



Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών

Εκτενής Περίληψη Διπλωματικής Εργασίας

**Αριθμητική ανάλυση και βελτιστοποίηση στοιχείων διακοπής της
αποσύνδεσης σε συμπολυμερισμένα θερμοπλαστικά σύνθετα
υλικά**

Γύφτος Παναγιώτης

Επιβλέπων

Κωνσταντίνος Τσερπές, Αναπληρωτής Καθηγητής



Εργαστήριο Τεχνολογίας & Αντοχής Υλικών

ΠΑΤΡΑ 2023

Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών

Παναγιώτης Γύφτος

© 2023 – Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος



Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε
από τον

Γύφτο Παναγιώτη
1062678

Ιανουάριος 2023



Εργαστήριο Τεχνολογίας & Αντοχής Υλικών

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	Εισαγωγή.....	1
1.1	Πίνακας επεξηγήσεων ορολογίας.....	1
1.2	Σύνθετα υλικά.....	1
1.2.1	Διαφορές μεταξύ θερμοπλαστικών και θερμοσκληρυνόμενων υλικών	1
1.3	Είδη συνδέσεων σε θερμοπλαστικά σύνθετα υλικά	2
1.3.1	Συμπολυμερισμός	2
1.4	Μηχανισμοί διακοπής της αποσύνδεσης.....	2
1.4.1	Κατεργασία σημειακής συγκόλλησης δια τριβής και επαναπλήρωσης.....	3
1.5	Αντικείμενο της εργασίας.....	3
2	Θεωρία.....	4
2.1	Θραυστομηχανικός χαρακτηρισμός συνδέσεων συνθέτων υλικών	4
2.1.1	Δοκίμια διάτμησης σε σύνδεση ενός στρώματος (SLS).....	5
2.1.2	Δοκίμια διάτμησης άνισου μήκους πλακών (CLS)	5
2.1.3	Δοκίμια κάμψης τριών σημείων με αρχική ρωγμή (ENF).....	5
2.1.4	Διάδοση ρωγμών σε δοκίμια CLS και ENF.....	6
2.2	Χαρακτηρισμός θραυστομηχανικής αντοχής κάνοντας χρήση της μεθόδου μοντέλου ζώνης συνοχής	7
3	Μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων	7
3.1	Ιδιότητες διακριτοποίησης	7
3.1.1	Σχεδιασμός μοντέλων δοκιμίων.....	8
4	Αποτελέσματα.....	10
4.1	Αποτελέσματα και σύγκριση διαφορετικών τρόπων σύνδεσης σε δοκίμια SLS	10
4.2	Βελτιστοποίηση της μεθόδου συγκόλλησης RFSSW ως μηχανισμός διακοπής της αποσύνδεσης μέσω παραμετρικής ανάλυσης σε CLS και ENF δοκίμια.....	11
5	Συμπεράσματα.....	15
6	Προτάσεις για μελλοντική μελέτη	15

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΠΕΞΗΓΗΣΕΩΝ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

Πίνακας επεξηγήσεων ορολογίας	
Long fiber composite materials	Μακρόινα σύνθετα υλικά
Short fiber composite materials	Κοντόινα σύνθετα υλικά
Thermoplastic materials	Θερμοπλαστικά υλικά
Mechanical fastening	Μηχανική σύνδεση
Adhesive bonding	Σύνδεση με κόλλα
Delamination	Διαστρωματική αποκόλληση
Co-consolidation	Συμπολυμερισμός
Bondline	Γραμμή σύνδεσης με κόλληση
Disbond arrest feature	Μηχανισμός διακοπής αποσύνδεσης
Refill friction stir spot welding	Σημειακή συγκόλληση δια τριβής και επαναπλήρωσης
Finite element method	Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων
SLS	Δοκίμιο διάτμησης σε σύνδεση ενός στρώματος
CLS	Δοκίμιο διάτμησης άνισου μήκους πλακών
ENF	Δοκίμιο κάμψης τριών σημείων με αρχική ρωγμή
Fracture mechanics	Θραυστομηχανική
Cohesive zone model	Μοντέλο ζώνης συνοχής
Discretization	Διακριτοποίηση

1.2 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Η ανάγκη για πιο αποδοτικές κατασκευές και μηχανισμούς αυξάνεται διαρκώς, οδηγώντας στην αύξηση των απαιτήσεων για υλικά υψηλών επιδόσεων με υψηλό λόγο αντοχής προς βάρος. Τα υλικά τα οποία πληρούν αυτές τις προϋποθέσεις και κατέχουν αυτά τα χαρακτηριστικά είναι τα μηχανολογικά σύνθετα υλικά. Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από δύο τουλάχιστον συνιστώσες, οι οποίες είναι διακριτές σε μικροσκοπικό και μακροσκοπικό επίπεδο. Το αποτέλεσμα είναι ένα υλικό με ιδιότητες ανάμεσα σε αυτές των συνιστωσών του. Τα υλικά αυτά αποτελούνται από μία συνεχή φάση η οποία αποκαλείται μήτρα και μία ή περισσότερες φάσεις μη συνεχείς, τις ενισχύσεις. Στα ινώδη σύνθετα υλικά ο βασικός ρόλος της μήτρας είναι να έχει επαρκή πρόσφυση με τις ίνες στις οποίες μεταφέρει τα φορτία, και να τις προστατεύει από την φθορά και την κακουχία. Ο ρόλος των ινών είναι να φέρουν τα φορτία της κατασκευής, αφού έχουν αντοχή πολύ υψηλότερη της μήτρας.

1.2.1 Διαφορές μεταξύ θερμοπλαστικών και θερμοσκληρυνόμενων υλικών

Τα δύο κύρια είδη οργανικών σύνθετων υλικών είναι θερμοπλαστικών και θερμοσκληρυνόμενων μητρών. Η κύρια διαφορά πηγάζει από την μοριακή τους δομή, η οποία στις πρώτες είναι ενδομοριακοί δεσμοί Van der Waals μονομερών, ενώ στις δεύτερες είναι

ισχυροί χημικοί δεσμοί μονομερών οι οποίοι δημιουργούν τα μακρομόρια. Λόγω αυτής της διαφοράς, τα θερμοπλαστικά υλικά υπό υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις τήκονται και μπορούν να επαναμορφοποιηθούν, ενώ τα θερμοσκληρυνόμενα αποσυντίθενται.

1.3 ΕΙΔΗ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΣΕ ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Δύο συνήθη είδη σύνδεσης θερμοπλαστικών συνθέτων υλικών είναι οι μηχανικές συνδέσεις και η χρήση κόλλας. Οι πρώτες εγκυμονούν τον κίνδυνο διαστρωματικών αποκολλήσεων κατά την διάτρηση του υλικού και τις υψηλές συγκεντρώσεις τάσεων που αναπτύσσονται γύρω από την σύνδεση καθώς και προσθήκη βάρους σε υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως σε ελαφρές κατασκευές, ενώ η δεύτερη απαιτεί κατάλληλη κατεργασία των επιφανειών του υλικού αυξάνοντας τον χρόνο κατασκευής. Ένα τρίτο είδος σύνδεσης είναι η συνένωση των μερών κατά την κατασκευή τους ή και σε ύστερο χρόνο, η οποία στα θερμοπλαστικά σύνθετα υλικά επιτυγχάνεται μέσω του συμπολυμερισμού. Ο συμπολυμερισμός, η αστοχία του και τρόποι επιβράδυνσης αυτής, θα μελετηθούν ενδελεχώς στην παρούσα διπλωματική εργασία. Ο συμπολυμερισμός επιτρέπει αξιόπιστη συνένωση κατά την διάρκεια της κατασκευής του υλικού χωρίς να απαιτείται η χρήση άλλων υλικών ή περιττή κατεργασία του υλικού.

1.3.1 Συμπολυμερισμός

Στην παρούσα εργασία τα δοκίμια ήταν συμπολυμερισμένα. Τα δοκίμια θερμαίνονται μέχρι οι επιφάνειες που θα έρθουν σε επαφή για την σύνδεση να μεταβούν σε ιξώδη κατάσταση. Με την επαφή των επιφανειών οι αλυσίδες μακρομορίων του υλικού της μίας επιφάνειας διαχέονται στην άλλη και τα μέρη συνενώνονται με την ψύξη τους. Αυτό το είδος σύνδεσης δεν απαιτεί προσθήκη άλλων μερών και έχει αντοχή παρόμοια αυτής των μερών της σύνδεσης. Το αποτέλεσμα είναι μία σύνδεση με υψηλό λόγο αντοχής προς βάρος, ιδανική για αεροναυπηγικές κατασκευές. Το μειονέκτημα είναι η απαίτηση εξοπλισμού ικανού για θέρμανση ολοκληρωτων των συνδεόμενων μερών και ταυτόχρονης άσκησης πίεσης σε αυτά για την επίτευξη καλής συνένωσης.

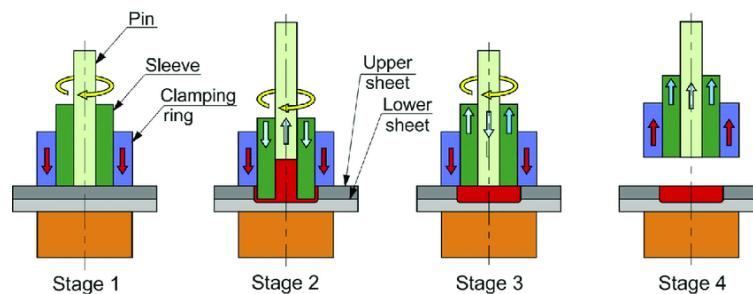
1.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΙΑΚΟΠΗΣ ΤΗΣ ΑΠΟΣΥΝΔΕΣΗΣ

Οι συνδέσεις αποτελούν κρίσιμα σημεία μίας κατασκευής όσον αφορά την λειτουργικότητα και την ασφάλειά της. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται σε συνδέσεις συγκόλλησης και κόλλας, διότι αστοχία τέτοιων συνδέσεων μπορεί να αποβεί μοιραία. Για την αποφυγή ατυχημάτων, οργανισμοί όπως ο Οργανισμός Ασφάλειας της Αεροπορίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης (European Union Aviation Safety Agency, EASA), καθώς και η Ομοσπονδιακή Αρχή Αεροπορίας (Federal Aviation Administration, FAA) στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, θέτουν κανονισμούς, οι οποίοι καθιστούν υποχρεωτική την χρήση μηχανισμών για την αποφυγή ολοκληρωτικής αστοχίας των συνδέσεων αυτών υπό την μορφή μηχανισμών διακοπής της αποσύνδεσης, οι οποίοι τοποθετούνται στο επίπεδο της σύνδεσης. Έρευνες οι

οποίες έχουν προηγηθεί στο αντικείμενο αυτό περιλαμβάνουν τις μελέτες των I. Φλώρος και K. Τσερπές με την μορφή αριθμητικών αναλύσεων στην διάδοση αποσύνδεσης κάνοντας χρήση της μεθόδου μοντέλου ζώνης συνοχής, των Anil R. Ravindran, Raj B. Ladani, Chun H. Wang, and Adrian P. Mouritz με την μορφή πύρων-z σε συνδέσεις πολλαπλών στρώσεων, των R. Sachse, A.K. Pickett and P. Middendorf κάνοντας χρήση κοχλίων σε συμπολυμερισμένα θερμοπλαστικά υλικά με ενίσχυση ινών άνθρακα και των Dirk Holzhüter, Thomas. Löbel, Christian Hühne and Martin Schollerer στην χρήση υβριδικών γραμμών σύνδεσης.

1.4.1 Κατεργασία σημειακής συγκόλλησης δια τριβής και επαναπλήρωσης

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ως μηχανισμός διακοπής αποσύνδεσης στην παρούσα διπλωματική εργασία ήταν η τοπική τήξη συμπολυμερισμένων πλακών κάνοντας χρήση της κατεργασίας σημειακής συγκόλλησης δια τριβής και επαναπλήρωσης (Refill Friction Stir Spot Welding, RFSSW), για την εξέταση των επιπτώσεων της στην διάδοση ρωγμών. Πρόκειται για μια κατεργασία η οποία βρίσκει χρήση σε μέταλλα και θερμοπλαστικά υλικά. Στα μακρόνια σύνθετα υλικά η διαδικασία της κατεργασίας τροποποιεί την μορφολογία τους τοπικά σε κοντόνια. Τα μέρη του εξοπλισμού που την εκτελούν καθώς και τα στάδια της φαίνονται στο Σχήμα 1.1



Σχήμα 1.1: Στάδια κατεργασίας σημειακής συγκόλλησης δια τριβής και επαναπλήρωσης

1.5 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στην παρούσα εργασία έγινε χρήση πακέτου πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι ένα πανίσχυρο εργαλείο το επιτρέπει την αριθμητική επίλυση πληθώρας προβλημάτων μηχανικών. Το εύρος των δυνατοτήτων της εκτείνεται από τον υπολογισμό παραμορφώσεων και τάσεων κατασκευών, επίλυση προβλημάτων μεταφοράς θερμότητας και ρευστομηχανικής και ακόμα περισσότερα. Σύνθετα προβλήματα τα οποία θα απαιτούσαν δαπανηρές λύσεις υπό άλλες συνθήκες, μπορούν να μοντελοποιηθούν γρήγορα με ακριβή αποτελέσματα. Το πακέτο πεπερασμένων στοιχείων που θα χρησιμοποιηθεί στην εργασία αυτή είναι το LS-DYNA σε συνδυασμό με τον γραφικό επεξεργαστή LS-PrePost. Κάνοντας χρήση αυτών, θα γίνει επίλυση τεσσάρων μοντέλων δοκιμών διάτμησης σε σύνδεση ενός στρώματος (Single Lap Shear, SLS) για την επίδειξη της κατεργασίας RFSSW:

- Ένα δοκίμιο SLS συνδεδεμένο με χρήση κόλλας

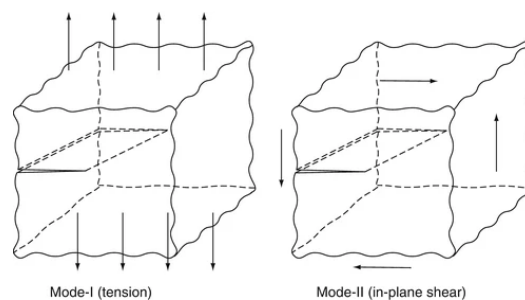
- Ένα δοκίμιο SLS συνδεδεμένο με μηχανική σύνδεση κάνοντας χρήση κοχλία και περικοχλίου M6
- Ένα δοκίμιο SLS που διαθέτει κατεργασία RFSSW 6 mm
- Ένα δοκίμιο SLS που διαθέτει κατεργασία RFSSW 9 mm

Το δεύτερο μέρος της εργασίας περιλαμβάνει την παραμετρική βελτιστοποίηση της κατεργασίας RFSSW ως μηχανισμός διακοπής της αποσύνδεσης σε συμπολυμερισμένα δοκίμια διάτμησης άνισου μήκους πλακών (Cracked Lap Shear, CLS) και δοκίμια κάμψης τριών σημείων με αρχική ρωγμή (End Notched Flexure, ENF) από θερμοπλαστικά σύνθετα υλικά. Οι παράμετροι οι οποίοι εξετάστηκαν ήταν το βάθος του μηχανισμού αποσύνδεσης, η διάμετρός του και στα δοκίμια CLS και η απόσταση του μηχανισμού αποσύνδεσης από το αρχικό μέτωπο της ρωγμής.

2 ΘΕΩΡΙΑ

2.1 ΘΡΑΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η μοντελοποίηση της σύνδεσης συμπολυμερισμένων ή συγκολλημένων πλακών απαιτεί δεδομένα περί των χαρακτηριστικών της σύνδεσης καθώς και της ενέργειας που εκλύεται όσο αστοχεί. Αυτά τα δεδομένα αποκτώνται μόνο μέσω πειραμάτων, στα οποία δοκίμια υπόκεινται σε συγκεκριμένα είδη φόρτισης όσο παρακολουθείται η συμπεριφορά τους. Αυτά τα είδη φόρτισης αναφέρονται στον τύπο φόρτισης I (Mode I), τύπο φόρτισης II (Mode II) και τύπο φόρτισης III (Mode III). Οι πρώτοι δύο τύποι καθώς και ο συνδυασμός τους, μεικτός τύπος I+II (Mixed Mode I+II), είναι ιδιαίτερα σημαντικοί για τον χαρακτηρισμό αυτών των προαναφερθέντων συνδέσεων σε σύνθετα υλικά. Οι τύποι I και II φαίνονται στο Σχήμα 2.1:

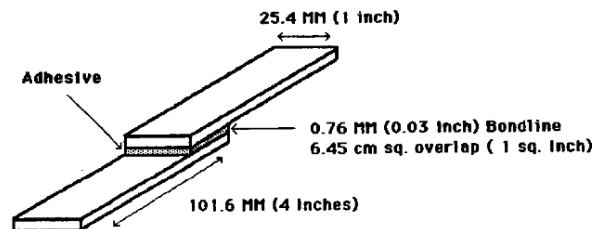


Σχήμα 2.1: Συνθήκες φόρτισης τύπου I και II

Κάθε τύπος φόρτισης εξετάζεται με συγκεκριμένα δοκίμια και δοκιμές. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα εξεταστούν δοκίμια SLS και CLS τα υπόκεινται σε μεικτό τύπο φόρτισης και δοκίμια ENF το οποία υπόκεινται σε τύπο φόρτισης II.

2.1.1 Δοκίμια διάτμησης σε σύνδεση ενός στρώματος (SLS)

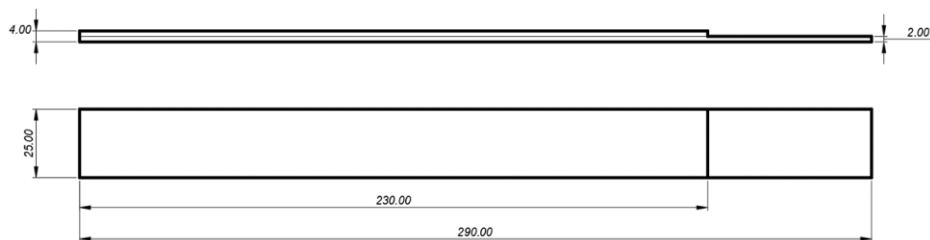
Τα δοκίμια διάτμησης σε σύνδεση ενός στρώματος χρησιμοποιούνται ευρέως για την εξαγωγή δεδομένων σε συνδέσεις κόλλας. Τα SLS δοκίμια που εξετάστηκαν σε αυτήν την εργασία είναι βάσει του προτύπου ASTM D5868.



Σχήμα 2.2: Διαστάσεις δοκιμίου SLS σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D5868

2.1.2 Δοκίμια διάτμησης άνισου μήκους πλακών (CLS)

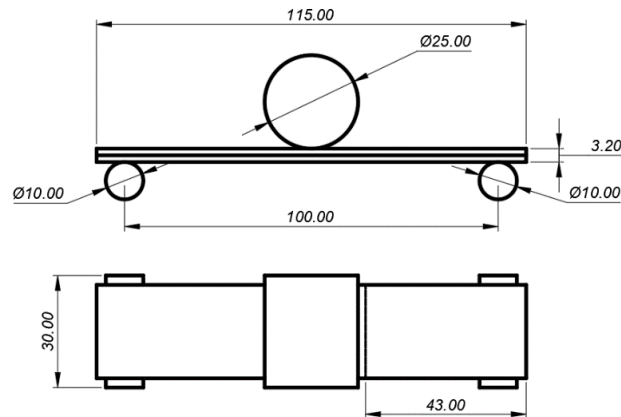
Τα δοκίμια CLS χρησιμοποιούνται κυρίως για τον χαρακτηρισμό της αντοχής σε θραύση και για την θραυστομηχανική συμπεριφορά συνδέσμων κόλλας ή συμπολυμερισμένων συνδέσμων. Τα δοκίμια που εξετάστηκαν δεν ήταν τυποποιημένα και οι διαστάσεις τους φαίνονται στο Σχήμα 2.3:



Σχήμα 2.3: Διαστάσεις δοκιμίου CLS

2.1.3 Δοκίμια κάμψης τριών σημείων με αρχική ρωγμή (ENF)

Τα δοκίμια ENF αποτελούν τα κατ' εξοχήν δοκίμια για το θραυστομηχανικό χαρακτηρισμό δοκιμίων συνθέτων υλικών σε φόρτιση τύπου II. Τα δοκίμια που εξετάστηκαν ήταν βασισμένα στο πρότυπο AITM 1.0006 και οι διαστάσεις αυτών ακολουθούν στο Σχήμα 2.4 παρακάτω:



Σχήμα 2.4: Διαστάσεις δοκιμίου ENF

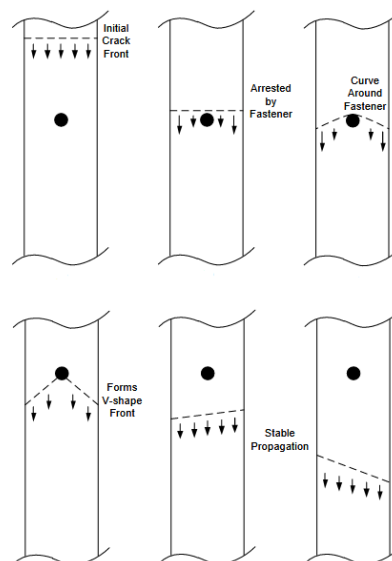
2.1.4 Διάδοση ρωγμών σε δοκίμια CLS και ENF

- Δοκίμια CLS

Αρχικά η διάδοση της ρωγμής είναι ασταθής πριν την σύλληψή της από τον μηχανισμό διακοπής αποσύνδεσης. Η διάδοσης της ρωγμής επιβραδύνει μόλις φτάσει τον μηχανισμό. Κατά την διάρκεια αυτής της φάσης το φορτίο πρέπει να αυξηθεί σημαντικά για να συνεχίσει να διαδίδεται η ρωγμή. Ο ρυθμός διάδοσης της ρωγμής είναι χαμηλός και συνεχίζει με αυτόν τον τρόπο μέχρι η ρωγμή να προσπεράσει τον μηχανισμό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5

- Δοκίμια ENF

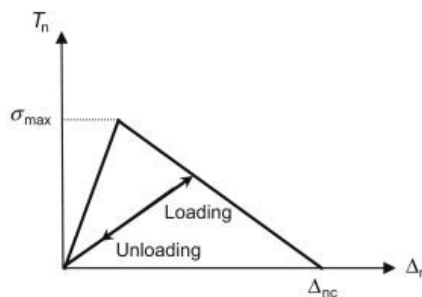
Οι μηχανισμοί διακοπής αποσύνδεσης σε ENF δοκίμια επιβραδύνουν την διάδοση της ρωγμής παραλαμβάνοντας μέρος του φορτίου, ενισχύοντας την σύνδεση.



Σχήμα 2.5: Φάσεις διάδοσης ρωγμής

2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΘΡΑΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΑΝΟΝΤΑΣ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΖΩΝΗΣ ΣΥΝΟΧΗΣ

Η μέθοδος μοντέλου ζώνης συνοχής (Cohesive Zone Model, CZM) χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της διάδοσης της ρωγμής και έχει αντικαταστήσει σε μεγάλο βαθμό την τεχνική VCCT, η οποία έχει εγγενή μειονεκτήματα. Σύμφωνα με την μέθοδο CZM, στο χείλος της ρωγμής υπάρχει μία ζώνη η οποία υπακούει σε έναν νόμο έλξης-διαχωρισμού (traction-separation), βάσει του οποίου τάσεις συνοχής σε εφελκυσμό και σε διάτμηση είναι συνάρτηση της μετατόπισης στον εφελκυσμό και στην διάτμηση. Οι ζώνες μοντελοποιούνται ως στοιχεία συνοχής με μηδενικό όγκο τα οποία διαγράφονται καθώς η ρωγμή διαδίδεται. Στην παρούσα εργασία η μέθοδος βασίζεται στον διγραμμικό νόμο έλξης-διαχωρισμού, ο οποίος φαίνεται στο Σχήμα 2.6. Δεξιά της κορυφής, η αντοχή των στοιχείων υποβαθμίζεται όσο συσσωρεύουν βλάβη μέχρι την τελική τους αστοχία, ενώ στα αριστερά τα στοιχεία συμπεριφέρονται ελαστικά.



Σχήμα 2.6: Καμπύλη διγραμμικού νόμου έλξης-διαχωρισμού

3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

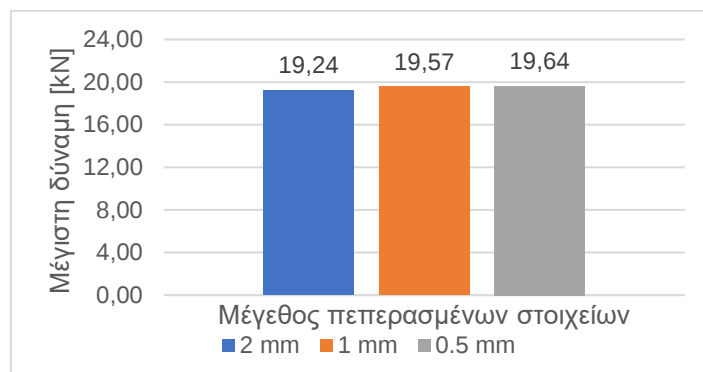
3.1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Διακριτοποίηση των πλακών συνθέτου υλικού καθώς και του κοχλίου έγινε κάνοντας χρήση οκτάκομβων πεπερασμένων στοιχείων ενός σημείου ολοκλήρωσης (SECTION_SOLID, ELFORM=1). Η σύνδεση με κόλλα και η σύνδεση συμπολυμερισμού διακριτοποιήθηκαν με στοιχεία συνοχής τεσσάρων σημείων (SECTION_SOLID, ELFORM=19). Στα μοντέλα ENF οι κύλινδροι στήριξης και φόρτισης μοντελοποιήθηκαν με τετράκομβα στοιχεία κελύφους με δύο σημεία ολοκλήρωσης (SECTION_SHELL, ELFORM=2). Οι συμπολυμερισμένες πλάκες αποτελούνταν από προ εμποτισμένα πανιά TORAY CETEX LM_PAEK TC1225, το οποίο υλικό μοντελοποιήθηκε με το μοντέλο ορθότροπου ελαστικού υλικού MAT_002 για την παραμετρική ανάλυση και ορθότροπου υλικού με μοντελοποίηση βλάβης MAT_054/055 για τα δοκίμια SLS. Η σύνδεση με μίξη κόλλας 80% LOCTITE EA 9395 και 20% LOCTITE EA 9396 και η σύνδεση συμπολυμερισμού επιτεύχθηκε με χρήση του μοντέλου υλικού συνεκτικής ζώνης MAT_138. Ο κοχλίας μοντελοποιήθηκε ως ισότροπο ελαστικό υλικό μέσω του

μοντέλου υλικού MAT_001 και η κατεργασία RFSSW μέσω του μοντέλου υλικού μικρομηχανικών ιδιοτήτων MAT_215.

3.1.1 Σχεδιασμός μοντέλων δοκιμών

Πραγματοποιήθηκε μελέτη ευαισθησίας διακριτοποίησης για τα μοντέλα. Τα μεγέθη πεπερασμένων στοιχείων που ελέγχθηκαν ήταν 2 mm, 1 mm και 0.5 mm. Από το γράφημα μπορεί να παρατηρηθεί ότι η διαφορά στα αποτελέσματα ήταν αμελητέα. Η αύξηση, όμως, στον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο ήταν αντιστρόφως ανάλογη της μεταβολής των διαστάσεων των πεπερασμένων στοιχείων. Επομένως χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός των τριών μεγεθών, με τις περιοχές ενδιαφέροντος να διαθέτουν πιο πυκνή διακριτοποίηση.

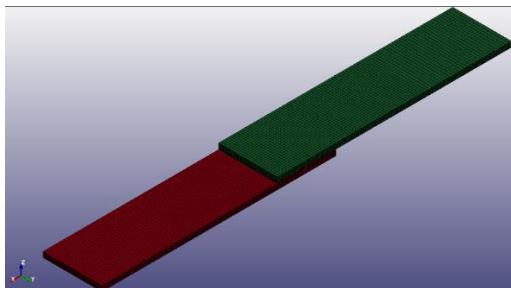


Σχήμα 3.1: Μελέτη ευαισθησίας διακριτοποίησης

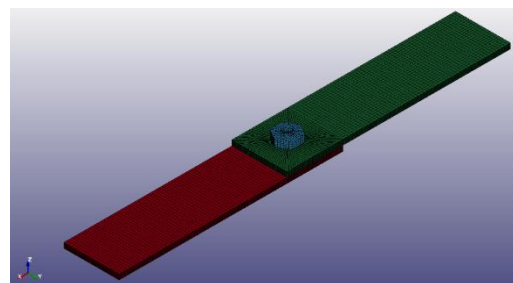
3.1.1.1 Δοκίμια διάτμησης σε σύνδεση ενός στρώματος

Τα δοκίμια SLS διέθεταν προσανατολισμό ινών [0/-45/45/90/45/-45]_s. Παρακάτω ακολουθούν τα μοντέλα τα οποία εξετάστηκαν:

- Δοκίμιο SLS συνδεδεμένο με κόλλα (Σχήμα 3.2) και δοκίμιο SLS κοχλιωτής σύνδεσης κοχλία M6 (Σχήμα 3.3) :



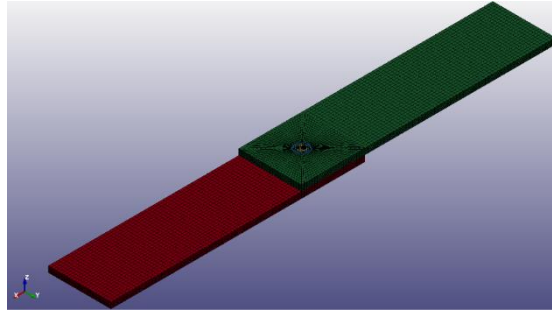
Σχήμα 3.2: Διακριτοποίηση δοκιμίου SLS σύνδεσης κόλλας



Σχήμα 3.3: Διακριτοποίηση δοκιμίου SLS κοχλιωτής σύνδεσης

Η ανάλυση της κοχλιωτής σύνδεσης έγινε σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο περιλάμβανε μία implicit ανάλυση για την προένταση του κοχλίου μέχρι τα 4.4 Nm και το δεύτερο στάδιο explicit ανάλυση της αντοχής του δοκιμίου.

- Δοκίμιο SLS συγκολλημένο με 6 mm και 9 mm RFSSW (Σχήμα 3.4):



Σχήμα 3.4: Διακριτοποίηση δοκιμίου SLS συγκολλημένο με RFSSW

3.1.1.2 Δοκίμια διάτμησης πλακών άνισου μήκους και δοκίμια κάμψης τριών σημείων με αρχική ρωγμή

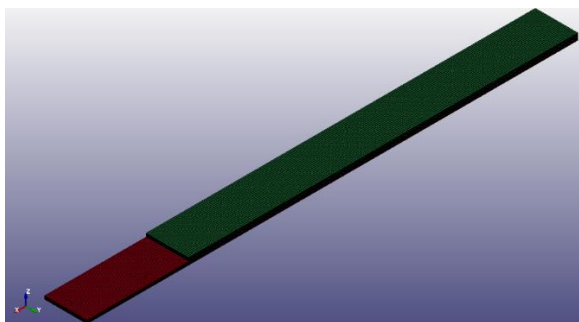
Έγινε παραμετρική ανάλυση δοκιμίων CLS και ENF, τα οποία διέθεταν προσανατολισμό ινών [0/45/90/45/-45]_s, συμπολυμερισμένων πλακών τα οποία διέθεταν μηχανισμό διακοπής αποσύνδεσης RFSSW. Αρχικά δημιουργήθηκαν δοκίμια αναφοράς και στην συνέχεια δοκίμια με μηχανισμό επιβράδυνσης διάδοσης ρωγμής βάσει των παρακάτω παραμέτρων:

Οι παράμετροι οι οποίοι μελετήθηκαν για τα δοκίμια CLS ήταν οι ακόλουθοι:

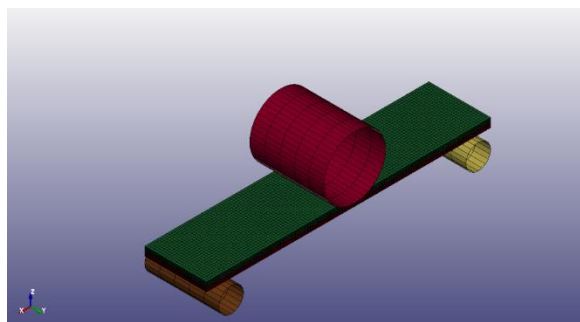
- Τρεις αποστάσεις μεταξύ αρχικού μετώπου ρωγμής και μηχανισμού διακοπής αποσύνδεσης: 10 mm, 20 mm και 30 mm.
- Τρία βάθη για τον μηχανισμό, 2.8 mm, 3.0 mm και 3.2 mm τα οποία αντιστοιχούν σε 70%, 75% και 80% του συνολικού βάθους των πλακών.
- Μηχανισμός επιβράδυνσης της διάδοσης ρωγμής διαμέτρου 6 mm και 9 mm.

Οι παράμετροι οι οποίοι μελετήθηκαν για τα δοκίμια ENF ήταν οι ακόλουθοι:

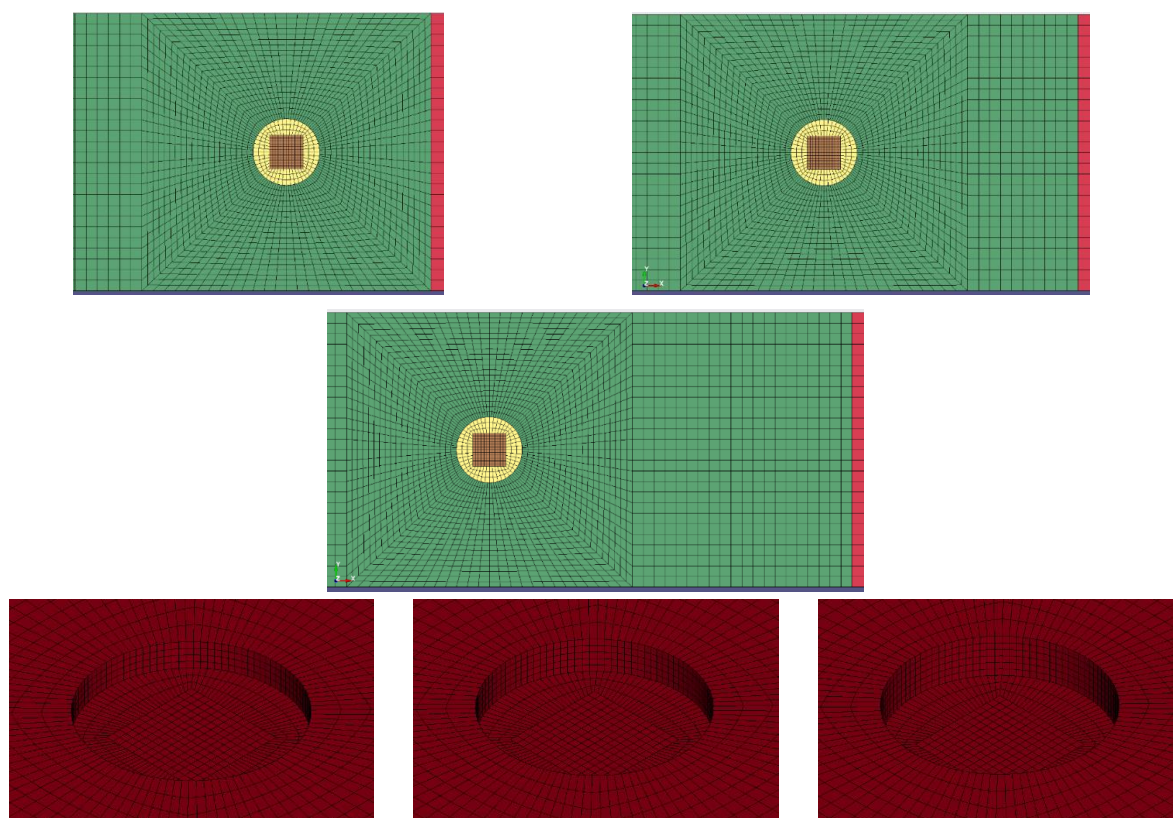
- Τρία βάθη για τον μηχανισμό, 2.24 mm, 2.4 mm και 2.56 mm τα οποία αντιστοιχούν σε 70%, 75% και 80% του συνολικού βάθους των πλακών.
- Μηχανισμός διακοπής της αποσύνδεσης διαμέτρου 6 mm και 9 mm.



Σχήμα 3.5: Διακριτοποίηση δοκιμίου CLS αναφοράς



Σχήμα 3.6: Διακριτοποίηση δοκιμίου ENF αναφοράς



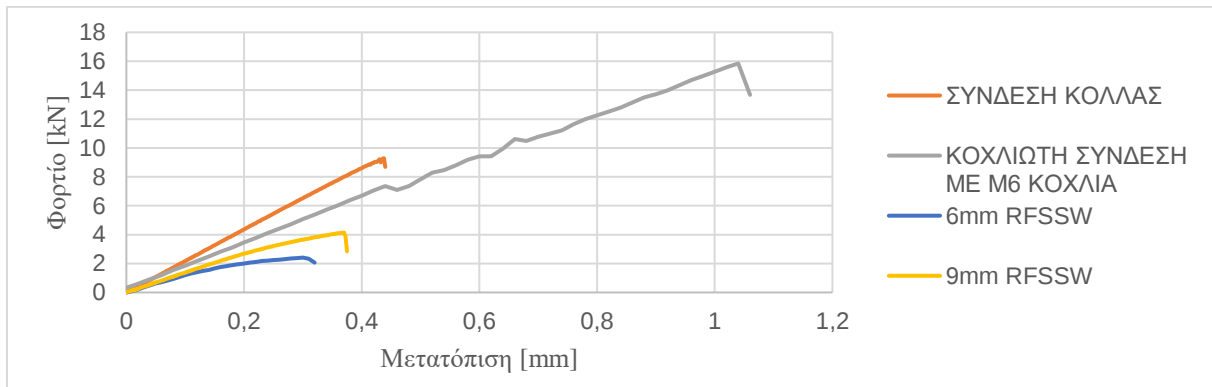
Σχήμα 3.7: Διακριτοποίηση κοντά στον μηχανισμό διακοπής αποσύνδεσης

4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΤΡΟΠΩΝ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΑ SLS

Το Σχήμα 4.1 δείχνει τις καμπύλες Φορτίου-Μετατόπισης για όλα τα δοκίμια SLS. Η μηχανική σύνδεση πέτυχε το υψηλότερο μέγιστο φορτίο το οποίο ήταν ίσο με 15.8 kN στα 1.04 mm,

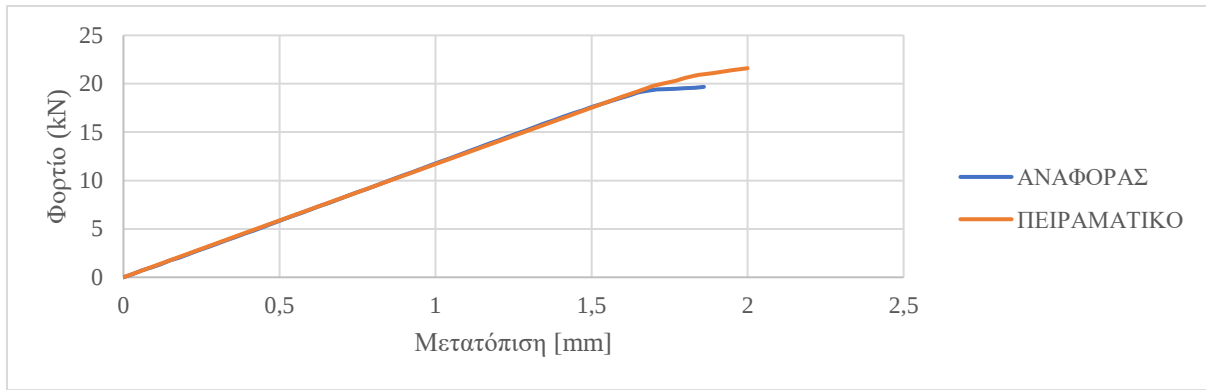
διότι η σύνδεση αστόχησε λόγω αστοχίας των πλακών, ενώ σε όλες τις άλλες περιπτώσεις η σύνδεση απέτυχε πριν επέλθει αστοχία των πλακών. Αυτό υποδεικνύεται και από την αστάθεια και μη γραμμικότητα της καμπύλης της μηχανικής σύνδεσης. Μετά τα 0.46 mm μετατόπισης του άκρου, οι συγκεντρώσεις τάσεων γύρω από τον κοχλία οδηγούν τα πεπερασμένα στοιχεία γύρω από την οπή του κοχλία σε αστοχία. Η σύνδεση κόλλας είχε την υψηλότερη δυσκαμψία από τα τέσσερα, αλλά αστόχησε για μικρότερη μετατόπιση άκρου σε σχέση με την μηχανική σύνδεση, στα 0.43 mm. Το μέγιστο φορτίο ήταν 9.25 kN. Αυτή η συμπεριφορά ήταν αναμενόμενη αφού οι εποξιδικές κόλλες έχουν ψαθυρή συμπεριφορά. Οι δύο συγκολλήσεις RFSSW είχαν την χαμηλότερη δυσκαμψία και τα χαμηλότερα μέγιστα φορτία. Η συγκόλληση 9 mm αστόχησε στα 0.37 mm και 4.16 kN, ενώ η συγκόλληση 6 mm αστόχησε στα 0.31 mm και 2.41 kN. Σε σύγκριση με τα άλλα δύο είδη σύνδεσης, οι συγκολλήσεις RFSSW έχουν μικρότερη επιφάνεια σύνδεσης σε σχέση με την σύνδεση κόλλας και υστερούν σε αντοχή σε σχέση με την κοχλιωτή σύνδεση. Επομένως, προσφέρουν την πιο αδύναμη σύνδεση.



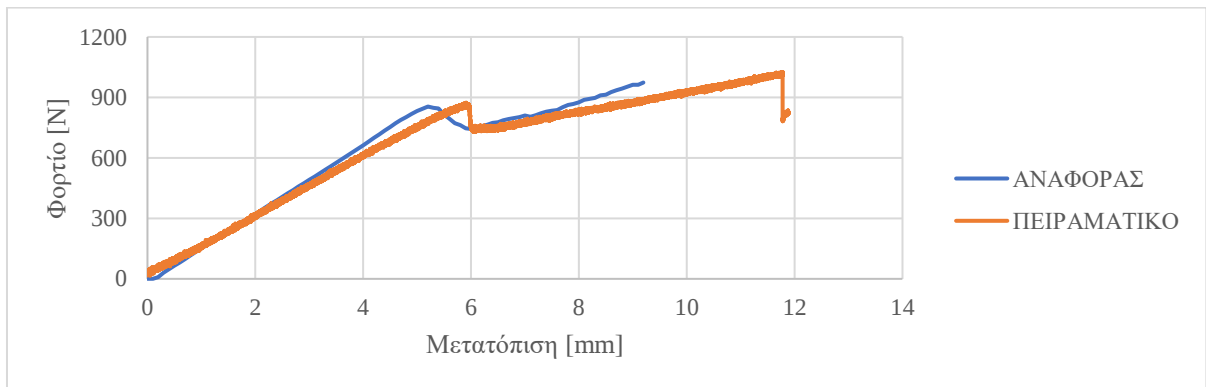
Σχήμα 4.1: Συνδέσεις δοκιμίων SLS - Καμπύλες Φορτίου-Μετατόπισης

4.2 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ RFSSW ΩΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΙΑΚΟΠΗΣ ΤΗΣ ΑΠΟΣΥΝΔΕΣΗΣ ΜΕΣΩ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΕ CLS ΚΑΙ ENF ΔΟΚΙΜΙΑ

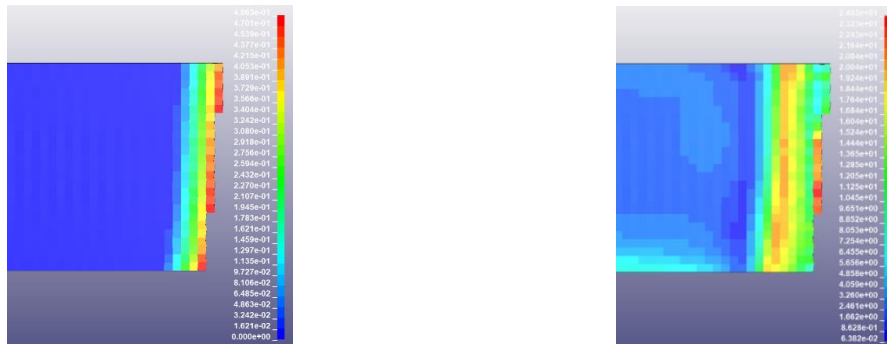
Δοκίμια CLS και ENF αναφοράς προσομοιώθηκαν και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με πειραματικές τιμές από πειράματα τα οποία διεξάχθηκαν σε τέτοια δοκίμια. Ο σκοπός των καμπυλών Φορτίου-Μετατόπισης ήταν να επιβεβαιωθεί ότι τα μοντέλα συμπεριφέρονται κατάλληλα καθώς και για να συγκριθούν τα δοκίμια που διαθέτουν μηχανισμό διακοπής αποσύνδεσης με αυτά.



Σχήμα 4.2: Καμπύλες Φορτίου-Μετατόπισης δοκιμίων CLS αναφοράς και πειραματικών τιμών



Σχήμα 4.3: Καμπύλες Φορτίου-Μετατόπισης δοκιμίου ENF αναφοράς και πειραματικών τιμών

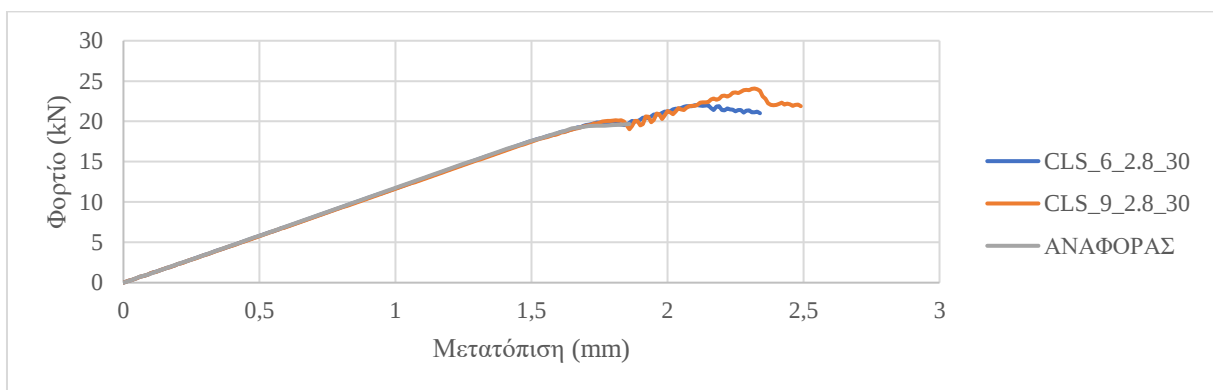


Σχήμα 4.4: Ενδεικτικά χρωματιστικά διαγράμματα πλαστικής παραμόρφωσης και διατμητικών τάσεων (MPa) στα δοκίμια αναφοράς

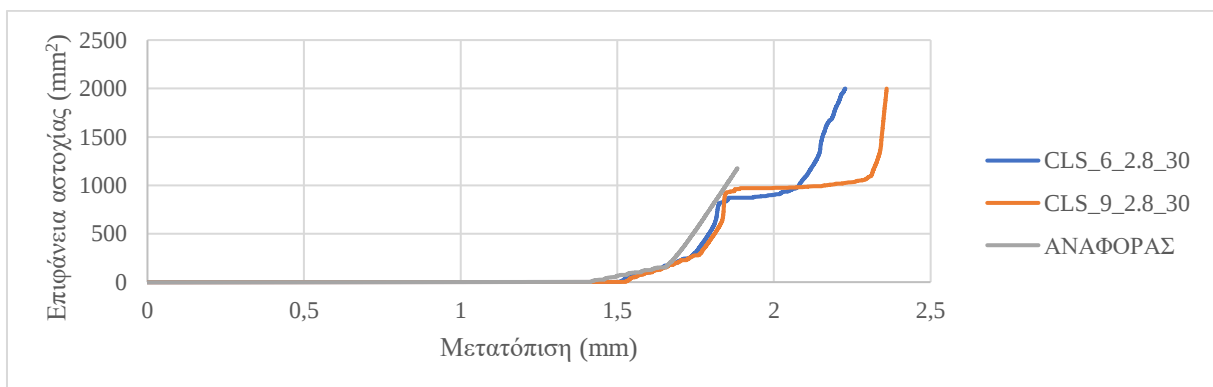
Από το Σχήμα 4.2 και το Σχήμα 4.3 επιβεβαιώθηκε ότι τα μοντέλα συμπεριφέρονταν όπως έπρεπε. Οι καμπύλες Φορτίου-Μετατόπισης για τα δοκίμια CLS είχαν υψηλό βαθμό ομοιότητας, με μόνη διαφορά το μέγιστο φορτίο το οποίο ήταν υψηλότερο στην πειραματική καμπύλη. Ωστόσο, η πρόβλεψη της διάδοσης ρωγμής στην προσομοίωση ταίριαζε με αυτή στο πραγματικό δοκίμιο και επομένως η προσομοίωση ήταν ακριβής. Στο διάγραμμα με τα δοκίμια ENF, το προσομοιωμένο μοντέλο είχε ελαφρώς υψηλότερη δυσκαμψία σε σχέση με το πειραματικό. Αυτό μπορεί να οφειλόταν σε πληθώρα λόγων. Ωστόσο, το μέγιστο φορτίο ήταν όμοιο και στις δύο καμπύλες. Το συμπέρασμα που προήλθε από το γεγονός αυτό, ήταν ότι η σύνδεση συμπολυμερισμού συμπεριφέρθηκε κατάλληλα. Στο Σχήμα 4.4 μπορεί να παρατηρηθεί τυπική συμπεριφορά αποσύνδεσης. Τα στοιχεία συνοχής ακολούθησαν τον διγραμμικό νόμο έλξης-διαχωρισμού και μπορούν να παρατηρηθούν ζώνες χαμηλής τάσης και

υψηλής πλαστικής παραμόρφωσης και από τα δύο δοκίμια κοντά στο χείλος της ρωγμής, όπου τα στοιχεία συνοχής είχαν σημαντικό βαθμό συσσωρευμένης βλάβης και επρόκειτο να διαγραφούν, ακολουθούμενες από ζώνες υψηλής τάσης και χαμηλότερης πλαστικής παραμόρφωσης όπου τα στοιχεία ήταν στην κορυφή της διγραμμικής καμπύλης. Οι τάσεις σταδιακά μειωνόντουσαν προς τα αριστερά και η πλαστική παραμόρφωση ήταν μηδέν. Τα στοιχεία συνοχής σε αυτή την ζώνη δεν είχαν συσσωρεύσει βλάβη και παραμορφωνόντουσαν ελαστικά. Χωρίς μηχανισμό διακοπής αποσύνδεσης η ρωγμή θα συνέχιζε να διαδίδεται ανεξέλεγκτα μέχρι την τελική αστοχία.

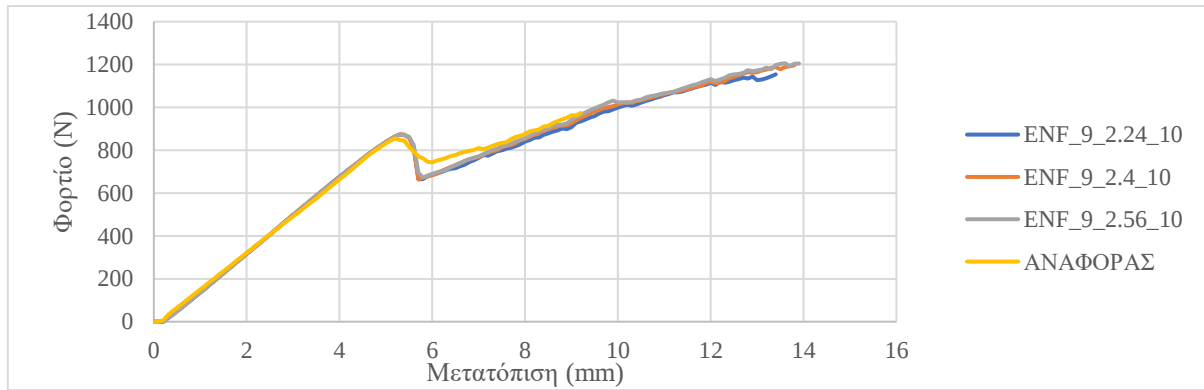
Στην συνέχεια ακολούθησαν τα μοντέλα CLS και ENF με μηχανισμό διακοπής αποσύνδεσης της παραμετρικής ανάλυσης. Ακολουθούν ενδεικτικά ένα διάγραμμα Φορτίου-Μετατόπισης και ένα Επιφάνειας αστοχίας-Μετατόπισης για δοκίμια CLS και ENF με μηχανισμό επιβράδυνσης διάδοσης ρωγμής:



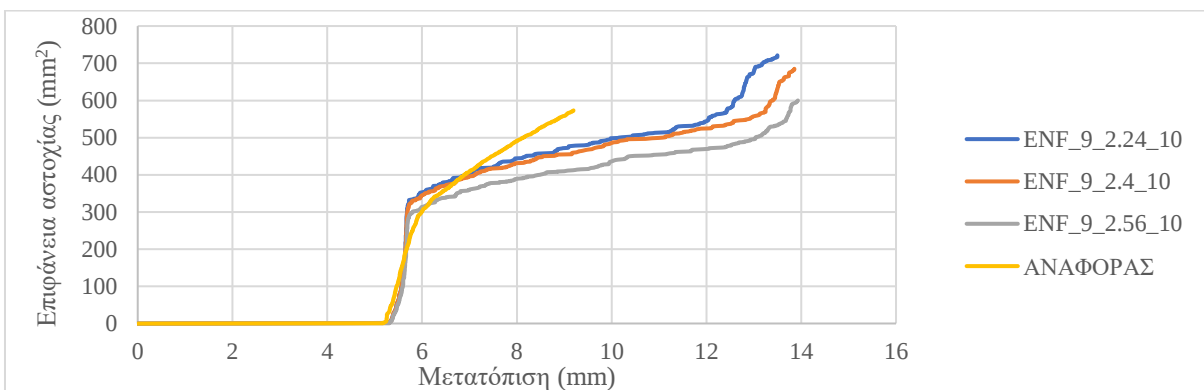
Σχήμα 4.5: Καμπύλες Φορτίου-Μετατόπισης δοκιμίων CLS απόστασης 30 mm από το αρχικό μέτωπο της ρωγμής, σε βάθος 2.8 mm για μηχανισμό διακοπής αποσύνδεσης 6 mm και 9 mm



Σχήμα 4.6: Καμπύλες Επιφάνειας αστοχίας-Μετατόπισης δοκιμίων CLS απόστασης 30 mm από το αρχικό μέτωπο της ρωγμής, σε βάθος 2.8 mm για μηχανισμό διακοπής αποσύνδεσης 6 mm και 9 mm

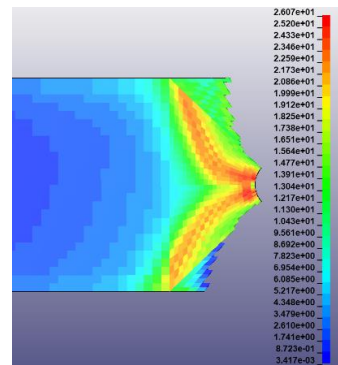
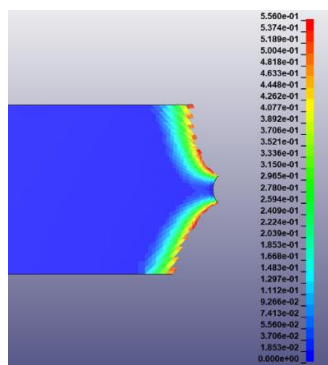


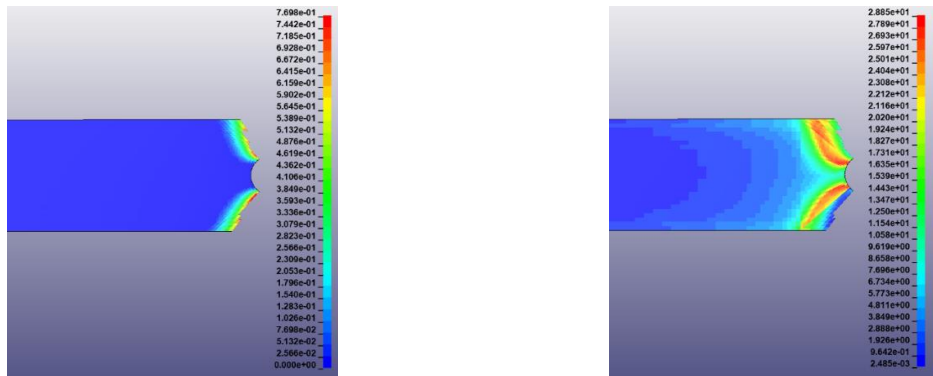
Σχήμα 4.7: Καμπύλες Φορτίου-Μετατόπισης δοκιμών ENF απόστασης 10 mm από το αρχικό μέτωπο της ρωγμής, σε βάθος 2.24 mm, 2.4 mm και 2.56 mm για μηχανισμό διακοπής αποσύνδεσης 9 mm



Σχήμα 4.8: Καμπύλες Επιφάνεια αστοχίας-Μετατόπισης δοκιμών ENF απόστασης 10 mm από το αρχικό μέτωπο της ρωγμής, σε βάθος 2.24 mm, 2.4 mm και 2.56 mm για μηχανισμό διακοπής αποσύνδεσης 9 mm

Έγινε εμφανές από τα αποτελέσματα ότι οι μηχανισμοί διακοπής αποσύνδεσης επιβράδυναν σημαντικά την διάδοση της ρωγμής σε όλα τα δοκίμια CLS και ENF και στα δοκίμια CLS αύξησαν και το μέγιστο φορτίο που αναπτύχθηκε. Κατά την διάρκεια της σύλληψης της ρωγμής από τους μηχανισμούς, η μετατόπιση του άκρου του δοκιμίου αυξανόταν, ενώ το εμβαδόν της επιφάνειας αποσύνδεσης αυξανόταν ελάχιστα. Επίσης παρατηρήθηκε ότι μεγαλύτεροι μηχανισμοί διακοπής αποσύνδεσης που έφταναν σε μεγαλύτερο βάθος βελτίωναν περισσότερο τα τελικά αποτελέσματα σε σχέση με άλλους. Ακόμα, από τα χρωματιστικά διαγράμματα ενεργής πλαστικής παραμόρφωσης και διατμητικών τάσεων, όπως αυτά στο Σχήμα 4.9 παρατηρούμε πώς οι μεγαλύτεροι μηχανισμοί αποσύνδεσης συμπεριφέρονται καλύτερα από τους πιο μικρούς. Οι ζώνες υψηλής τάσης είναι πιο ομοιόμορφα απλωμένες στην επιφάνεια της σύνδεσης.





Σχήμα 4.9: Χρωματιστικά διαγράμματα ενεργής πλαστικής παραμόρφωσης στα αριστερά και διατμητικών τάσεων (MPa) στα δεξιά. Στην πάνω σειρά ο μηχανισμός διακοπής αποσύνδεσης είναι 6 mm, ενώ κάτω 9 mm

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτήν την διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε μελέτη ικανότητας παραλαβής φορτίου καθώς και εξέλιξης αποσύνδεσης σε δύο ειδών δοκίμια συμπολυμερισμένων συνθέτων υλικών που διαθέτουν μηχανισμό διακοπής αποσύνδεσης που είχε προκύψει από κατεργασία RFSSW. Εκτελέστηκαν προσομοιώσεις στο πακέτο πεπερασμένων στοιχείων LS-DYNA σε μοντέλα SLS για να συγκριθεί αυτή η κατεργασία σημειακής συγκόλλησης με σύνδεση με κόλλα και μηχανική σύνδεση με κοχλία και περικόχλιο. Έπειτα, ελέγχθηκε η κατεργασία αυτή ως μηχανισμός διακοπής αποσύνδεσης σε δοκίμια CLS και ENF κάνοντας χρήση της μεθόδου CZM. Στα πρώτα οι παράμετροι οι οποίοι εξετάστηκαν ήταν απόσταση από το αρχικό μέτωπο της ρωγμής μέχρι την αρχή του μηχανισμού διακοπής αποσύνδεσης, το βάθος του μηχανισμού καθώς και η διάμετρός του, ενώ στα δεύτερα ελέγχθηκαν το βάθος του μηχανισμού και η διάμετρός του.

Η σημειακή συγκόλληση είχε χειρότερες επιδόσεις από την μηχανική σύνδεση και την σύνδεση με κόλλα, αλλά δεν χρειάζονταν επιπλέον μέρη ούτε υλικά, μειώνοντας το βάρος των πλακών και άρα σε πραγματικές συνθήκες ενδεχομένως και το κόστος λειτουργίας. Από την παραμετρική ανάλυση προέκυψε ότι οι μηχανισμοί διακοπής αποσύνδεσης επιδρούν θετικά στις επιδόσεις της σύνδεσης, με μεγαλύτερους και βαθύτερους μηχανισμούς να έχουν καλύτερες επιδόσεις από ότι μικρότεροι και πιο ρηχοί. Στα CLS μοντέλα οι βέλτιστοι παράμετροι ήταν: 9 mm διάμετρος μηχανισμού διακοπής αποσύνδεσης, 3.2 mm βάθους και 20 mm απόσταση από την αφετηρία της ρωγμής. Στα μοντέλα ENF προέκυψε ότι οι βέλτιστοι παράμετροι ήταν: 9 mm διάμετρος μηχανισμού διακοπής αποσύνδεσης και 2.56 mm βάθος.

6 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Τα θετικά αποτελέσματα αυτής της μελέτης, όσο αφορά τους μηχανισμούς διακοπής αποσύνδεσης, πρέπει να ενθαρρύνουν περαιτέρω μελέτη στο θέμα, σε διαφορετικά είδη δοκιμών τα οποία υπόκεινται σε διαφορετικά είδη φόρτισης, σε διαφορετικά υλικά καθώς και συνδυασμός πολλαπλών μηχανισμών επιβράδυνσης διάδοσης ρωγμών ίδιου ή διαφορετικού είδους. Μέσω αυτών των μελετών, η κατανόηση των εσωτερικών μηχανισμών των υλικών θα εμβαθύνει, επιτρέποντάς μας την κατασκευή ασφαλέστερων και φιλικότερων προς το περιβάλλον κατασκευών.