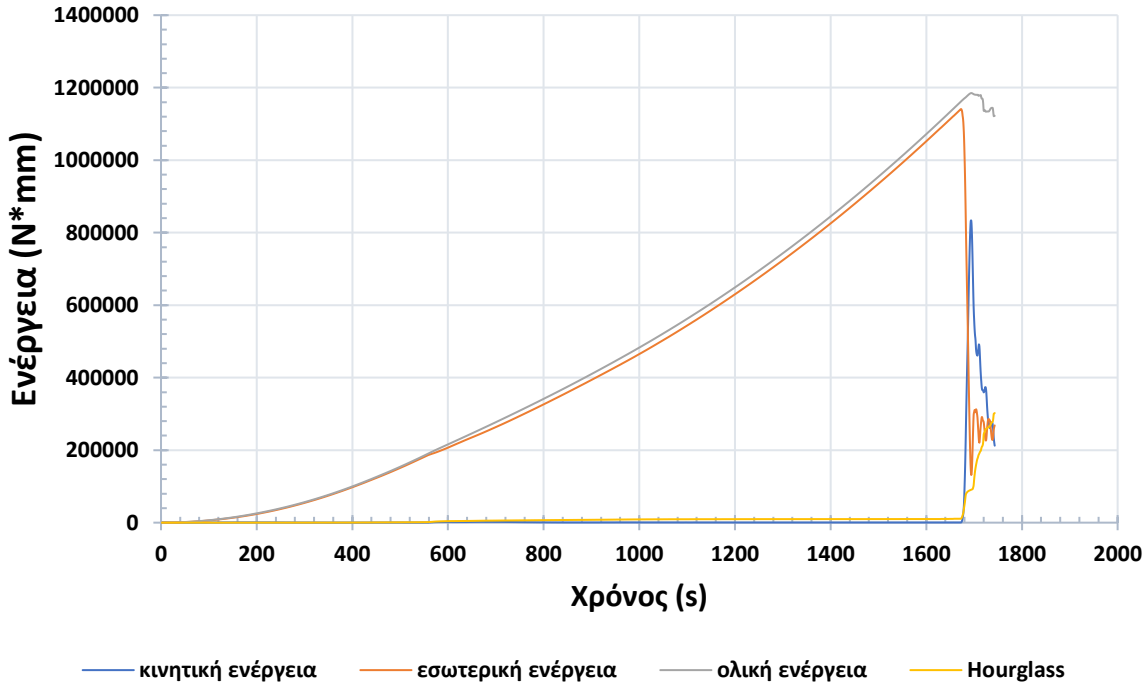

*Σχήμα 5.1-21: Αναφορά σε εφελκυσμό*



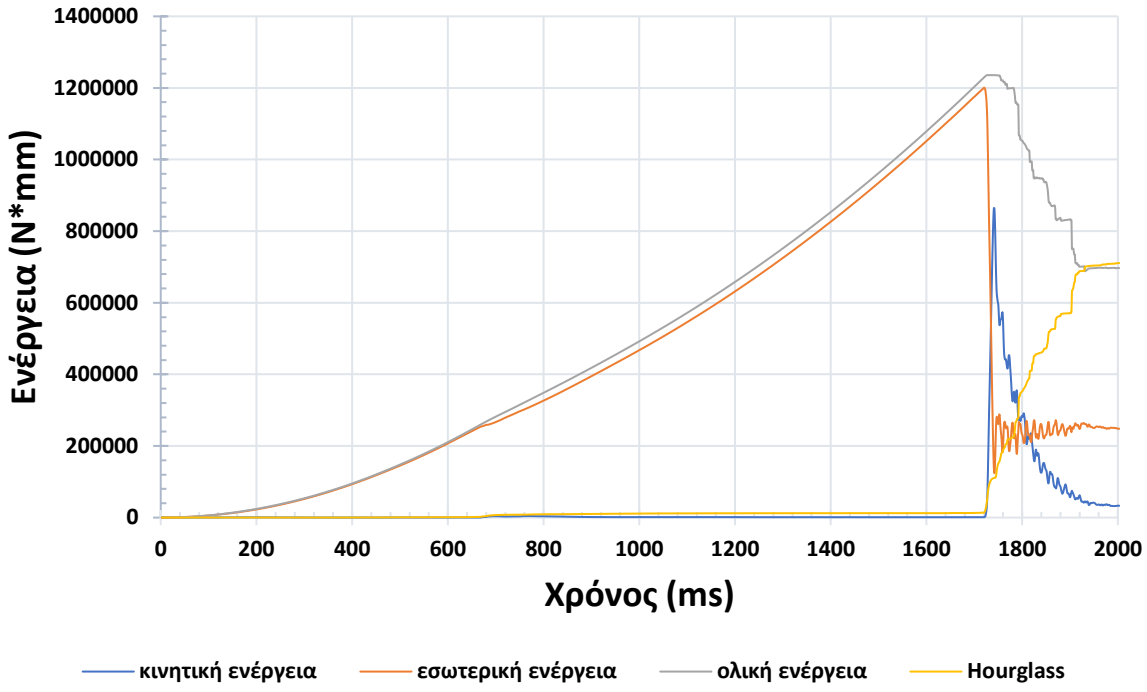

*Σχήμα 5.1-22:ILSFSR 3mm σε εφελκυσμό*



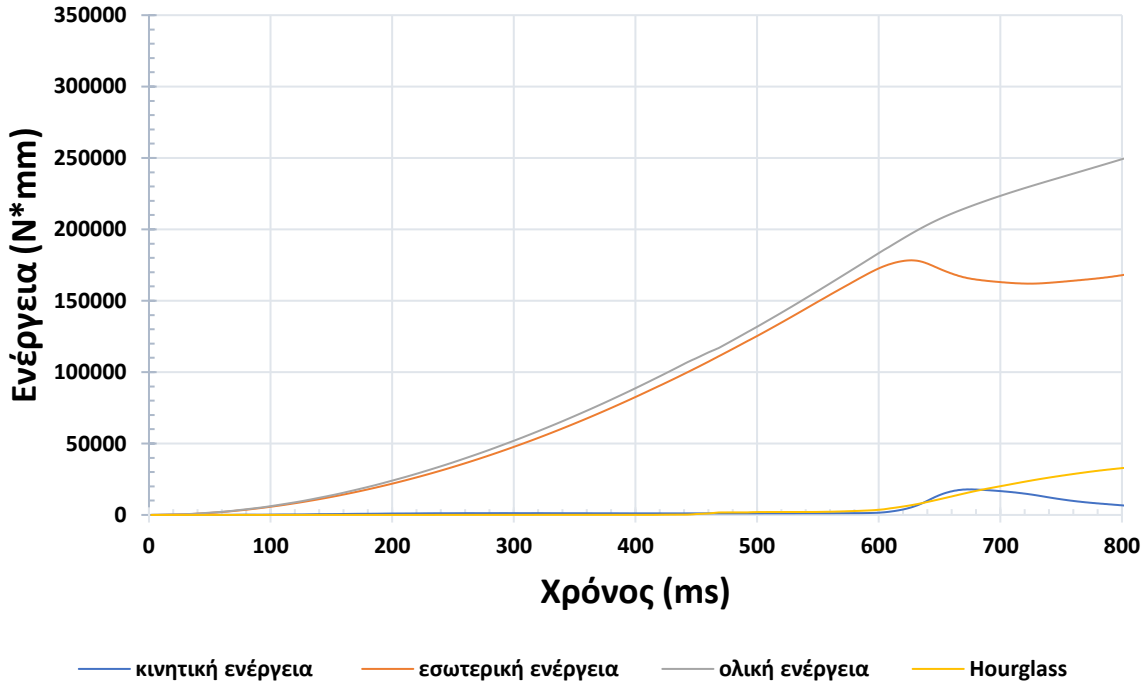

*Σχήμα 5.1-23:ILSFSR 5mm σε εφελκυσμό*



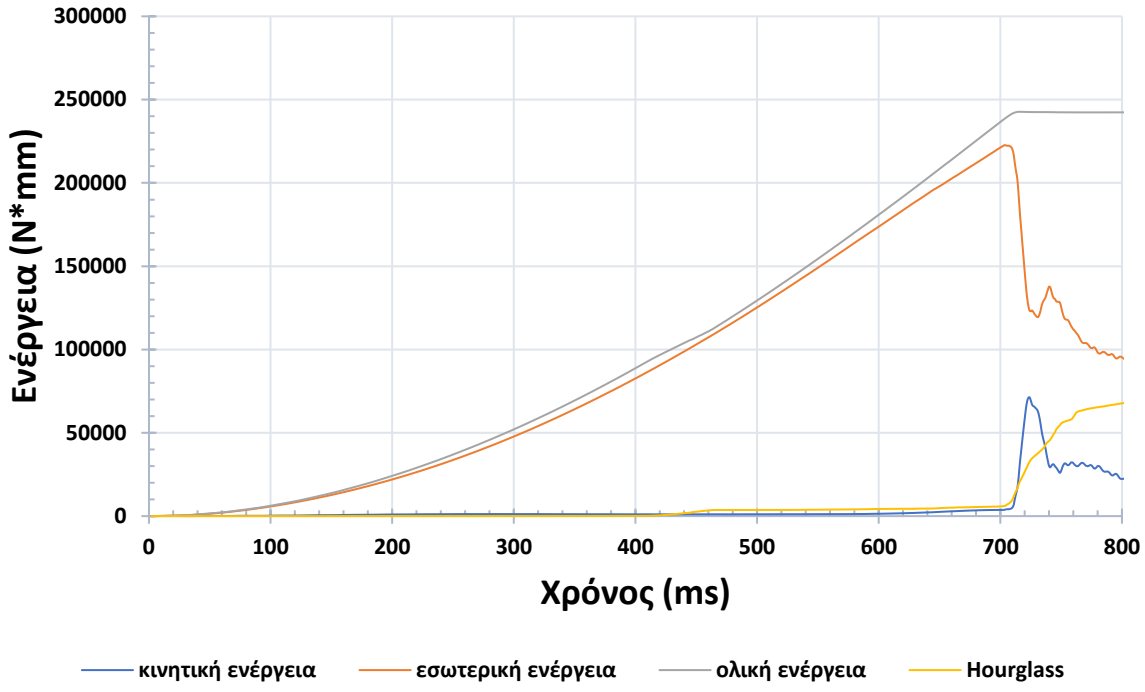

*Σχήμα 5.1-24:RFSSW 6mm σε εφελκυσμό*



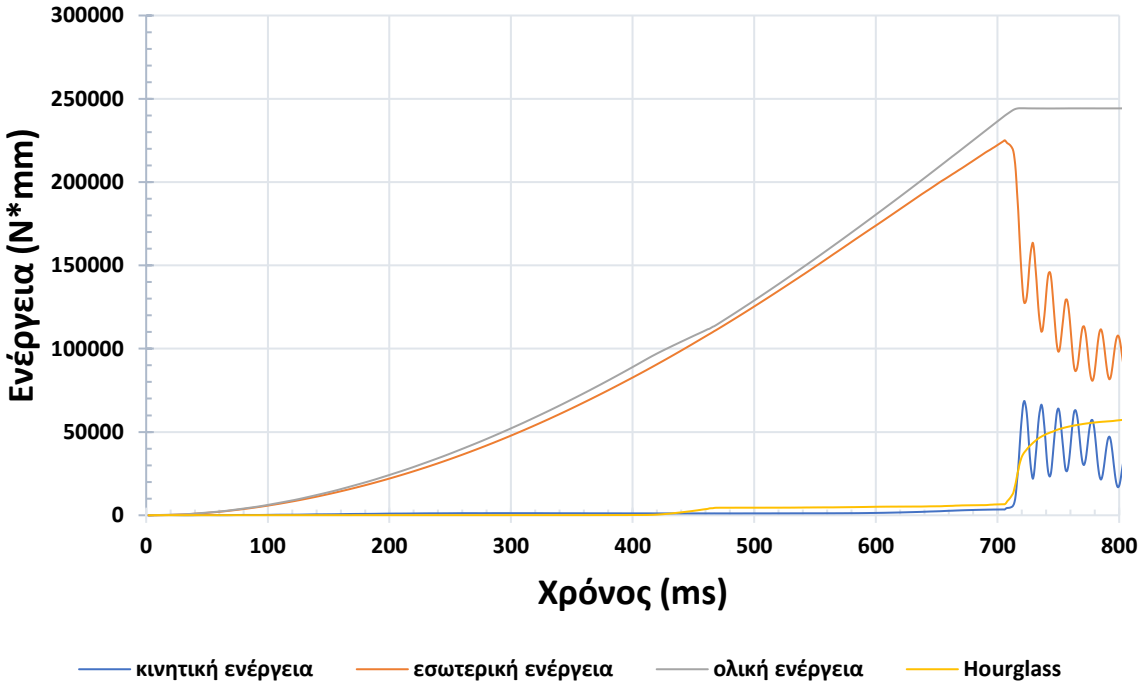

*Σχήμα 5.1-25:RFSSW 9mm σε εφελκυσμό*



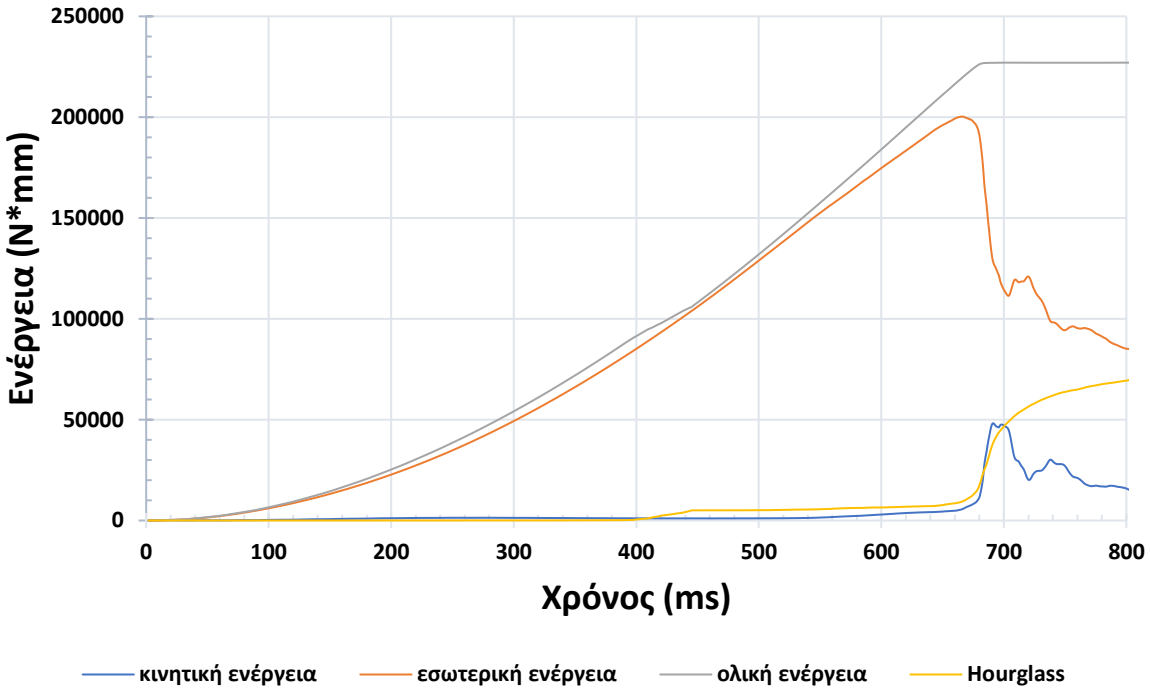

*Σχήμα 5.1-26: Αναφορά σε θλίψη*



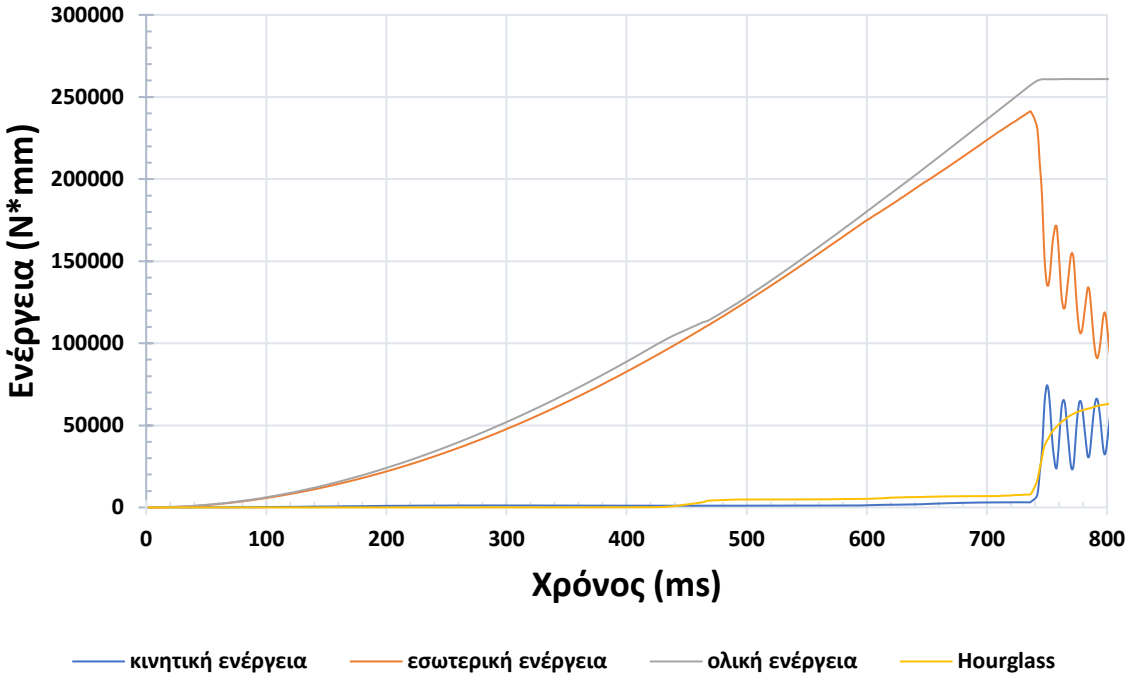

*Σχήμα 5.1-27:ILSFSR 3mm σε θλίψη*




*Σχήμα 5.1-28: ILSFSR 5mm σε θλίψη*




*Σχήμα 5.1-29: RFSSW 6mm θλίψη*




*Σχήμα 5.1-30: RFSSW 9mm θλίψη*

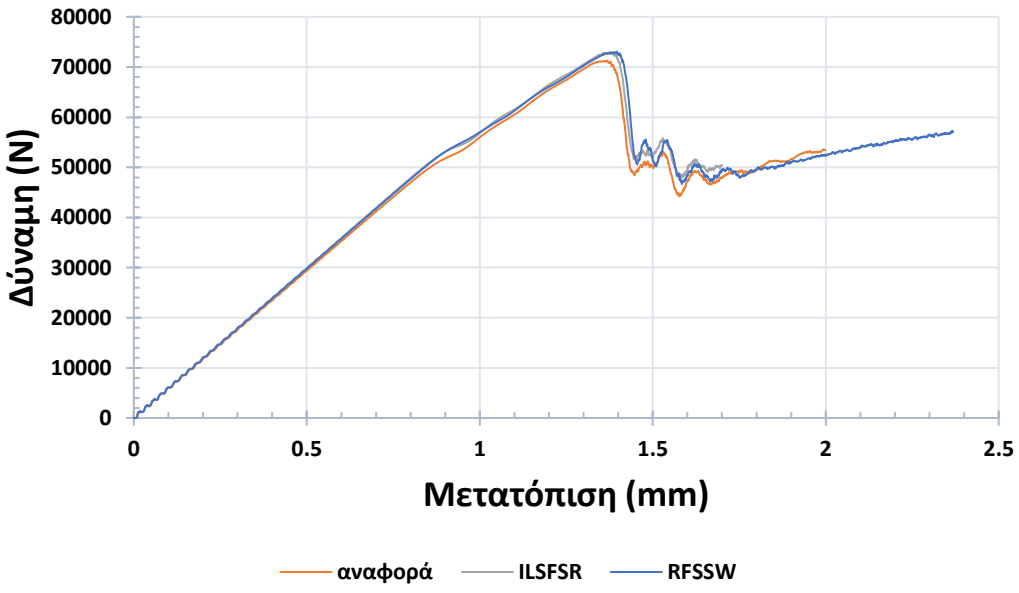
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται όλες οι διατάξεις που προσομοιώθηκαν σε μονοαξονική φόρτιση εφελκυσμού και θλίψης.

| Μηχανισμός | Απόσταση από έναρξη αποσύνδεσης | Διάμετρος μηχανισμού | Πείραμα |
|---|---|---|---|
| ILSFSR | 25mm | 3mm | Εφελκυσμός |
| ILSFSR | 25mm | 3mm | Θλίψη |
| ILSFSR | 25mm | 5mm | Εφελκυσμός |
| ILSFSR | 25mm | 5mm | Θλίψη |
| ILSFSR | 50mm | 5mm | Εφελκυσμός |
| ILSFSR | 50mm | 5mm | Θλίψη |
| ILSFSR | 75mm | 5mm | Εφελκυσμός |
| ILSFSR | 75mm | 5mm | Θλίψη |
| ILSFSR | 100mm | 5mm | Εφελκυσμός |
| ILSFSR | 100mm | 5mm | Θλίψη |
| RFSSW | 25mm | 6mm | Εφελκυσμός |
| RFSSW | 25mm | 6mm | Θλίψη |
| RFSSW | 25mm | 9mm | Εφελκυσμός |
| RFSSW | 25mm | 9mm | Θλίψη |
| RFSSW | 50mm | 9mm | Εφελκυσμός |
| RFSSW | 50mm | 9mm | Θλίψη |
| RFSSW | 75mm | 9mm | Εφελκυσμός |
| RFSSW | 75mm | 9mm | Θλίψη |
| RFSSW | 100mm | 9mm | Εφελκυσμός |
| RFSSW | 100mm | 9mm | Θλίψη |

*Πίνακας 5.1-2: πίνακας μοντέλων προσομοιώσεων*

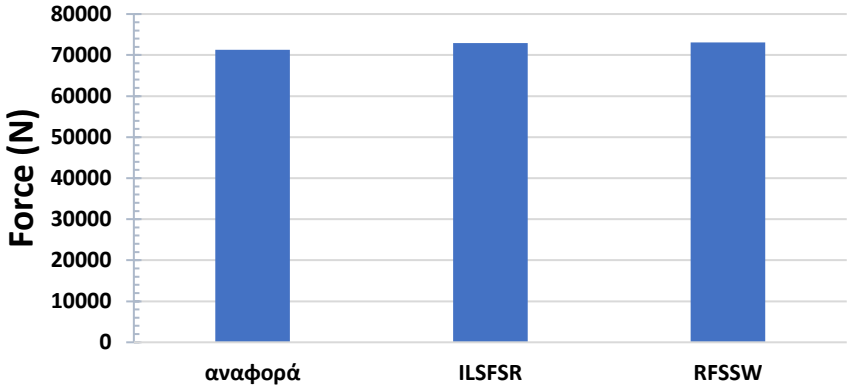
## 5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΕΛΥΦΟΥΣ-ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΥΝΟΧΗΣ-ΔΟΚΙΔΑΣ 500ΜΜ

Για τη διάταξη κελύφους-στοιχείου συνοχής-δοκίδας 500mm, οι προσομοιώσεις πειράματος θλίψης είχαν τα παρακάτω αποτελέσματα:




*Σχήμα 5.2-1: Διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης ILSFSR-RFSSW σε θλίψη*

Οι μηχανισμοί που δημιουργήθηκαν είχαν ως παραμέτρους τις βέλτιστες τιμές που είχαν βρεθεί από τα πειράματα της διάταξης κελύφους-στοιχείων συνοχής-δοκίδας. Ο μηχανισμός ILSFSR δημιουργήθηκε σε απόσταση 25mm με διάμετρο 5mm ενώ για τον RFSSW βέλτιστη διάμετρος θεωρήθηκε εκείνη που παρουσίασε την καλύτερη απόκριση στο πείραμα θλίψης και έτσι δημιουργήθηκε στα 25mm για διάμετρο 9mm. Τα αποτελέσματα έδειξαν ελάχιστη αύξηση της αντοχής της διάταξης της τάξης του 2.5%.




*Σχήμα 5.2-2: Μέγιστες δυνάμεις ILSFSR-RFSSW*

# 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, εξετάστηκαν διατάξεις κελύφους-στοιχείων συνοχής - δοκίδας με μηχανισμούς διακοπής αποσύνδεσης διαφόρων παραμέτρων για την εύρεση των βέλτιστων ανά περίπτωση για την επιβράδυνση του ρυθμού αποσύνδεσης της διάταξης σε εφελκυσμό και θλίψη. Για κάθε μέθοδο, μελετήθηκαν δύο διαφορετικές διάμετροι, 3mm και 5mm για την ILSFSR και 6mm και 9mm για την RFSSW. Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει την αποτελεσματικότητα των μηχανισμών αυτών είναι και το βάθος δημιουργίας τους, παρ' όλα αυτά δεν μελετήθηκε η επίδραση του.

Οι διάμετροι αυτοί εξετάστηκαν για απόσταση 25mm από το άκρο της δοκίδας και επιλέχθηκε η καλύτερη ανά περίπτωση. Στη συνέχεια μελετήθηκαν σε αποστάσεις 50mm, 75mm και 100mm και επιλέχθηκαν οι βέλτιστες παράμετροι ανά μηχανισμό. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για την ILSFSR, η διάταξη που έφερε τις μεγαλύτερες δυνάμεις μέχρι την αστοχία ήταν για διάμετρο 5mm και απόσταση 25mm.

Για την RFSSW, παρατηρήθηκαν καλυτέρα αποτελέσματα για διάμετρο 9mm και απόσταση 25mm. Παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση των δυνάμεων που μπορεί να φέρει η διάταξη με τη δημιουργία των μηχανισμών διακοπής αποσύνδεσης της τάξης του 54% για την ILSFSR και 33% για την RFSSW στο πείραμα του εφελκυσμού. Στα πειράματα θλίψης, η εφαρμογή των μηχανισμών επέφερε μικρότερη αύξηση μέχρι 8%.

Έτσι συμπεραίνεται ότι οι εφαρμογή τέτοιων μηχανισμών μπορούν να επιβραδύνουν σημαντικά την αστοχία της σύνδεσης σε αντίστοιχες διατάξεις σε φόρτιση εφελκυσμού, με μικρότερη αποτελεσματικότητα σε θλίψη.

Αν και δεν υπάρχουν αρκετά πειραματικά δεδομένα για την πλήρη κατανόηση και παραμετροποίηση τέτοιων μηχανισμών, τα αποτελέσματα τέτοιων προσομοιώσεων ωθούν στην περαιτέρω μελέτη τους ακόμα και σε πιο σύνθετες κατασκευές.

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Σπύρος Γ. Παντελάκης και Κωνσταντίνος Ι. Τσερπές, " Μηχανική Συμπεριφορά Υλικών", Εκδόσεις Τζιόλα, 2016.

[2]Γ. Παπανικολάου και Δ. Μουζάκης, "*Σύνθετα Υλικά"*, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2007

[3] V. R. Sastri, "Chapter 3 - Materials Used in Medical Devices," in *Plastics in Medical Devices*, V. R. Sastri, Ed., Boston: William Andrew Publishing, 2010, pp. 21–32. doi: 10.1016/B978-0-8155-2027-6.10003-0.

[4] "Essentra Components ",https://www.essentracomponents.com/en-gb

[5] Macdermott, (1997). Selecting Thermoplastics for Engineering Applications, Second Edition, (2nd ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003067627

[6] M. Sercer and P. Raos, "JOINING OF PLASTICS AND COMPOSITES".

[7] A. A. Pisano and P. Fuschi, "Mechanically fastened joints in composite laminates: Evaluation of load bearing capacity," Compos. Part B Eng., vol. 42, no. 4, pp. 949–961, Jun. 2011, doi: 10.1016/j.compositesb.2010.12.016.

[8] K. D. PATE, "Chapter 25 - Applications of adhesives in aerospace," in Adhesion Science and Engineering, D. A. Dillard, A. V. Pocius, and M. Chaudhury, Eds., Amsterdam: Elsevier Science B.V., 2002, pp. 1129–1192. doi: 10.1016/B978-044451140-9/50025-1.

[9] C. Ageorges and L. Ye, Fusion Bonding of Polymer Composites. in Engineering Materials and Processes. Springer London, 2012. [Online]. Available: https://books.google.gr/books?id=V8zTBwAAQBAJ

[10] C. Ageorges, L. Ye, and M. Hou, "Advances in fusion bonding techniques for joining thermoplastic matrix composites: a review," *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 32, no. 6, pp. 839–857, Jun. 2001, doi: 10.1016/S1359-835X(00)00166-4.

[11] N. S. Taylor, S. B. Jones, and M. Weld, "The feasibility of welding thermoplastic composite materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 3, no. 4, pp. 213–219, Dec. 1989, doi: 10.1016/0950-0618(89)90016-0.

[12] C. Ageorges, L. Ye, and M. Hou, "Advances in fusion bonding techniques for joining thermoplastic matrix composites: a review," Compos. Part Appl. Sci. Manuf., vol. 32, no. 6, pp. 839–857, Jun. 2001, doi: 10.1016/S1359-835X(00)00166-4.

[13] J. Weber and J. Schlimbach, "Co-consolidation of CF/PEEK tape-preforms and CF/PEEK organo sheets to manufacture reinforcements in stamp-forming process," Adv. Manuf. Polym. Compos. Sci., vol. 5, no. 4, pp. 172–183, Oct. 2019, doi: 10.1080/20550340.2019.1673961.

[14] R. Arquier, I. Iliopoulos, G. Régnier, and G. Miquelard-Garnier, "Consolidation of continuous-carbon-fiber-reinforced PAEK composites: a review," Mater. Today Commun., vol. 32, p. 104036, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.mtcomm.2022.104036.

[15] "VICTREX", https://www.victrex.com/

[16] S. J. Findlay and N. D. Harrison, "Why aircraft fail," Mater. Today, vol. 5, no. 11, pp. 18–25, Nov. 2002, doi: 10.1016/S1369-7021(02)01138-0.

[17] G. V. Feldt and S. W. Russell, "Fail-Safe/Safe-Life Interface Criteria".

[18] "HBK", https://www.hbm.com/en/

[19] C. Ribas Matas, S. Pitta, and J. Rojas Gregorio, "Comparison of the response of different rivet layout patterns in aircraft repair patches," 2021.

[20] "GQ Aviation", https://gqaviation.org/home-1

[21] "LibreTexts Engineering", https://eng.libretexts.org/

[22] Sioutis, I.; Tserpes, K. A Literature Review on Crack Arrest Features for Composite Materials and Composite Joints with a Focus on Aerospace Applications. Aerospace 2023, 10, 137. https://doi.org/10.3390/aerospace10020137

[23] I. Sioutis and K. Tserpes, "Quasi-static and fatigue crack growth simulation in co-consolidated thermoplastic joints containing crack arrest features," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 157, p. 107904, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.engfailanal.2023.107904.

[24] "KVE", https://www.kve.nl/

[25] C. Labesh Kumar, V. Jayakumar, and G. Bharathiraja, "Optimization of welding parameters for friction stir spot welding of AA6062 with similar and dissimilar thicknesses," 1st Int. Conf. Manuf. Mater. Sci. Eng., vol. 19, pp. 251–255, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.07.204.

[26] I. Sioutis, K. Tserpes, E. Tsiangou, H. Boutin, F. Allègre, and L. Blaga, "Experimental evaluation of Refill friction Stir spot Welds (RFSSW) as crack arrest features in co-consolidated thermoplastic laminates," Compos. Struct., vol. 309, p. 116754, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.compstruct.2023.116754.

[27] "Hereon", https://www.hereon.de/

[28] Y. Chen, "Refill Friction Stir Spot Welding Of Dissimilar Alloys," 2015. [Online]. Available: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:56327073

[29] Χ. Α. ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ, "Στοιχεία μηχανών", 3η έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2017

[30] N. Pugno, M. Ciavarella, P. Cornetti, and A. Carpinteri, "A generalized Paris' law for fatigue crack growth," J. Mech. Phys. Solids, vol. 54, no. 7, pp. 1333–1349, Jul. 2006, doi: 10.1016/j.jmps.2006.01.007.

[31] Liu, D.; Pons, D.J. Crack Propagation Mechanisms for Creep Fatigue: A Consolidated Explanation of Fundamental Behaviours from Initiation to Failure. Metals 2018, 8, 623. https://doi.org/10.3390/met8080623

[32] A. C. E.-9 on Fatigue, Cyclic Stress-strain and Plastic Deformation Aspects of Fatigue Crack Growth: A Symposium, St. Louis, Mo., 2-8 May 1976. in ASTM special technical publication. ASTM, 1977. [Online]. Available: https://books.google.gr/books?id=H6UQ2t9C4FoC

[33] Khoei, A.R. (2014). Extended Finite Element Formulation. In Extended Finite Element Method, A.R. Khoei (Ed.). https://doi.org/10.1002/9781118869673.ch2

[34] Φλώρος, Ιωάννης. "Αριθμητική Και Πειραματική Διερεύνηση Της Αστοχίας Συνδέσεων Με Κόλλα Σύνθετων Υλικών Με Μηχανισμούς Διακοπής Της Αποκόλλησης Με Έμφαση Στην Προσομοίωση Της Εξέλιξης Της Αποκόλλησης Σε Κόπωση." National Documentation Centre (EKT), n.d. doi:10.12681/eadd/45399.

[35] G. Giuliese, A. Pirondi, and F. Moroni, "A Cohesive Zone Model for Three-dimensional Fatigue Debonding/Delamination," Procedia Mater. Sci., vol. 3, pp. 1473–1478, 2014, doi: https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.06.238.

[36] M. L. Benzeggagh and M. Kenane, "Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 56, no. 4, pp. 439–449, 1996, doi: https://doi.org/10.1016/0266-3538(96)00005-X.

[37] "SOLVAY", https://www.solvay.com/en/

[38] "LS-DYNA", https://lsdyna.ansys.com/

[39] "LS-DYNA Support", https://www.dynasupport.com/