ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αριθμητική Προσομοίωση της Αποκόλλησης σε Υβριδικές Συνδέσεις Κόλλας/Κοχλία Μονής Επικάλυψης Συνθέτων Υλικών Υποβαλλόμενες σε Κόπωση

Αντώνιος Τεμπέλης

1047273

Κωνσταντίνος Τσερπές, Αναπληρωτής Καθηγητής

Διπλωματική εργασία υποβληθείσα στο Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών του Πανεπιστημίου Πατρών

ΠΑΤΡΑ, Ιούλιος 2020

Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών
Αντώνιος Τεμπέλης
© [2020] – Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗΣ ΥΛΙΚΩΝ

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε

από τον

Αντώνιο Τεμπέλη

1047273

τον Ιούλιο 2020

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αριθμητική Προσομοίωση της Αποκόλλησης σε Υβριδικές Συνδέσεις Κόλλας/Κοχλία Μονής Επικάλυψης Συνθέτων Υλικών Υποβαλλόμενες σε Κόπωση

Αντώνιος Τεμπέλης

Σε αυτή την εργασία μελετάται αριθμητικά η επίδραση της χρήσης κοχλιών ως μηχανισμούς επιβράδυνσης της αποκόλλησης σε συνδέσεις μονής επικάλυψης με κόλλα πολύστρωτων πλακών υπό φόρτιση κόπωσης. Χρησιμοποιείται το πακέτο πεπερασμένων στοιχείων LS DYNA στο οποίο αρχικά πραγματοποιούνται στατικές αναλύσεις συνδέσεων με και χωρίς κοχλία για την εύρεση του εξωτερικού φορτίου για αστοχία της κόλλας. Στη συνέχεια με υπορουτίνα που προγραμματίζεται από το χρήστη τροποποιείται η μέθοδος της ζώνης συνοχής για την κόλλα ώστε να υπάρχει υποβάθμιση της αντοχής λόγω κόπωσης. Η υπορουτίνα λαμβάνει πειραματικά δεδομένα του νόμου Paris για τον υπολογισμό του μήκους της ρωγμής αποκόλλησης συναρτήσει των κύκλων κόπωσης και υπολογίζει έναν συντελεστή βλάβης λόγω κόπωσης που υποβαθμίζει την αντοχή των στοιχείων της κόλλας. Η υπορουτίνα αυτή χρησιμοποιείται σε αναλύσεις κόπωσης συνδέσεων χωρίς την παρουσία κοχλία και συνδέσεων με κοχλία δύο διαφορετικών διαμέτρων. Πραγματοποιούνται επίσης αναλύσεις σε συνδέσεις με και χωρίς κοχλία σε χαμηλότερη τιμή εξωτερικής φόρτισης ώστε να εξεταστεί το πώς η τιμή του φορτίου επηρεάζει τα αποτελέσματα. Ακόμη εξετάζεται το πώς οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στην υπορουτίνα επηρεάζουν τα αποτελέσματα με στόχο την βελτίωση της λειτουργίας της. Εξάγονται διαγράμματα με καμπύλες εξέλιξης της αποκόλλησης συναρτήσει των κύκλων φόρτισης και εικόνες από την εξέλιξη της αποκόλλησης. Η αποκόλληση εκφράζεται ως ποσοστό της αποκολλημένης επιφάνειας επί της αρχικής επιφάνειας της κολλάς. Από τα αποτελέσματα φαίνεται πως ο κοχλίας δρα θετικά ως προς της καθυστέρηση της αποκόλλησης.

Λέξεις κλειδιά

Κόλλα, μονή επικάλυψη, κόπωση, κοχλίες, LS DYNA

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Εφαρμοσμένης Μηχανικής, Τεχνολογίας Υλικών και Εμβιομηχανικής

ABSTRACT

Numerical simulation of debonding in fatigue loaded hybrid adhesively bonded/bolted single lap joints of composite plates

Antonios Tempelis

In this thesis the effect of using bolts as crack stoppers in adhesively bonded single lap joints of laminated composite plates loaded in fatigue is numerically studied. The finite element software LS DYNA is used for the numerical analyses. Static analyses are performed in joints with and without the presence of a bolt to find the maximum applied external load for the failure of the adhesive layer. To model fatigue, a user defined subroutine is programmed which modifies the cohesive zone method in order to include strength degradation of the adhesive due to fatigue. The subroutine uses experimental Paris law data for the calculation of the crack length as a function of fatigue cycles and then a fatigue damage parameter is used to degrade the strength of the adhesive layer elements. The subroutine is used to analyze non-bolted and bolted joints with two different bolt diameters. Analyses of non-bolted and bolted joints under a smaller external load value are also performed to study the effect of load value on the results. The effect of the parameters defined in the subroutine on the results is also studied with the aim of improving the subroutine's function via further studies. Curves of the advance of the debonding as a function of the number of fatigue cycles and images of the debonding advance are extracted from the analyses. Debonding is expressed as a percentage of the debonded area of the adhesive over the initial bond area. The results show that the use of bolts leads to a delay of the debonding process.

Λέξεις κλειδιά

Adhesive, single lap joint, fatigue, bolts, LS DYNA

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

[Πίνακας 4.1. Τιμές των ελαστικών ιδιοτήτων της στρώσης.……σελ. 50]

[Πίνακας 4.2. Τιμές των τάσεων αστοχίας της στρώσης…...…….…σελ. 50]

[Πίνακας 4.3. Τιμές των ιδιοτήτων της κόλλας……..……σελ. 51]

[Πίνακας 4.4. Τιμές των ιδιοτήτων κοχλία και περικοχλίου..……σελ. 52]

[Πίνακας 4.5. Τύποι στοιχείων και υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις……..……σελ. 54]

[Πίνακας 4.6. Τύπος ανάλυσης για κάθε περίπτωση φόρτισης…..……σελ. 56]

[Πίνακας 4.7. Παράμετροι Damping και Hourglass που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις ……..……σελ. 64]

[Πίνακας 5.1. Μέγιστες δυνάμεις ψευδοστατικών αναλύσεων……σελ.66]

[Πίνακας 5.2. Κύκλοι για πλήρη αποκόλληση των αναλύσεων κόπωσης…..…….σελ. 74]

[Πίνακας 5.3. Κύκλοι για πλήρη αποκόλληση των αναλύσεων κόπωσης με μικρότερη φόρτιση-4090N …….…..σελ. 87]

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΩΝ

[Σχήμα 1.1. Τυπικές διατάξεις συνδέσεων με κόλλα και οι ονομασίες τους ……...6]
[Σχήμα 1.2. Ενισχύσεις συνδέσεων με κόλλα: (α) χρήση κοχλία σύσφιξης, (β) χρήση μεταλλικού πλέγματος ……..…….9]
[Σχήμα 2.1. Φορτίσεις σύνδεσης με κόλλα: (α) εφελκυσμός, (β) θλίψη, (γ) διάτμηση, (δ) διάσπαση, (ε) αποκόλληση ……..……...12]
[Σχήμα 2.2. Τύποι αστοχίας συνδέσεων με κόλλα ……14]
[Σχήμα 2.3. Τύποι φόρτισης I (α), II (β) και III (γ) συνδέσεων με κόλλα ……16]
[Σχήμα 2.4. Μηχανικές δοκιμές για αντοχή της σύνδεσης: (α)Δοκιμή μονής επικάλυψης (β) T-αποκόλληση III (γ) Δοκιμή εφελκυσμού……..……17]
[Σχήμα 2.5. Δοκίμιο διπλής προβόλου δοκού……...……18]
[Σχήμα 2.6. Δοκίμιο κάμψης τριών σημείων με εγκοπή στο άκρο……19]
[Σχήμα 2.7. Διάταξη Mixed Mode Bending……..……19]
[Σχήμα 2.8. Κατανομή διατμητικής τάσης στην κόλλα κατά το μήκος του overlap σε SLS δοκίμιο με την λύση των Volkersen et.al ..……..21]
[Σχήμα 3.1. Διγραμμικός νόμος συνοχής και οι χαρακτηριστικές παράμετροί του ……...……27]
[Σχήμα 3.2. Νόμος συνοχής για φόρτιση μεικτού τύπου I + II……..29]
[Σχήμα 3.3. Στοιχείο κόλλας με τις διευθύνσεις 1-2-3 για τη μετατόπιση……..30]
[Σχήμα 3.4. Τρόπος εφαρμογής του φορτίου σε μία ανάλυση κόπωσης …..……..33]
[Σχήμα 3.5. Επίδραση των συντελεστών ds, df , Dtot στον νόμο συνοχής ..……..35]
[Σχήμα 3.6. Διάγραμμα ροής της εφαρμογής του κώδικα υποβάθμισης της αντοχής λόγω κόπωσης....36]
[Σχήμα 3.7. Παράδειγμα επιλογής της παραμέτρου G_{thresh} ……38]
[Σχήμα 3.8. Περιβάλλον εισαγωγής παραμέτρων της υπορουτίνας κόπωσης στο LS PrePost……...39]
[Σχήμα 3.9. Τάση προέντασης στον κοχλία.……..……44]
[Σχήμα 3.10. Ενέργειες από μία ανάλυση με LS DYNA……45]
[Σχήμα 4.1. Γενικές διαστάσεις σύνδεσης.……...48]
[Σχήμα 4.2. Πάχος στρώματος κόλλας.……48]
[Σχήμα 4.3. Διαστάσεις κοχλίωσης με διάμετρο κοχλία 4.8mm……..49]
[Σχήμα 4.4. Διαστάσεις κοχλίωσης με διάμετρο κοχλία 2.4mm ……...……..49]
[Σχήμα 4.5. Συνοριακές συνθήκες της σύνδεσης ……..……..54]
[Σχήμα 4.6. Μοντέλο για την ανάλυση σε ψευδοστατική φόρτιση της σύνδεσης χωρίς κοχλία…….56]
[Σχήμα 4.7. Μοντέλο για την ανάλυση σε ψευδοστατική φόρτιση της σύνδεσης με κοχλία διαμέτρου 4.8mm……...57]
[Σχήμα 4.8. Μοντέλο με πλέγμα 1x1mm για φόρτιση κόπωσης της σύνδεσης χωρίς κοχλία ……57]
[Σχήμα 4.9. Μοντέλο με πλέγμα 0.5x0.5mm για φόρτιση κόπωσης της σύνδεσης χωρίς κοχλία…...…58]

[Σχήμα 4.10. Μοντέλο με αραιό πλέγμα για φόρτιση κόπωσης της σύνδεσης με κοχλία διαμέτρου 4.8mm ……58]
[Σχήμα 4.11. Μοντέλο με πυκνό πλέγμα για φόρτιση κόπωσης της σύνδεσης με κοχλία διαμέτρου 4.8mm ……...59]
[Σχήμα 4.12. . Μοντέλο με πλέγμα 13x13 για φόρτιση κόπωσης της σύνδεσης με κοχλία διαμέτρου 2.4mm ……..…….59]
[Σχήμα 4.13. . Μοντέλο με πλέγμα 26x26 για φόρτιση κόπωσης της σύνδεσης με κοχλία διαμέτρου 2.4mm ……60]
[Σχήμα 4.14. Μοντέλο χωρίς κοχλία με αραιό πλέγμα και με μορφή πλέγματος παρόμοια με αυτή του κοχλία ……61]
[Σχήμα 4.15. Μοντέλο χωρίς κοχλία με πυκνό πλέγμα και με μορφή πλέγματος παρόμοια με αυτή του κοχλία ……61]
[Σχήμα 4.16. Επαφή μεταξύ κορμού κοχλία και περικοχλίου.……...62]
[Σχήμα 4.17. Επαφή μεταξύ κεφαλής κοχλία και της κάτω πολύστρωτης πλάκας.…….…….……63]
[Σχήμα 4.18. Επαφή μεταξύ περικοχλίου και της άνω πολύστρωτης πλάκας ……...63]
[Σχήμα 5.1. Μέγιστες δυνάμεις ψευδοστατικών αναλύσεων…….. ……..66]
[Σχήμα 5.2. . Κατανομές τάσης στην κόλλα στη x διεύθυνση ακριβώς πριν την εκκίνηση της αποκόλλησης: χωρίς κοχλία (πάνω), με κοχλία (κάτω), τιμές σε MPa……..…..….67]
[Σχήμα 5.3. Κατανομές τάσης στην κόλλα στη y διεύθυνση ακριβώς πριν την εκκίνηση της αποκόλλησης: χωρίς κοχλία (πάνω), με κοχλία (κάτω), τιμές σε MPa……..…..….68]
[Σχήμα 5.4. Κατανομές τάσης στην κόλλα στη z διεύθυνση ακριβώς πριν την εκκίνηση της αποκόλλησης: χωρίς κοχλία (πάνω), με κοχλία (κάτω), τιμές σε MPa……..…..….69]
[Σχήμα 5.5. Κατανομές τάσης στην κόλλα στη x διεύθυνση σε προχωρημένο στάδιο αποκόλλησης: χωρίς κοχλία (πάνω), με κοχλία (κάτω), τιμές σε MPa……..…..….70]
[Σχήμα 5.6. . Κατανομές τάσης στην κόλλα στη y διεύθυνση σε προχωρημένο στάδιο αποκόλλησης: χωρίς κοχλία (πάνω), με κοχλία (κάτω), τιμές σε MPa……..…..….71]
[Σχήμα 5.7. Κατανομές τάσης στην κόλλα στη z διεύθυνση σε προχωρημένο στάδιο αποκόλλησης: χωρίς κοχλία (πάνω), με κοχλία (κάτω), τιμές σε MPa……..…..….72]
[Σχήμα 5.8. Εξέλιξη της αποκόλλησης στο μοντέλο χωρίς κοχλία με mesh 0.5x0.5mm…..…… 75]
[Σχήμα 5.9. Εξέλιξη της αποκόλλησης στο μοντέλο χωρίς κοχλία με mesh 1x1mm……...……..……76]
[Σχήμα 5.10. Εξέλιξη της αποκόλλησης στο μοντέλο με κοχλία διαμέτρου 4.8mm με πυκνό mesh…….…....77]
[Σχήμα 5.11. Εξέλιξη της αποκόλλησης στο μοντέλο με κοχλία διαμέτρου 4.8mm με αραιό mesh…….…....78]
[Σχήμα 5.12. Εξέλιξη της αποκόλλησης στο μοντέλο με κοχλία διαμέτρου 2.4mm με mesh 26x26…….79]
[Σχήμα 5.13. Εξέλιξη της αποκόλλησης στο μοντέλο με κοχλία διαμέτρου 2.4mm με mesh 13x13…….80]
[Σχήμα 5.14. Συγκριτικό γράφημα Ποσοστού αποκόλλησης- Κύκλων φόρτισης για τα μοντέλα χωρίς κοχλία……..81]

[Σχήμα 5.15. Συγκριτικό γράφημα Ποσοστού αποκόλλησης- Κύκλων φόρτισης για τα μοντέλα με κοχλία διαμέτρου 4.8mm ……..……..81]
[Σχήμα 5.16. Συγκριτικό γράφημα Ποσοστού αποκόλλησης- Κύκλων φόρτισης για τα μοντέλα με κοχλία διαμέτρου 2.4mm ……....82]
[Σχήμα 5.17. Συγκριτικό γράφημα Ποσοστού αποκόλλησης- Κύκλων φόρτισης για τα μοντέλα με το πυκνότερο πλέγμα…….82]
[Σχήμα 5.18. Εξέλιξη της αποκόλλησης στο μοντέλο με παρόμοιο mesh με το μοντέλο με κοχλία για μελέτη της επίδρασης του σχήματος του πλέγματος (πυκνό mesh)…….. ……..84]
[Σχήμα 5.19. Εξέλιξη της αποκόλλησης στο μοντέλο με παρόμοιο mesh με το μοντέλο με κοχλία για μελέτη της επίδρασης του σχήματος του πλέγματος (αραιό mesh). ……85]
[Σχήμα 5.20. Επίδραση του σχήματος του πλέγματος στην εξέλιξη της αποκόλλησης συναρτήσει των κύκλων φόρτισης για τα μοντέλα χωρίς κοχλία……...86]
[Σχήμα 5.21. Εξέλιξη της αποκόλλησης στο μοντέλο χωρίς κοχλία για φόρτιση 4090 N…….…...88]
[Σχήμα 5.22. Εξέλιξη της αποκόλλησης στο μοντέλο με κοχλία 2.4 mm για φόρτιση 4090 N.……...89]
[Σχήμα 5.23. . Καμπύλες εξέλιξης της αποκόλλησης συναρτήσει των κύκλων φόρτισης για φόρτιση 4090 N και 4920N.…….90]
[Σχήμα 5.24. Σύγκριση MAT_138 με την υπορουτίνα κόπωσης(UMAT43) ως προς τη μετατόπιση για μοντέλο χωρίς κοχλία ……..91]
[Σχήμα 5.25. Σύγκριση MAT_138 με την υπορουτίνα κόπωσης(UMAT43) ως προς την εσωτερική ενέργεια για μοντέλο χωρίς κοχλία ……..…….91]
[Σχήμα 5.26. Σύγκριση MAT_138 με την υπορουτίνα κόπωσης(UMAT43) ως προς τη μετατόπιση για μοντέλο με κοχλία ……92]
[Σχήμα 5.27. Σύγκριση MAT_138 με την υπορουτίνα κόπωσης(UMAT43) ως προς την εσωτερική ενέργεια για μοντέλο με κοχλία …….....92]

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

G (N/mm) – Ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας

b (mm) – Πλάτος δοκιμίου

U (J) – Εσωτερική ενέργεια

α (mm) – Μήκος ρωγμής

Gc (N/mm) – Κρίσιμος ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας

GIc (N/mm) - Κρίσιμος ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας για Mode I

GIIc (N/mm) - Κρίσιμος ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας για Mode II

GIIIc (N/mm) - Κρίσιμος ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας για Mode III

GI (N/mm) - Ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας για Mode I

GII (N/mm) - Ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας για Mode II

GIII (N/mm) - Ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας για Mode III

σ_c, σ_{max} (MPa) – Μέγιστη τάση του νόμου συνοχής

σ (MPa) – Τάση του νόμου συνοχής

δ1 (mm) – Μετατόπιση στη διεύθυνση 1 του επιπέδου της κόλλας

δ2 (mm) - Μετατόπιση στη διεύθυνση 2 του επιπέδου της κόλλας

δ3 (mm) – Μετατόπιση στη διεύθυνση 3, κάθετη στο επίπεδο της κόλλας

β (-) – Λόγος μίξης

S (MPa) – Μέγιστη τάση του νόμου συνοχής στην εφαπτομενική διεύθυνση

T (MPa) – Μέγιστη τάση του νόμου συνοχής στην κάθετη στο επίπεδο διεύθυνση

ET (MPa/mm) – Μέτρο ελαστικότητας του νόμου συνοχής στην εφαπτομενική διεύθυνση

EN (MPa/mm) - Μέτρο ελαστικότητας του νόμου συνοχής στην κάθετη στο επίπεδο διεύθυνση

σ_m (MPa) – Τάση του νόμου συνοχής για mixed Mode

$\sigma_{m,max}$ (MPa) – Μέγιστη τάση του νόμου συνοχής για mixed Mode

δ (mm) – Μετατόπιση του νόμου συνοχής

δ^0 (mm) – Μετατόπιση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση του νόμου συνοχής

δ^f (mm) – Μετατόπιση του νόμου συνοχής για αστοχία

δ_I (mm) – Μετατόπιση του νόμου συνοχής για Mode I

δ_{II} (mm) – Μετατόπιση του νόμου συνοχής για Mode II

UND, δ_I^f (mm) – Μετατόπιση για αστοχία σε Mode I

UTD, δ_{II}^f (mm) – Μετατόπιση για αστοχία σε Mode II

δ_I^0 (mm) - Μετατόπιση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση του νόμου συνοχής σε Mode I

δ_{II}^0 (mm) - Μετατόπιση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση του νόμου συνοχής σε Mode II

δ_m (mm) - Μετατόπιση του νόμου συνοχής για Mixed Mode

E1 (GPa) – Μέτρο ελαστικότητας στη διεύθυνση 1 της στρώσης

E2 (GPa) - Μέτρο ελαστικότητας στη διεύθυνση 2 της στρώσης

E3 (GPa) - Μέτρο ελαστικότητας στη διεύθυνση 3 της στρώσης

G12 (GPa) - Μέτρο διάτμησης στις διευθύνσεις 1 και 2 της στρώσης

G13 (GPa) - Μέτρο διάτμησης στις διευθύνσεις 1 και 3 της στρώσης

G23 (GPa) - Μέτρο διάτμησης στις διευθύνσεις 2 και 3 της στρώσης

ν21 – Λόγος Poisson στις διευθύνσεις 1 και 2 της στρώσης

ν31 – Λόγος Poisson στις διευθύνσεις 3 και 1 της στρώσης

ν32 – Λόγος Poisson στις διευθύνσεις 3 και 2 της στρώσης

XMU (-) – Εκθέτης κριτηρίου αστοχίας της κόλλας

γ – Επιπλέων εκθέτης του κριτηρίου αστοχίας της κόλλας

ρ (kg/m^3) - πυκνότητα

E (GPa) – Μέτρο ελαστικότητας

ν – Λόγος Poisson

ΔG (N/mm) – Μεταβολή του ρυθμού απελευθέρωσης ενέργειας ανά κύκλο φόρτισης

Xt (MPa) - τάση αστοχίας σε εφελκυσμό στη διεύθυνση των ινών 1

Xc (MPa) - τάση αστοχίας σε θλίψη στη διεύθυνση των ινών 1

Yt (MPa) - τάση αστοχίας σε εφελκυσμό στην εγκάρσια διεύθυνση 2

Yc (MPa) - τάση αστοχίας σε θλίψη στην εγκάρσια διεύθυνση 2

Zt (MPa) - τάση αστοχίας σε εφελκυσμό στην κάθετη στο επίπεδο διεύθυνση 3

Zc (MPa) - τάση αστοχίας σε θλίψη στην κάθετη στο επίπεδο διεύθυνση 3

S (MPa) - τάση αστοχίας σε διάτμηση στην 12 διεύθυνση

R (MPa) - τάση αστοχίας σε διάτμηση στην 23 διεύθυνση)

T (MPa) - τάση αστοχίας σε διάτμηση στην 13 διεύθυνση

S_{FC} (MPa) - τάση αστοχίας σε διάτμηση της ίνας

P (N) – Δύναμη

N – Κύκλοι κόπωσης

R – Λόγος κόπωσης

S_{FS} (MPa) - τάση αστοχίας σε σύνθλιψη

φ (μοίρες)- γωνία τριβής

C – Σταθερά νόμου Paris

m – Εκθέτης νόμου Paris

ds – Στατική βλάβη

df – Βλάβη λόγω κόπωσης

Dtot – Συνολική βλάβη

ΔNe – Κύκλοι για να αστοχήσει ένα στοιχείο κόλλας

L_{el} – Χαρακτηριστικό μήκος στοιχείου κόλλας

f – Συχνότητα φόρτισης

dN/da – Αριθμός κύκλων για διάδοση ρωγμής κατά da

Gthresh (N/mm) – Τιμή κατώφλι του ρυθμού απελευθέρωσης ενέργειας της υπορουτίνας κόπωσης

C – Σταθερά νόμου Paris

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ ..... **V**

ABSTRACT ..... **VII**

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ ..... **IX**

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΩΝ ..... **X**

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ ..... **XIV**

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ..... **XVII**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ **2**

1.1 ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΜΕ ΚΟΛΛΑ 2

1.1.1 Διαδικασία κατασκευής μίας σύνδεσης με κόλλα *4*

1.1.2 Τυπικές διατάξεις συνδέσεων με κόλλα *5*

1.1.3 Τύποι κόλλας *6*

1.1.4 Μέθοδοι ενίσχυσης σε συνδέσεις με κόλλα *8*

1.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ 9

1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ 9

1.4 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ 10

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ **12**

2.1 ΤΥΠΟΙ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΜΕ ΚΟΛΛΑ 12

2.2 ΑΣΤΟΧΙΑ ΜΙΑΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΜΕ ΚΟΛΛΑ 13

2.3 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΜΙΑΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΜΕ ΚΟΛΛΑ 14

2.4 ΤΥΠΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΜΕ ΚΟΛΛΑ 16

2.5 Πειραματικος χαρακτηρισμος συνδεσεων με κολλα 16

2.5.1 Πειραματική μέτρηση κρίσιμου ρυθμού απελευθέρωσης ενέργειας για τύπο θραύσης I ..17

2.5.2 Πειραματική μέτρηση κρίσιμου ρυθμού απελευθέρωσης ενέργειας για τύπο θραύσης II .18

2.5.3 Πειραματική μέτρηση κρίσιμου ρυθμού απελευθέρωσης ενέργειας για μικτό τύπο θραύσης I+II 19

2.5.4 Πειραματικές μελέτες συνδέσεων με κόλλα σε κόπωση 20

2.6 Αναλυτικες λυσεις για συνδεσεις με κολλα 20

2.7 Υπολογιστικες μεθοδοι 22

2.7.1 Μέθοδος ζώνης συνοχής για στατική φόρτιση 23

2.7.2 Μέθοδος ζώνης συνοχής για φόρτιση κόπωσης 24

2.7.3 Πειραματικές και αριθμητικές μελέτες της επίδρασης μηχανισμών επιβράδυνσης της αποκόλλησης σε συνδέσεις με κόλλα 25

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ 27

3.1 Μεθοδος ζωνης συνοχης 27

3.2 Μεθοδος ζωνης συνοχης για κοπωση 32

3.2.1 Εφαρμογή του φορτίου 32

3.2.2 Υποβάθμιση αντοχής λόγω κόπωσης 33

3.2.3 Επιλογή παραμέτρων εισόδου του κώδικα υποβάθμισης λόγω κόπωσης 37

3.3 Αναπτυξη υπορουτινας για προσομοιωση της κοπωσης στην κολλα με το LS DYNA 38

3.4 Προσομοιωση της βλαβης στο συνθετο υλικο 39

3.5 Προσομοιωση της συσφιξης του κοχλια 43

3.6 Αριθμητικη αναλυση με το LS DYNA 44

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ 47

4.1 Γεωμετρια των μοντελων πεπερασμενων στοιχειων 47

4.1.1 Διαστάσεις 48

4.1.2 Διαστάσεις κοχλίωσης με διάμετρο κοχλία 4.8mm 48

4.1.3 Διαστάσεις κοχλίωσης με διάμετρο κοχλία 2.4mm 49

4.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ 49

4.2.1 Ιδιότητες υλικών για τις πολύστρωτες πλάκες 50

4.2.2 Ιδιότητες της κόλλας 51

4.2.3 Ιδιότητες κοχλία και περικοχλίου 52

4.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΥΠΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΥΛΙΚΩΝ 52

4.4 ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ 54

4.4.1 Στήριξη 54

4.4.2 Φόρτιση ψευδοστατικών Αναλύσεων 55

4.4.3 Φόρτιση Αναλύσεων κόπωσης 55

4.5 ΤΥΠΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 55

4.6 ΕΙΚΟΝΕΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ 56

4.6.1 Μοντέλα χωρίς κοχλία υπό ψευδοστατική φόρτιση 56

4.6.2 Μοντέλα με κοχλία διαμέτρου 4.8 mm υπό ψευδοστατική φόρτιση 56

4.6.3 Μοντέλα για φόρτιση κόπωσης χωρίς κοχλία 57

4.6.4 Μοντέλα για φόρτιση κόπωσης με κοχλία διαμέτρου 4.8 mm 58

4.6.5 Μοντέλα για φόρτιση κόπωσης με κοχλία διαμέτρου 2.4 mm 59

4.6.6 Μοντέλα με πλέγμα που προκύπτει από αφαίρεση του κοχλία για την μελέτη της επίδρασης του σχήματος του πλέγματος 60

4.6.7 Μοντέλα κόπωσης για μελέτη της επίδρασης της τιμής της εξωτερικής φόρτισης 61

4.7 ΤΥΠΟΙ ΕΠΑΦΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΚΟΧΛΙΑ 62

4.8 ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ DAMPING ΚΑΙ HOURGLASS 63

4.9 ΣΥΝΟΨΗ ΤΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΠΟΥ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ΕΡΓΑΣΙΑ 64

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ 66

5.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΨΕΥΔΟΣΤΑΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ 66

5.1.1 Διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης του άκρου στην x διεύθυνση 66

5.1.2 Κατανομές τάσεων στην κόλλα 67

5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΓΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗ ΚΟΠΩΣΗΣ 73

5.2.1 Κύκλοι για πλήρη αποκόλληση 73

5.2.2 Εξέλιξη της αποκόλλησης στα μοντέλα χωρίς κοχλία 75

5.2.3 Εξέλιξη της αποκόλλησης στα μοντέλα με κοχλία διαμέτρου 4.8mm 77

5.2.4 Εξέλιξη της αποκόλλησης στα μοντέλα με κοχλία διαμέτρου 2.4mm 79

5.2.5 Διαγράμματα εξέλιξης της αποκόλλησης 80

5.2.6 Επίδραση του σχήματος του πλέγματος στην εξέλιξη της αποκόλλησης 84

5.2.7 Επίδραση της εξωτερικής φόρτισης 87

5.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΡΟΥΤΙΝΑΣ ΜΕ ΤΟ MAT_138 ΤΟΥ LS DYNA 90

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ 95

6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 95

6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ 97

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – ΚΩΔΙΚΑΣ ΚΟΠΩΣΗΣ ΣΤΟ LS DYNA 99

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 111

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Συνδέσεις με κόλλα

Οι συνδέσεις δομικών στοιχείων με κόλα είναι μία τεχνική που χρησιμοποιείται από τους αρχαίους χρόνους. Τις τελευταίες δεκαετίες αυτή η τεχνική σύνδεσης έχει γνωρίσει έντονη ανάπτυξη και γίνεται προσπάθεια να εξαπλωθεί η χρήση της στην αεροναυπηγική. Η σύνδεση με κόλλα μπορεί να εφαρμοστεί σε μεταλλικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην αεροναυπηγική όπως κράματα αλουμινίου, μαγνησίου, χάλυβα αλλά και σε σύνθετα υλικά. Ιδιαίτερα η σύνδεση δομικών στοιχείων από σύνθετα υλικά με τη μέθοδο αυτή προσφέρει τρομερές δυνατότητες μείωσης κόστους και βάρους. Άλλες εφαρμογές συναντώνται στην κατασκευή ηλεκτρονικών, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στη συσκευασία αγαθών και στην κατασκευή αθλητικών ειδών.

Τα τελευταία χρόνια γίνεται μεγάλη προσπάθεια, κυρίως στην αεροπορική βιομηχανία, ώστε οι μηχανικές συνδέσεις με ήλους και κοχλίες να αντικατασταθούν με συνδέσεις με κόλλα. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα [1] των συνδέσεων με κόλλα, τα οποία έχουν υποκινήσει την εκτενή έρευνα για την ενσωμάτωση αυτών σε ελαφρές κατασκευές, είναι τα εξής:

1. Οι τάσεις κατανέμονται πιο ομοιόμορφα και υπάρχει μικρότερη συγκέντρωση τάσεων σε σχέση με μηχανικές συνδέσεις όπως συμβαίνει γύρω από οπές.
2. Λόγω της απουσίας επιπλέων μηχανικών μερών όπως κοχλίες ή ήλοι, το βάρος της σύνδεσης με κόλλα είναι μικρότερο και οδηγούμαστε σε ελαφρότερες κατασκευές με μικρότερο κόστος λειτουργίας.
3. Τα συνδεόμενα μέρη δεν είναι απαραίτητο να κατεργαστούν με διάνοιξη οπών ή δημιουργία αυλακώσεων. Οι κατεργασίες αυτές καταστρέφουν τοπικά τα συνδεόμενα μέρη και σε περίπτωση που αυτά είναι σύνθετα υλικά με ενίσχυση σε μία διεύθυνση υπάρχει ενδεχόμενο καταστροφής των ινών.

4. Ιδιαίτερα στην περίπτωση της αεροπορίας και της αυτοκινητοβιομηχανίας, η πλήρης εξάλειψη εξοχών λόγω ήλων ή κοχλιώσεων στις εξωτερικές επιφάνειες που έρχονται σε επαφή με τον άνεμο , οδηγεί σε βελτίωση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς.
5. Επιτρέπουν τη σύνδεση υλικών διαφορετικού τύπου, όπως μέταλλα με σύνθετα υλικά.
6. Η κόλλα προσφέρει θερμική και ηλεκτρική μόνωση.
7. Είναι δυνατή η σύνδεση ανόμοιων υλικών καθώς η κόλλα μπορεί να εμποδίσει την ανάπτυξη διάβρωσης.
8. Η διάρκεια ζωής σε κόπωση μιας σύνδεσης με κόλλα είναι μεγαλύτερη από μία σύνδεση με μηχανικά τμήματα όπως κοχλίες και ήλοι.

Οι συνδέσεις με κόλα παρά τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν παρουσιάζουν κάποια μειονεκτήματα σε σχέση με τις κλασσικές μεθόδους σύνδεσης[1]. Αυτά είναι:

1. Η σύνδεση με κόλλα είναι μόνιμη ενώ η αποσυναρμολόγηση της σύνδεσης είναι δύσκολη και οδηγεί σε βλάβες στα συνδεόμενα στοιχεία.
2. Η αξιοπιστία των συνδέσεων με κόλλα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επεξεργασία των επιφανειών που πρόκειται να συγκολληθούν μεταξύ τους. Η επεξεργασία αυτή απαιτεί έλεγχο των συνθηκών υγρασίας και θερμοκρασίας και συνήθως πραγματοποιείται εντός ειδικών χώρων (clean rooms). Επομένως η επισκευή μιας προυπάρχουσας σύνδεσης μπορεί να είναι εξαιρετικά δύσκολη.
3. Οι συνδέσεις με κόλλα είναι ιδιαίτερα ευάλωτες από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι περισσότεροι τύποι κόλας απορροφούν υγρασία και παρουσιάζουν μειωμένη αντοχή και ολκιμότητα σε αυξημένες θερμοκρασίες. Οι ιδιότητες τους υποβαθμίζονται και από την έκθεσή σε χημικά όπως διαλυτικά βαφής και άλλα διαλύματα.
4. Δεν υπάρχει αξιόπιστος μη καταστροφικός έλεγχος για την αντοχή μιας σύνδεσης με κόλλα. Για να γίνει αυτό πρέπει να κατασκευαστούν δοκίμια με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως η μελετώμενη σύνδεση και να δοκιμαστούν καταστροφικά.
5. Επειδή οι περισσότεροι τύποι κόλλας που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση δομικών στοιχείων ενός αεροσκάφους ή αυτοκινήτου είναι θερμοσκληρυνόμενης πολυμερικής

φύσης, πρέπει να αποθηκεύονται σε ψυχόμενο περιβάλλον κατά τις υποδείξεις του κατασκευαστή. Η έκθεση σε θερμοκρασίες άνω των ορίων που υποδεικνύονται οδηγεί σε υποβάθμιση των ιδιοτήτων της σύνδεσης.

6. Για τη στερεοποίηση της σύνδεσης, κάποιοι τύποι κόλλας απαιτούν την έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες για κάποιο χρονικό διάστημα και έτσι μπορούν να αναπτυχθούν θερμικές τάσεις στα συνδεόμενα στοιχεία. Το φαινόμενο αυτό γίνεται περισσότερο επικίνδυνο όταν συνδέονται πολύστρωτες πλάκες από σύνθετα υλικά.

1.1.1 Διαδικασία κατασκευής μίας σύνδεσης με κόλλα

Σε μία σύνδεση με κόλλα, δύο επιφάνειες από δύο όμοια ή διαφορετικά στοιχεία συνδέονται με τη χρήση ενός τρίτου υλικού που τοποθετείται ανάμεσα στις δύο επιφάνειες. Το τρίτο αυτό υλικό είναι η κόλλα. Η κόλλα συνήθως έχει αρχικά μία παχύρευστη μορφή και με την εφαρμογή συγκεκριμένων συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας για ένα χρονικό διάστημα στερεοποιείται. Κατά τη διαδικασία της στερεοποίησης η κόλλα δημιουργεί σύζευξη με τις συνδεόμενες επιφάνειες με διάφορους μηχανισμούς [2]. Οι μηχανισμοί αυτοί εξελίσσονται σε διαφορετικές κλίμακες και μπορούν να δρουν ξεχωριστά ή σε συνδυασμό. Κάποιοι από αυτούς τους μηχανισμούς είναι:

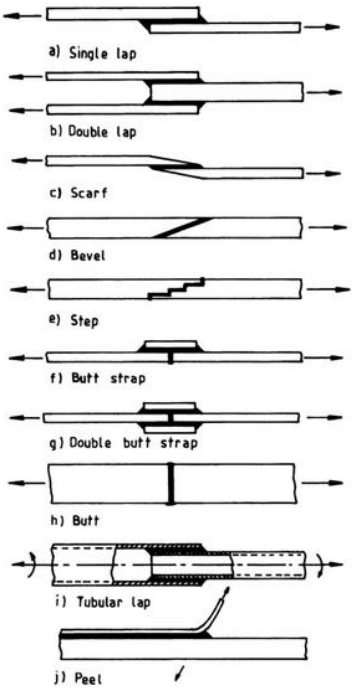
1. Μηχανική σύζευξη όπου το υλικό της κόλλας εισχωρεί σε ανωμαλίες λόγω τραχύτητας της επιφάνειας των συνδεόμενων στοιχείων (mechanical interlocking). Ο μηχανισμός αυτός λαμβάνει χώρα σε μικροσκοπική κλίμακα.
2. Δημιουργία χημικών δεσμών μεταξύ των ατόμων του υλικού της κόλλας και των ατόμων του υλικού των συνδεόμενων στοιχείων. Ο μηχανισμός αυτός λαμβάνει χώρα σε ατομική κλίμακα.
3. Με τη δημιουργία ηλεκτροστατικών δυνάμεων λόγω του φορτίου των επιφανειών. Ο μηχανισμός αυτός λαμβάνει χώρα σε μακροσκοπική κλίμακα.
4. Διάχυση των μορίων της κόλλας στα συνδεόμενα στοιχεία σε μοριακή κλίμακα.

Πριν από την απόθεση της κόλλας στην επιφάνεια των συνδεόμενων στοιχείων είναι απαραίτητο οι συνδεόμενες επιφάνειες να επεξεργαστούν κατάλληλα. Η ποιότητα της επιφανειακής κατεργασίας είναι καθοριστική για την επίτευξη μίας σωστής σύνδεσης. Η επιφανειακή κατεργασία αποσκοπεί στην αύξηση της επιφανειακής ενέργειας και επιφανειακής τάσης των συνδεόμενων επιφανειών και στη βελτίωση της διαβροχής τους από την κόλλα μειώνοντας τη γωνία επαφής της με την επιφάνεια [3]. Τυπικές επιφανειακές επεξεργασίες είναι η λείανση των επιφανειών, η χρήση λειαντικού διαλύματος, η αμμοβολή, η οξυγραφία και η χρήση ταινιών όπως peel-ply.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται η εναπόθεση της κόλλας και η εφαρμογή συγκεκριμένων συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας για κάποιο διάστημα έως ότου η κόλλα στερεοποιηθεί. Τα συνδεόμενα στοιχεία μπορούν να συγκρατούνται στη σωστή θέση με τη χρήση κάποιας ιδιοσυσκευής (jig) ώστε η σύνδεση να αποκτήσει το επιθυμητό σχήμα. Κάποιοι τύποι κόλλας μπορούν να στερεοποιηθούν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος αλλά συνήθως η εφαρμογή υψηλότερης θερμοκρασίας επιταχύνει τη διαδικασία.

1.1.2 Τυπικές διατάξεις συνδέσεων με κόλλα

Οι συνδέσεις με κόλλα που χρησιμοποιούνται σε μηχανολογικές κατασκευές είναι συνήθως τύπου μονής επικάλυψης (Single Lap), διπλής επικάλυψης (Double Lap), τύπου Scarf, Bevel, Step, Butt Strap, Double Butt Strap, Butt και Tubular Lap. Παρακάτω απεικονίζονται οι πιο τυπικές διατάξεις συνδέσεων με κόλλα.



Σχήμα 1.1. Τυπικές διατάξεις συνδέσεων με κόλλα και οι ονομασίες τους [1].

1.1.3 Τύποι κόλλας

Οι τύποι κόλλας που χρησιμοποιούνται σε μηχανολογικές κατασκευές είναι πολυμερικής φύσης [3]:

1. Εποξικές ρητίνες (Epoxies)

   Έχουν υψηλή αντοχή και αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, λειτουργούν σε εύρος -40 έως 180 ^{0}C , το curing για κόλλες 2 μερών μπορεί να πραγματοποιηθεί σε θερμοκρασία δωματίου αλλά επιταχύνεται με εφαρμογή υψηλότερων θερμοκρασιών ενώ για κόλλες 1 συστατικού απαιτείται εφαρμογή θερμοκρασίας. Είναι κόλλες χαμηλού κόστους.

2. Κυανοακρυλικές κόλλες (Cyanoacrylates)

   Γρήγορη δημιουργία σύνδεσης σε πλαστικά και ελαστικά μέρη αλλά έχουν χαμηλή αντίσταση σε υγρασία και σε αυξημένη θερμοκρασία. Εύρος λειτουργίας -30 έως 80 ^{0}C.

3. Αναερόβιες κόλλες (Anaerobics)

   Σχεδιασμένες για συγκράτηση και στεγανοποίηση σε εφαρμογές όπου δεν πρέπει να υπάρξει έκθεση σε οξυγόνο , φως ή σε μεγάλα ποσά θερμότητας. Χρησιμοποιούνται για να συνδέουν κυλινδρικές μορφές. Εύρος λειτουργίας -55 έως 150 ^{0}C . Το curing πραγματοποιείται σε θερμοκρασία δωματίου χωρίς αέρα ή οξυγόνο.

4. Ακρυλικές κόλλες (Acrylics)

   Κόλλες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πληθώρα εφαρμογών, με γρήγορους χρόνους για curing και μπορούν να ανεχθούν φτωχά κατεργασμένες επιφάνειες. Εύρος λειτουργίας -40 έως 120 ^{0}C.

5. Πολυουρεθάνες (Polyurethanes)

   Κόλλες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές χαμηλών θερμοκρασιών, έχουν καλή αντίσταση σε κόπωση και σε κρούση. Εύρος λειτουργίας -200 έως 80 ^{0}C . Το curing πραγματοποιείται σε θερμοκρασία δωματίου.

6. Σιλικόνες (Silicones)

   Κόλλες που έχουν εξαιρετικές στεγανοποιητικές ικανότητες σε εφαρμογές χαμηλών τάσεων, αντίσταση σε υψηλές θερμοκρασίες, είναι εύπλαστες, ικανές να συνδέσουν ή να σφραγίσουν υλικά διαφορετικού τύπου. Έχουν χαμηλή αντοχή και αργό curing. Εύρος λειτουργίας -60 έως 350 ^{0}C . Το curing πραγματοποιείται σε θερμοκρασία δωματίου.

7. Φαινόλες (Phenolics)

   Κόλλες που διατηρούν την αντοχή τους για μικρά χρονικά διαστήματα, περιορισμένη αντίσταση σε θερμικά σοκ. Εύρος λειτουργίας -40 έως 260 ^{0}C . Το curing πραγματοποιείται με εφαρμογή θερμοκρασίας και υψηλών πιέσεων.

8. Πολυιμιδικές κόλλες (Polyimides)

   Κόλλες που έχουν θερμική σταθερότητα αλλά είναι δύσκολη η κατεργασία τους. Εύρος λειτουργίας -40 έως 300 ^{0}C . Το curing πραγματοποιείται με εφαρμογή θερμοκρασίας και υψηλών πιέσεων.

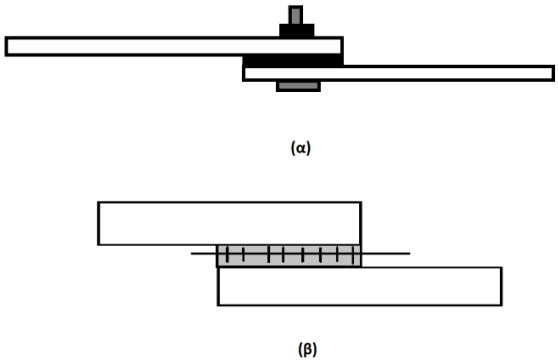
9. Βισμαλειμιδικές κόλλες (Bismaleimides)

   Κόλλες που παρουσιάζουν στιβαρότητα αλλά έχουν χαμηλή αντοχή σε φόρτιση αποκόλλησης (peel). Εύρος λειτουργίας -50 έως 230 ^{0}C . Το curing πραγματοποιείται με εφαρμογή θερμοκρασίας και υψηλών πιέσεων.

1.1.4 Μέθοδοι ενίσχυσης σε συνδέσεις με κόλλα

Για την επίτευξη μεγαλύτερης αξιοπιστίας ως προς την αντοχή μίας σύνδεσης με κόλλα είναι κοινή πρακτική η ενίσχυση της σύνδεσης με διάφορες μεθόδους [4]. Οι μέθοδοι αυτοί αποσκοπούν στην επιβράδυνση ή ακόμα και τη διακοπή της αποκόλλησης. Οι ενισχυτικοί μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται για αυτό το σκοπό είναι οι μηχανικές ενισχύσεις όπως ήλοι και κοχλίες σύσφιξης, οι γεωμετρικής τροποποιήσεις όπως αυλακώσεις στην σύνδεση, η τροποποίηση της δομής της κόλλας με χρήση μεταλλικού πλέγματος ή ενίσχυση της κόλλας με διαφορετικά υλικά και η παρεμβολή ενισχύσεων στην διεπιφάνεια κόλλας-συνδεόμενων τμημάτων όπως είναι το μεταλλικό πλέγμα μεταξύ κόλλας και συνδεόμενης πλάκας.

Η χρήση ήλων και κοχλιών σύσφιξης κατά το πάχος της σύνδεσης χρησιμεύει στην παραλαβή φορτίων που τείνουν να απομακρύνουν τις επιφάνειες κόλλησης μεταξύ τους και την μείωση της παραμόρφωσης στην κατά το πάχος διεύθυνση, επιβραδύνοντας την αποκόλληση. Η χρήση αυλακώσεων μπορεί να επιβραδύνει την αποκόλληση με την δημιουργία θλιπτικών τάσεων στην περιοχή της αυλάκωσης. Το μεταλλικό πλέγμα ή η ενίσχυση με διαφορετικά υλικά αποτελούν εμπόδια στην εξέλιξη της αποκόλλησης και τείνουν να την επιβραδύνουν. Ένα μεταλλικό πλέγμα που παρεμβάλλεται στη διεπιφάνεια μεταξύ της κόλλας και του συνδεόμενου τμήματος προσφέρει πρόσθετη μηχανική σύζευξη μειώνοντας την παράλληλη μετατόπιση των συνδεόμενων πλακών.



Σχήμα 1.2. Ενισχύσεις συνδέσεων με κόλλα: (α) χρήση κοχλία σύσφιξης, (β) χρήση μεταλλικού πλέγματος.

1.2 Περιγραφή του προβλήματος

Στις σύγχρονες αεροναυπηγικές κατασκευές όπου χρησιμοποιούνται σύνθετα υλικά, οι συνδέσεις δομικών στοιχείων επιτυγχάνονται κατά κύριο λόγο με τη χρήση κοχλιών ή ήλων. Τέτοιου είδους συνδέσεις όμως προκαλούν βλάβες των συνθέτων υλικών που χρησιμοποιούνται στη σύνδεση και για αυτό το λόγο οδηγούν σε υπερδιαστασιολόγηση κατά το σχεδιασμό. Αυτή η υπερδιαστασιολόγηση των συνθέτων υλικών αυξάνει το συνολικό βάρος της κατασκευής. Αντιθέτως, η χρήση κόλλας για τη σύνδεση δομικών στοιχείων από σύνθετα υλικά σε αεροναυπηγικές κατασκευές δεν προκαλεί τέτοιου είδους βλάβες και λόγω των πλεονεκτημάτων που προαναφέρθηκαν, αποτελεί μία προσιτή λύση για την αντικατάσταση μηχανικών μέσων σύνδεσης όπως οι κοχλίες και οι ήλοι. Όμως λόγω της χαμηλής αξιοπιστίας της μηχανικής συμπεριφοράς μίας κόλλας, η χρήση της σε συνδέσεις δομικών στοιχείων πραγματοποιείται μόνο σε συνδυασμό με κοχλίες ή ήλους για την περίπτωση απρόσμενης αστοχίας της κόλλας. Τα τελευταία χρόνια πραγματοποιείται έντονη προσπάθεια για την ανάπτυξη υπολογιστικών εργαλείων που θα είναι ικανά να προβλέψουν επαρκώς την συμπεριφορά μίας σύνδεσης με κόλλα σε στατικές φορτίσεις αλλά και σε φορτίσεις κόπωσης.

1.3 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η αριθμητική μελέτη της επίδρασης της χρήσης κοχλιών ως μηχανισμούς επιβράδυνσης της αποκόλλησης σε συνδέσεις μονής επικάλυψης πολύστρωτων

πλακών με κόλλα υπό φόρτιση κόπωσης. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται το πακέτο ανάλυσης LS DYNA στο οποίο εξετάζονται μοντέλα με κοχλία και χωρίς κοχλία.

Για την προσομοίωση της κόπωσης προγραμματίζεται και χρησιμοποιείται υπορουτίνα που τροποποιεί τη μέθοδο της ζώνης συνοχής για την κόλλα ώστε να υπάρχει υποβάθμιση της αντοχής λόγω κόπωσης. Επομένως ο δεύτερος σκοπός της εργασίας είναι να εξεταστεί η λειτουργία της υπορουτίνας και η συμπεριφορά των παραμέτρων που αυτή χρησιμοποιεί για τις περιπτώσεις απλής γεωμετρίας και της γεωμετρίας που προκύπτει λόγω της παρουσίας των κοχλιών.

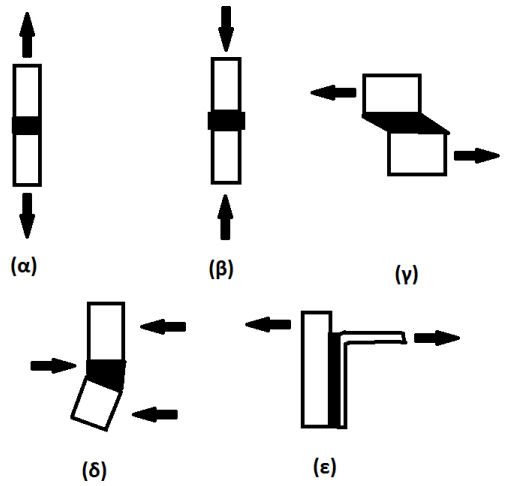
1.4 Δομή της εργασίας

Στο **κεφάλαιο 1** παρουσιάζονται εισαγωγικές έννοιες για τις συνδέσεις με κόλλα, το γενικό πρόβλημα καθώς και ο σκοπός της εργασίας. Στο **κεφάλαιο 2** πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση των πειραματικών και υπολογιστικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται για συνδέσεις με κόλλα. Στο **κεφάλαιο 3** παρουσιάζονται οι υπολογιστικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στην εργασία και το θεωρητικό υπόβαθρό τους. Στο **κεφάλαιο 4** παρουσιάζεται το πρόβλημα που αναλύεται με το LS DYNA και οι λεπτομέρειες μοντελοποίησης των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιούνται. Στο **κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων και τέλος στο **κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας και οι προτάσεις για μελλοντική εργασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Τύποι φόρτισης συνδέσεων με κόλλα

Οι κύριες φορτίσεις που δέχεται μία σύνδεση με κόλλα είναι ο εφελκυσμός (tension), η θλίψη (compression), η διάτμηση (shear), η διάσπαση (cleavage) και η αποκόλληση (peel) [5]. Οι φορτίσεις αυτές απεικονίζονται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 2.1. Φορτίσεις σύνδεσης με κόλλα: (α) εφελκυσμός, (β) θλίψη, (γ) διάτμηση, (δ) διάσπαση, (ε) αποκόλληση

Ο εφελκυσμός που προκύπτει όταν εφελκυστικές φορτίσεις δρουν κάθετα στο επίπεδο της κόλλησης, οδηγεί στην ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων κατά το πάχος του στρώματος της κόλλας. Επειδή η εφελκυστική αντοχή μίας κόλλας είναι χαμηλή, ο εφελκυσμός του στρώματος της κόλλας δεν είναι επιθυμητός κατά τη λειτουργία της σύνδεσης.

Θλιπτικές τάσεις στην κόλλα προκύπτουν όταν υπάρχουν θλιπτικά φορτία που δρουν κάθετα στην επιφάνεια της κόλλησης και τα συνδεόμενα τμήματα τείνουν να πλησιάσουν το ένα με το άλλο. Η θλιπτική αντοχή των περισσότερων ειδών δομικών κολλών είναι υψηλή και για αυτό το λόγο αυτού του είδους η φόρτιση δεν θεωρείται επικίνδυνη.

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Εφαρμοσμένης Μηχανικής,

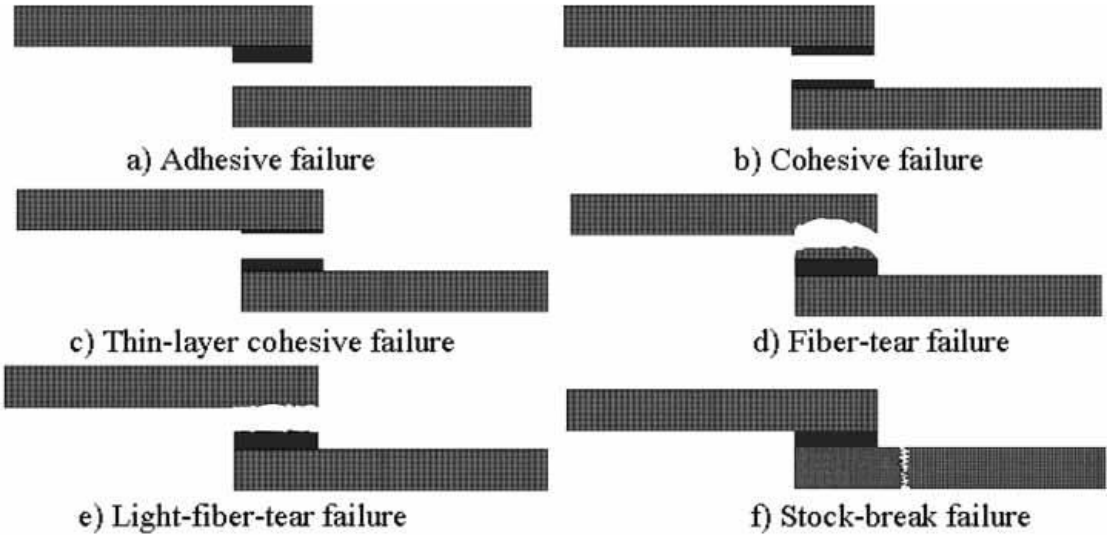
Όταν τα φορτία της σύνδεσης ασκούνται παράλληλα προς το επίπεδο της κόλλησης τότε αναπτύσσονται διατμητικές τάσεις στην κόλλα. Η αντοχή των συνδέσεων με κόλλα που φορτίζονται σε διάτμηση είναι υψηλή καθώς ολόκληρη η επιφάνεια της κόλλας συνεισφέρει στην αντοχή. Για αυτό το λόγο οι συνδέσεις με κόλλα σχεδιάζονται ώστε να φορτίζονται με όσο το δυνατό καθαρά διατμητικά φορτία.

Στις περισσότερες εφαρμογές, λόγω εκκεντρότητας της φόρτισης αναπτύσσονται τάσεις απόσχισης: διάσπασης (cleavage stress) και αποκόλλησης (peel stress). Οι τάσεις αυτές είναι ορθές και συγκεντρώνονται τοπικά σε γεωμετρικές ιδιαιτερότητες όπως είναι τα άκρα της σύνδεσης. Οι τάσεις αυτές είναι τοπικά πολύ υψηλές και μειώνουν σημαντικά την αντοχή μίας σύνδεσης με κόλλα. Κατά το σχεδιασμό μιας σύνδεσης θα πρέπει να γίνεται προσπάθεια οι τάσεις απόσχισης να είναι όσο το δυνατό χαμηλότερες.

2.2 Αστοχία μιας σύνδεσης με κόλλα

Ο τύπος της αστοχίας μιας σύνδεσης με κόλλα εξαρτάται από τη ποιότητα του δεσμού στις πάνω και κάτω διεπιφάνειες του στρώματος της κόλλας, τη γεωμετρία της σύνδεσης και το τρόπο φόρτισής της [3]. Για συνδέσεις με σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας (FRP) διακρίνονται επτά τύποι αστοχίας της σύνδεσης. Αυτοί είναι:

1) Αστοχία της διεπιφάνειας του στρώματος κόλλας – συνδεόμενου κομματιού (Adhesive Failure).
2) Αστοχία συνοχής του στρώματος της κόλλας (Cohesive Failure).
3) Αστοχία συνοχής λεπτού στρώματος της κόλλας (Thin Layer Cohesive Failure) όπου το στρώμα της κολλας αστοχεί πολύ κοντά στην διεπιφάνεια με την πολύστρωτη πλάκα.
4) Αστοχία λόγω απόσχισης των ινών του FRP (Fiber-Tear Failure) όπου η πολύστρωτη πλάκα αστοχεί και ένα αρκετά μεγάλο τμήμα της παραμένει πάνω στο στρώμα της κόλλας.
5) Αστοχία λόγω απόσχισης των ινών του FRP λεπτού στρώματος (Thin Layer Fiber-Tear Failure) όπου η πολύστρωτη πλάκα αστοχεί και ένα λεπτό στρώμα της παραμένει πάνω στο στρώμα της κόλλας..
6) Αστοχία του κορμού του FRP μακριά από το overlap (Stock-Break Failure).
7) Αστοχία μικτού τύπο των παραπάνω (Mixed Failure).



Σχήμα 2.2. Τύποι αστοχίας συνδέσεων με κόλλα [3].

Είναι επιθυμητό η αστοχία να μην συμβαίνει κοντά στην διεπιφάνεια της κόλλας με τα συνδεόμενα μέρη καθώς αυτό υποδεικνύει φτωχή επιφανειακή προετοιμασία πριν από τη σύνδεση και συμβαίνει σε φορτίσεις μικρότερες από την θεωρητική αντοχή της κόλλας. Επίσης ανεπιθύμητη είναι η αστοχία των FRP συνδεόμενων μερών λόγω ανάπτυξης ορθών τάσεων κατά το πάχος της σύνδεσης (peel stress). Αντίθετα είναι επιθυμητό η αστοχία να είναι τύπου συνοχής (Cohesive) εσωτερικά του στρώματος της κόλλας.

2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή μιας σύνδεσης με κόλλα

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή μίας σύνδεσης με κόλλα [3] είναι η επιφανειακή κατεργασία των πολύστρωτων πλακών πριν από τη σύνδεση, η διάταξη της σύνδεσης (π.χ. Single Lap, Double Lap, Scarf κ.τ.λ.), το υλικό και οι μηχανικές ιδιότητες της κόλλας και των συνδεόμενων πλακών (adherends) και η επίδραση περιβαλλοντικών παραγόντων όπως έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες και η παρουσία υγρασίας.

Μία σωστή επιφανειακή κατεργασία πριν είναι απαραίτητη για την δημιουργία ισχυρών δεσμών μεταξύ της κόλλας και των adherends. Αυτοί οι δεσμοί είναι που μεταφέρουν τα φορτία

μεταξύ των adherends και η μέγιστη αντοχή της σύνδεσης εξαρτάται από το πόσο ισχυροί είναι αυτοί. Σε περίπτωση κακής επιφανειακής διεργασίας, η σύνδεση θα αστοχήσει στην διεπιφάνεια σε φορτίο μικρότερο από το προβλεπόμενο.

Η διάταξη της σύνδεσης θα πρέπει να σχεδιαστεί κατάλληλα ώστε να ελαχιστοποιεί συγκεντρώσεις τάσεων και τάσεις κατά το πάχος (through thickness) της σύνδεσης. Οι through thickness τάσεις είναι ιδιαίτερα καταστροφικές σε περίπτωση που τα adherends είναι τύπου FRP καθώς αυτού του τύπου τα υλικά έχουν χαμηλή αντοχή στη διεύθυνση αυτή. Κατά το σχεδιασμό επιδιώκεται οι τάσεις που θα αναπτυχθούν στην κόλλα να είναι κυρίως διατμητικές ή θλιπτικές. Η κατάλληλη διαμόρφωση των άκρων του overlap της κόλλας όσο και των adherends μπορεί να αυξήσει την αντοχή μίας σύνδεσης. Η διαμόρφωση του υλικού της κόλλας που υπερχειλίζει των άκρων του overlap (spew), το οποίο δημιουργείται κατά τη κατασκευή της σύνδεσης και η διαμόρφωση των εσωτερικών ή εξωτερικών γωνιών των adherends μπορούν να αλλάξουν τη τιμή του φορτίου αστοχίας. Αυτό συμβαίνει επειδή τα άκρα του overlap είναι σημεία συγκέντρωσης τάσεων.

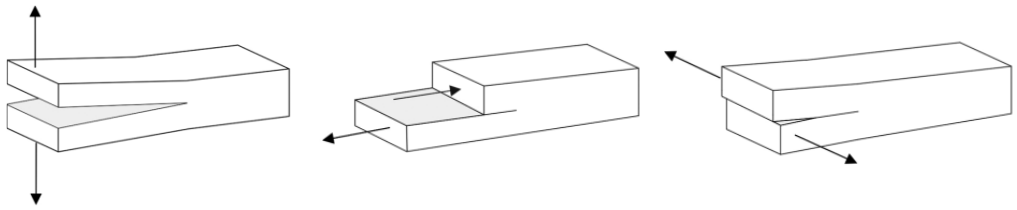
Ο τύπος της κόλλας που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να έχει χαρακτηριστικά είναι κατάλληλα για την εκάστοτε εφαρμογή. Οι μηχανικές ιδιότητες όπως το μέτρο ελαστικότητας και η όλκιμη ή ψαθυρή συμπεριφορά της κόλλας (καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης) θα πρέπει να είναι γνωστές για τις συνθήκες λειτουργίας της σύνδεσης. Επίσης οι τιμές των ιδιοτήτων της κόλλας και των adherends δεν θα πρέπει να έχουν μεγάλες διαφορές επειδή δημιουργούνται συγκεντρώσεις τάσεων στην διεπιφάνεια.

Η έκθεση μίας σύνδεσης σε υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να προκαλέσει μόνιμες αλλαγές στη χημική σύνθεση και τη φυσική σύσταση της κόλλας. Οι αλλαγές αυτές ενδέχεται να μειώσουν σε μεγάλο βαθμό την αντοχή της σύνδεσης. Η παρουσία υγρασίας μπορεί να οδηγήσει σε πλαστικοποίηση και διόγκωση της πολυμερικής μήτρας των adherends, εάν αυτά είναι FRP και να υποβαθμίσει σημαντικά τις ιδιότητες του και κατά συνέπεια τις αντοχές της σύνδεσης. Οι διαφορές θερμοκρασίας δημιουργούν επίσης παραμένουσες τάσεις σε adherends τύπου FRP μειώνοντας την αντοχή τους.

2.4 Τύποι αστοχίας σε συνδέσεις με κόλλα

Σύμφωνα με τον Irwin [6], το τασικό πεδίο στο άκρο της ρωγμής οδηγεί σε τρεις τύπους παραμόρφωσης της ρωγμής αναλόγως τον τύπο της εξωτερικά επιβαλλόμενης φόρτισης. Οι κυριότεροι τύποι διάδοσης της ρωγμής αποκόλλησης μιας σύνδεσης με κόλλα, οι οποίοι μπορούν να περιγράψουν τον τρόπο με τον οποίο διαδίδεται η αποκόλληση υπό οποιαδήποτε εξωτερική φόρτιση που μπορεί να επιβληθεί είναι οι τύποι I, II, και III.

Κατά τον τύπο φόρτισης I η φόρτιση ασκείται κάθετα στο επίπεδο της ρωγμής και τα χείλη της ρωγμής αποκόλλησης απομακρύνονται το ένα από το άλλο επίσης κάθετα στο επίπεδο της (**ανοίγουσα μορφή**). Στον τύπο φόρτισης II οι επιφάνειες της ρωγμής αποκόλλησης ολισθαίνουν μεταξύ τους (**ολισθαίνουσα μορφή**) κάθετα προς την ακμή της ρωγμής. Στον τύπο III οι επιφάνειες της ρωγμής αποκόλλησης ολισθαίνουν μεταξύ τους παράλληλα προς την ακμή της ρωγμής (**μορφή απόσχισης**). Οι τρεις τύποι απεικονίζονται στο σχήμα που ακολουθεί.



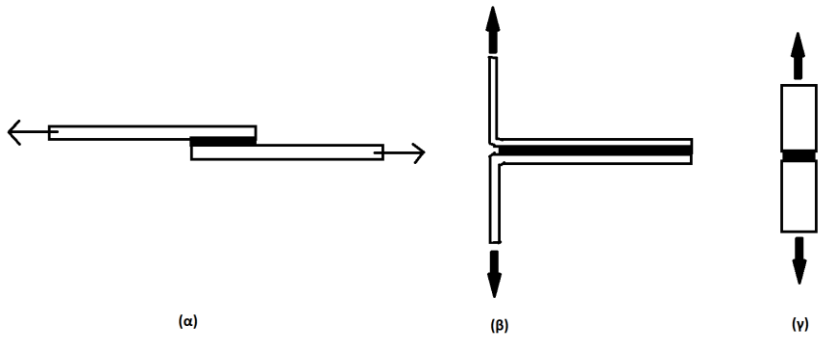
(α) (β) (γ)

Σχήμα 2.3. Τύποι φόρτισης I (α), II (β) και III (γ) συνδέσεων με κόλλα[7].

2.5 Πειραματικός χαρακτηρισμός συνδέσεων με κόλλα

Ο πειραματικός χαρακτηρισμός συνδέσεων με κόλλα πραγματοποιείται με μηχανικές δοκιμές για την μέτρηση της αντοχής της σύνδεσης υπό διάφορες φορτίσεις και για την μέτρηση μεγεθών της θραυστομηχανικής τα οποία είναι ο ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας και ο συντελεστής έντασης τάσης. Στις μηχανικές δοκιμές για την μέτρηση της αντοχής της σύνδεσης εντάσσονται οι δοκιμές διάτμησης της κόλλας σε συνδέσεις μονής ή διπλής επικάλυψης (Single Lap Shear-SLS και

Double Lap Shear-DLS), οι δοκιμές T-αποκόλλησης (T-peel) και οι δοκιμές εφελκυσμού της κόλλας (butt-tension).



Σχήμα 2.4. Μηχανικές δοκιμές για αντοχή της σύνδεσης: (α)Δοκιμή μονής επικάλυψης (β) T-αποκόλληση III (γ) Δοκιμή εφελκυσμού

Η μέτρηση των τιμών του ρυθμού απελευθέρωσης ενέργειας και του συντελεστή έντασης τάσης έχουν μεγάλη χρησιμότητα καθώς τα μεγέθη αυτά μπορούν να περιγράψουν την εξέλιξη της αποκόλλησης. Ο ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας G ορίζεται ως η απώλεια ενέργειας dU ανά μονάδα πλάτους b του δοκιμίου κατά τη διάδοση της ρωγμής αποκόλλησης για μήκος dα.

$$G = \frac{1}{b}\frac{dU}{d\alpha} \quad (2.1)$$

Η δυσθραυστότητα μιας σύνδεσης με κόλλα ορίζεται ως η κρίσιμη τιμή του ρυθμού απελευθέρωσης ενέργειας Gc και είναι ένα πολύ σημαντικό μέγεθος καθώς όταν ο ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας G ξεπεράσει την κρίσιμη τιμή Gc η αποκόλληση διαδίδεται. Για κάθε τύπο θραύσης Mode I,II και III υπάρχει αντίστοιχη κρίσιμη τιμή GIc, GIIc και GIIIc.

2.5.1 Πειραματική μέτρηση κρίσιμου ρυθμού απελευθέρωσης ενέργειας για τύπο θραύσης I

Η πειραματική μέτρηση του GIc πραγματοποιείται με το δοκίμιο διπλής προβόλου δοκού (Double Cantilever Beam-DCB) στο οποίο δύο τμήματα ίδιου πάχους και πλάτους συνδέονται μεταξύ τους

με κόλλα. Η κόλλα δεν εφαρμόζεται σε όλο το μήκος των συνδεόμενων τμημάτων αλλά υπάρχει ένα μήκος χωρίς κόλλα στη μία πλευρά που αντιστοιχεί στο αρχικό μήκος ρωγμής. Η φόρτιση εφαρμόζεται κατακόρυφα μέσω κάποιων πλακιδίων (tabs) που συνδέονται με κόλλα πάνω στα συνδεόμενα τμήματα. Η μέτρηση πραγματοποιείται σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D5528-01 [8] το οποίο προορίζεται για εφαρμογή σε ινώδη σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας (CFRP) αλλά μπορεί να εφαρμοστεί και σε συνδέσεις αυτών των υλικών με κόλλα. Για συνδέσεις με κόλλα υπάρχουν τα πρότυπα AITM 1.00053 [9] και ISO 25217:2009 [10].

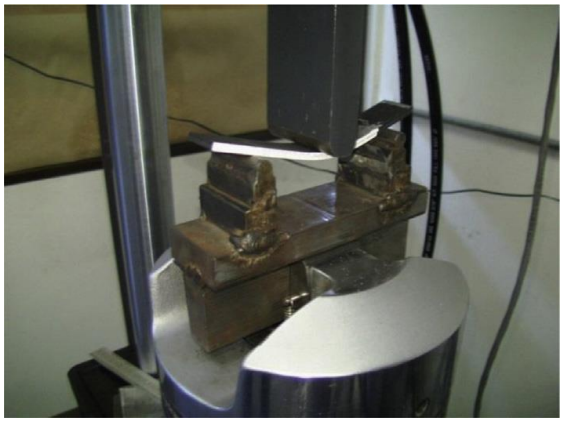


Σχήμα 2.5. Δοκίμιο διπλής προβόλου δοκού [11]

2.5.2 Πειραματική μέτρηση κρίσιμου ρυθμού απελευθέρωσης ενέργειας για τύπο θραύσης ΙΙ

Η πειραματική μέτρηση του GIIc πραγματοποιείται συνήθως με το δοκίμιο κάμψης τριών σημείων με εγκοπή στο άκρο (End Notch Flexure-ENF). Άλλοι τύποι δοκιμίων που χρησιμοποιούνται είναι το δοκίμιο κάμψης τεσσάρων σημείων με εγκοπή στο άκρο (4 point End Notch Flexure-4ENF) και το δοκίμιο με εγκοπή και φόρτιση στο άκρο (End-Loaded Split-ELS). Στο δοκίμιο ENF συνδέονται δύο τμήματα με κόλλα ενώ υπάρχει ένα μήκος το οποίο δεν είναι κολλημένο που αντιστοιχεί στο αρχικό μήκος ρωγμής. Η φόρτιση πραγματοποιείται με έναν κύλινδρο ο οποίος πιέζει το κέντρο του δοκιμίου ενώ αυτό στηρίζεται πάνω σε δύο κυλίνδρους. Με αυτόν το τρόπο δημιουργείται διατμητικό φορτίο στην κορυφή της ρωγμής. Το δοκίμιο ENF βασίζεται στο πρότυπο ASTM D7905-14 [12].

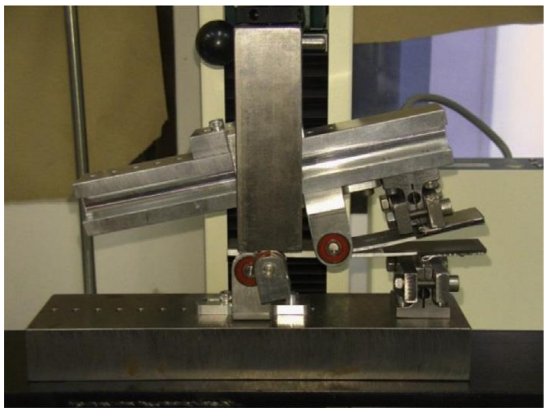
Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Εφαρμοσμένης Μηχανικής,



Σχήμα 2.6. Δοκίμιο κάμψης τριών σημείων με εγκοπή στο άκρο [11]

2.5.3 Πειραματική μέτρηση κρίσιμου ρυθμού απελευθέρωσης ενέργειας για μικτό τύπο θραύσης I+II

Η πειραματική μέτρηση της τιμής της δυσθραυστότητας για περιπτώσεις όπου υπάρχει μικτός τύπος θραύσης I+II, όπως συμβαίνει στις περισσότερες εφαρμογές, πραγματοποιείται με μία διάταξη που προδιαγράφεται από το πρότυπο ASTM D6671-06 [13] για κάμψη μικτού τύπου (Mixed Mode Bending-MMB). Η διάταξη αυτή αποτελεί ένα συνδυασμό του δοκιμίου διπλής προβόλου δοκού και του δοκιμίου κάμψης τριών σημείων με εγκοπή στο άκρο.



Σχήμα 2.7. Διάταξη Mixed Mode Bending [11]

2.5.4 Πειραματικές μελέτες συνδέσεων με κόλλα σε κόπωση

Η συμπεριφορά συνδέσεων με κόλλα σε συνθήκες κόπωσης έχει μελετηθεί πειραματικά κυρίως υπό Mode I φόρτιση. Οι Ashcroft και Shaw [14] εξέτασαν την επίδραση της θερμοκρασίας στη διάδοση ρωγμής κόπωσης υπό φόρτιση τύπου I σε συνδέσεις συνθέτων υλικών με κόλλα. Παρατήρησαν σημαντική επίδραση της θερμοκρασίας στον τόπο της αστοχίας και στην διάδοση ρωγμής κόπωσης.

Στη εργασία των Fernández, De Moura και Da Silva [15] πραγματοποιήθηκε πειραματική μελέτη της συμπεριφοράς σε κόπωση συνδέσεων σύνθετων υλικών ινών άνθρακα – εποξικής ρητίνης με κόλλα υπό φόρτιση τύπου I. Συγκεκριμένα χρησιμοποίησαν δοκίμια διπλής προβόλου δοκού για να υπολογίσουν τον κρίσιμο ρυθμό απελευθέρωσης ενέργειας GIc και τον ρυθμό διάδοσης της ρωγμής κόπωσης. Επίσης σύγκριναν διάφορες μεθόδους εύρεσης του κρίσιμου ρυθμού απελευθέρωσης ενέργειας.

Οι de Moura, Gonçalves και Fernández [16] πραγματοποίησαν πειραματικές και αριθμητικές μελέτες για την συμπεριφορά σε κόπωση συνδέσεων συνθέτων υλικών άνθρακα/εποξικής ρητίνης με κόλλα υπό φόρτιση τύπου I, τύπου II και μικτού τύπου I+II. Χρησιμοποίησαν τα πειραματικά αποτελέσματα για να εξάγουν τροποποιημένους νόμους Paris τους οποίους στη συνέχεια χρησιμοποίησαν για τις αριθμητικές αναλύσεις. Οι αριθμητικές αναλύσεις κατάφεραν να προσεγγίσουν με αρκετή ακρίβεια τα πειραματικά αποτελέσματα στη περιοχή ισχύος του νόμου Paris.

2.6 Αναλυτικές λύσεις για συνδέσεις με κόλλα

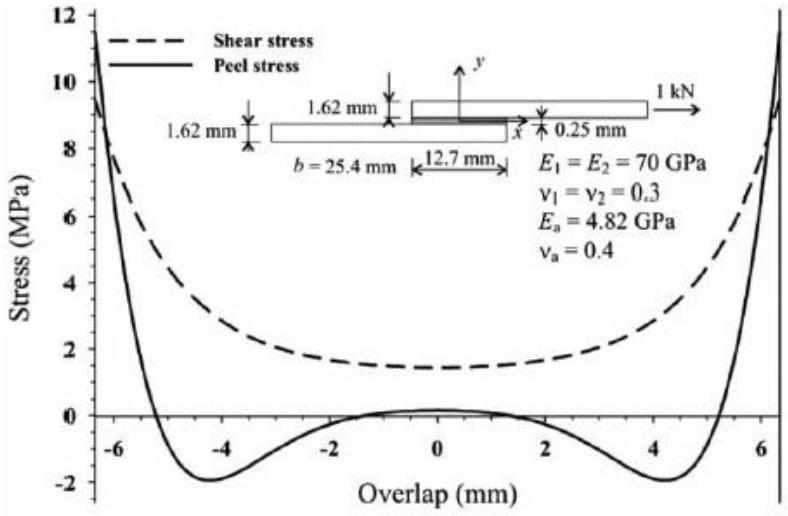
Οι συνδέσεις με κόλλα έχουν μελετηθεί ως προς την εύρεση αναλυτικών σχέσεων κλειστής μορφής για την περιγραφή του τασικού πεδίου που αναπτύσσεται στην κόλλα. Η πιο απλή προσέγγιση σε ένα SLS δοκίμιο θεωρεί ότι η κόλλα παραλαμβάνει διατμητική τάση η οποία είναι σταθερή κατά το μήκος του overlap και ισούται με το φορτίο που εφαρμόζεται στα άκρα προς το εμβαδό του overlap.

Στη προσέγγιση των Volkersen et.al. [17] θεωρήθηκε πως η κόλλα παραμορφώνεται μόνο διατμητικά αλλά οι συνδεόμενες πλάκες έχουν ελαστική συμπεριφορά και μπορούν να παραμορφωθούν σε εφελκυσμό. Εφάρμοσαν την θεώρηση σε SLS δοκίμιο με δισδιάστατη

γραμμικά ελαστική ανάλυση και βρήκαν ότι η διατμητική τάση έχει μέγιστη τιμή στα άκρα του overlap ενώ είναι μικρότερη στο μέσο.

Η προηγούμενη προσέγγιση δεν λαμβάνει υπόψη τη ροπή κάμψης και τη περιστροφή της σύνδεσης που δημιουργούνται από την εκκεντρότητα του φορτίου σε ένα SLS δοκίμιο. Οι Goland και Reissner [18] συμπεριέλαβαν στην προσέγγισή τους το φαινόμενο αυτό και έδειξαν πως πέρα των διατμητικών τάσεων αναπτύσσονται και ορθές τάσεις κατά το πάχος της κόλλας (peel stress). Οι ορθές αυτές τάσεις λαμβάνουν μεγάλες τιμές στα άκρα του overlap , μεγαλύτερες από αυτές της ανάλυσης των Voklersen et.al. Στο σχήμα 2.1 απεικονίζεται η κατανομή των τάσεων κατά το μήκος του overlap και η σύνδεση SLS στην οποία εφαρμόστηκε η ανάλυση.

Οι Hart και Smith [19] εφάρμοσαν δισδιάστατη ελάστο-πλαστική ανάλυση σε SLS και DLS συνδέσεις λαμβάνοντας υπόψη τη πλαστικότητα της κόλλας θεωρώντας ότι η αρχικά ελαστική της συμπεριφορά ακολουθείται από μία τέλεια πλαστική συμπεριφορά. Οι αντοχές των συνδέσεων που προέκυψαν με αυτή τη μέθοδο ήταν μεγαλύτερες από αυτές των ελαστικά γραμμικών προσεγγίσεων. Επιπλέον έδειξαν ότι σε DLJ συνδέσεις οι ορθές peel τάσεις στην κόλλα είναι μικρότερες σε σχέση με τις SLS συνδέσεις λόγω της εξισορρόπησης της εκκεντρότητας του εξωτερικού φορτίου.



Σχήμα 2.8. Κατανομή διατμητικής τάσης στην κόλλα κατά το μήκος του overlap σε SLS δοκίμιο με την λύση των Volkersen et.al.[17].

2.7 Υπολογιστικές μέθοδοι

Η μη-γραμμικότητα της συμπεριφοράς μίας σύνδεσης με κόλλα έχει οδηγήσει στην ανάγκη εύρεσης υπολογιστικών μεθόδων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων για την μοντελοποίηση της συμπεριφοράς της σύνδεσης.

Οι κυριότερες υπολογιστικές μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί είναι η τεχνική εικονικού κλεισίματος της ρωγμής VCCT (Virtual Crack Closure Technique) και η μέθοδος της ζώνης συνοχής CZM (Cohesive Zone Method).

Η τεχνική VCCT [20] βασίζεται στη γραμμικά ελαστική θραυστομηχανική και είναι μία μέθοδος υπολογισμού του ρυθμού απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης SERR (Strain Energy Release Rate) θεωρώντας ότι η ενέργεια που απελευθερώνεται για την διάδοση μίας ρωγμής κατά ένα μήκος Δα είναι ίση με την ενέργεια που απαιτείται για να κλείσει η ρωγμή κατά το ίδιο μήκος Δα. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται κάποιο κριτήριο διάδοσης της ρωγμής που συγκρίνει τον ρυθμό απελευθέρωσης ενέργειας στη κορυφή της ρωγμής με την κρίσιμη τιμή του. Η τεχνική αυτή είναι ενσωματωμένη σε πολλά εμπορικά πακέτα πεπερασμένων στοιχείων και χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση της διάδοσης αποκόλλησης σε σύνθετα υλικά και σε κόλλες.

Η μέθοδος της ζώνης συνοχής χρησιμοποιείται για τους ίδιους σκοπούς και είναι επίσης ευρέως χρησιμοποιούμενη σε κώδικες πεπερασμένων στοιχείων. Βασίζεται στην προοδευτική συσσώρευση βλάβης του υλικού (progressive damage mechanics) και προτάθηκε από τους Dugdale [21] και Barenblatt [22] . Σε κώδικες πεπερασμένων στοιχείων για μοντελοποίηση συνδέσεων με κόλλα, η κόλλα αποτελείται από μία στρώση πεπερασμένων στοιχείων τα οποία ορίζουν τη ζώνη συνοχής. Η ζώνη αυτή μπορεί να περιγράφει ολόκληρη την κόλλα, οπότε και έχει πεπερασμένο πάχος ή μπορεί να περιγράφει την διεπιφάνεια μεταξύ της κόλλας και των πολύστρωτων πλακών και να έχει μηδενικό πάχος. Οι κυριότερες παράμετροι που απαιτεί η χρήση της CZM είναι η κρίσιμη τιμή του SERR για τον τύπο της φόρτισης που εξετάζεται και η αντοχή του υλικού της κόλλας.

Η μέθοδος CZM είναι πολύ πιο απλή στην εφαρμογή της σε σχέση με την VCCT και είναι αυτή που χρησιμοποιείται σε αυτήν την εργασία. Η μέθοδος περιγράφεται λεπτομερώς σε επόμενα κεφάλαια.

2.7.1 Μέθοδος ζώνης συνοχής για στατική φόρτιση

Στην εργασία των Ungsuwarungsri και Knauss [23] προτάθηκαν μορφές καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης για σύνθετα υλικά και κόλλες που παρουσιάζουν υποβάθμιση ιδιοτήτων λόγω συσσώρευσης βλάβης. Πραγματοποίησαν αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία για να εξετάσουν την εγκυρότητα των καμπυλών.

Οι Tvergaard και Hutchinson [24] εξέτασαν σύνδεση με κόλλα υπό Mode I φόρτιση με την μέθοδο της ζώνης συνοχής και εξήγαγαν καμπύλες αντίστασης στη διάδοση ρωγμής (R curves) συναρτήσει τριών παραμέτρων: το πάχος του στρώματος της κόλλας, τη διαφορά των μέτρων ελαστικότητας μεταξύ της κόλλας και των συνδεόμενων πλακών (adherends) και των αρχικών παραμενουσών τάσεων της σύνδεσης.

Οι Sorensen και Jacobsen [25] χρησιμοποίησαν τη μέθοδο του J ολοκληρώματος για να εξάγουν νόμους συνοχής για DCB δοκίμιο. Οι περιπτώσεις που εξέτασαν ήταν αποκόλληση σε σύνδεση με κόλλα και διαχωρισμός στρώσεων σε UD υλικό πολυμερικής μήτρας με ενίσχυση ινών άνθρακα. Οι αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποίησαν χρησιμοποιώντας τους νόμους συνοχής είχαν καλή συμφωνία με τα πειράματα.

Οι Li et.al. σε μία σειρά εργασιών τους [26,27,28,29] εφάρμοσαν τη μέθοδο ζώνης συνοχής σε διαφορετικές περιπτώσεις. Στην [26] μοντελοποίησαν με χρήση ZCM την Mode I αστοχία ενός συνθέτου πολυμερικής μήτρας συνδεδεμένου με κόλλα. Η μέθοδος CZM προσομοίωσε με ακρίβεια τα πειράματα. Στην [27] εφάρμοσαν CZM για τη μοντελοποίηση της αποκόλλησης σε CFRP υλικό και έδειξαν ότι εκτός από τις παραμέτρους μέγιστης τάσης και κρίσιμου ρυθμού απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης, σημαντική επίδραση έχει και το σχήμα του νόμου συνοχής. Στην [28] μοντελοποίησαν με χρήση της CZM την διάδοση ρωγμής αποκόλλησης σε CFRP συνδεδεμένα με κόλλα γεωμετρίας DCB και asymmetrical DCB. Οι αριθμητικές αναλύσεις έδωσαν καλές προβλέψεις για την αντοχή των συνδέσεων και εξετάστηκε η αλληλεπίδραση μεταξύ της αστοχίας των συνθέτων υλικών και της αστοχίας της διεπιφάνειάς τους με την κόλλα. Τέλος στην [29] βρέθηκαν παράμετροι της Mode II φόρτισης για την εφαρμογή της CZM από ENF δοκίμια και σε συνδυασμό με παραμέτρους για Mode I πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις σε γεωμετρίες συνδέσεων μικτού Mode I+II. Οι αναλύσεις έδωσαν ακριβή αποτελέσματα για την αντοχή των συνδέσεων και τους μηχανισμούς αστοχίας.

Οι Liljedahl et.al. [30] χρησιμοποίησαν CZM σε συνδυασμό με ελαστική και ελαστοπλαστική συμπεριφορά συνεχούς μέσου για την μοντελοποίηση συνδέσεων με κόλλα σε τρία διαφορετικά SLS και ένα mixed mode flexure πειράματα. Εξέτασαν τις επιδράσεις των παραμέτρων μέγιστης τάσης και ρυθμού έκλυσης ενέργειας της CZM. Είχαν πολύ καλή συσχέτιση με τις πειραματικές τιμές αντοχής των συνδέσεων.

Οι Blackman et.al. [31] εφάρμοσαν CZM δύο παραμέτρων, της μέγιστης τάσης σ_{max} και του κρίσιμου ρυθμού απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης Gc, σε αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων και προσπάθησαν να δώσουν φυσική σημασία στην παράμετρο σ_{max}.

Οι Floros et.al. [11] εφάρμοσαν αριθμητικές αναλύσεις με CZM σε συνδέσεις με κόλλα υπό Mode I, Mode II και μικτού τύπου Mode I+II σε δοκίμια DCB, ENF και MMB αντίστοιχα χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων LS DYNA. Έδειξαν ότι σε φόρτιση Mode I η CZM δίνει ακριβή αποτελέσματα όμως σε φορτίσεις Mode II και Mode I+II απαιτείται τροποποίηση των παραμέτρων και του νόμου συνοχής της μεθόδου.

2.7.2 Μέθοδος ζώνης συνοχής για φόρτιση κόπωσης

Η μέθοδος της ζώνης συνοχής έχει χρησιμοποιηθεί σε αριθμητικές αναλύσεις για την μελέτη της διαστρωματικής αποκόλλησης σε σύνθετα υλικά και της αποκόλλησης σε συνδέσεις με κόλλα σε φόρτιση κόπωσης. Για την προσομοίωση της κόπωσης σε συνδέσεις με κόλλα ο νόμος έλξης-διαχωρισμού που ακολουθείται στην Μέθοδο Ζώνης Συνοχής τροποποιείται έτσι ώστε να υποβαθμίζεται η αντοχή των στοιχείων εντός της ζώνης συνοχής συναρτήσει των κύκλων φόρτισης. Η υποβάθμιση επιτυγχάνεται μέσω ενός συντελεστή βλάβης λόγω κόπωσης.

Οι Turon et.al. [32] πρότειναν ένα μοντέλο για τη μοντελοποίηση της διαδοσης αποκόλλησης σε σύνθετα υλικά υπό τη φόρτιση πολυκυκλικής κόπωσης. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί μία παράμετρο βλάβης για την υποβάθμιση της αντοχής των πεπερασμένων στοιχείων εντός της ζώνης συνοχής η οποία εξαρτάται από το ρυθμό αύξησης της ρωγμής αποκόλλησης συναρτήσει των κύκλων φόρτισης da/dN. Τα δεδομένα για τον ρυθμό da/dN λαμβάνονται από πειράματα. Το μοντέλο ήταν ικανό να αναπαράγει τα αποτελέσματα πειραμάτων.

Οι Harper και Hallet [33] πρότειναν ένα νέο μοντέλο το οποίο επίσης βασίζεται στη γραμμικά ελαστική θραυστομηχανική και χρησιμοποιεί πειραματικά δεδομένα από καμπύλες Paris. Με τον

ρυθμό απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης των στοιχείων της ζώνης συνοχής υπολογίζεται από έναν τροποποιημένο νόμο του Paris ο ρυθμός dα/dN και μέσω αυτού μία παράμετρος βλάβης κόπωσης υποβαθμίζει την αντοχή των στοιχείων. Πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις με explicit μέθοδο με την χρήση του πακέτου πεπερασμένων στοιχείων LS DYNA σε DCB, ENF και MMB δοκίμια. Τα αριθμητικά αποτελέσματα είχαν καλή συμφωνία με πειράματα και αναλυτικές θεωρητικές λύσεις.

Οι Tserpes και Floros [34] πραγματοποίησαν αριθμητικές αναλύσεις για την διάδοση αποκόλλησης λόγω κόπωσης σε συνδέσεις με κόλλα υπό Mode I, Mode II και μικτή Mode I+II φόρτιση. Η κόπωση μοντελοποιήθηκε με έναν τροποποιημένο νόμο ζώνης συνοχής και χρησιμοποιήθηκε ένας αλγόριθμος για τον εντοπισμό της κορυφής της ρωγμής αποκόλλησης. Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το LS DYNA και ο τροποποιημένος νόμος συνοχής εισήχθη μέσω κατασκευασμένης από το χρήστη υπορουτίνας. Η υπορουτίνα λαμβάνει ως είσοδο παραμέτρους του νόμου Paris από πειράματα που πραγματοποίησαν οι συγγραφείς. Το μοντέλο ήταν ικανό να προσομοιώσει τη διάδοση της αποκόλλησης σε σύγκριση με τα πειράματα.

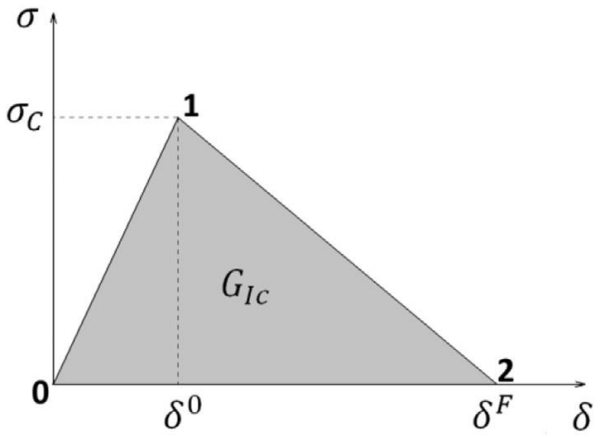
2.7.3 Πειραματικές και αριθμητικές μελέτες της επίδρασης μηχανισμών επιβράδυνσης της αποκόλλησης σε συνδέσεις με κόλλα

Η επίδραση της χρήσης αυλακώσεων στην επιβράδυνση της αποκόλλησης σε συνδέσεις με κόλλα συνθέτων υλικών μελετήθηκε πειραματικά και αριθμητικά από τους Tserpes, Peikert και Floros [35]. Πραγματοποίησαν πειραματικές δοκιμές και αριθμητικές αναλύσεις σε συνδέσεις τύπου DCB και CLS. Το δοκίμιο DCB μελετήθηκε για στατική φόρτιση και τα αποτελέσματα των πειραμάτων καθώς και οι αριθμητικές αναλύσεις έδειξαν διακοπή της αποκόλλησης στην περιοχή ης αυλάκωσης. Οι αριθμητικές αναλύσεις κόπωσης για το δοκίμιο CLS έδειξαν ότι η αυλάκωση δεν διακόπτει την αποκόλληση ενώ στο πείραμα υπήρξε αστοχία του συνθέτου υλικού στην περιοχή της αυλάκωσης. Η επίδραση της γεωμετρίας της αυλάκωσης μελετήθηκε αριθμητικά με τα αποτελέσματα να μην δείχνουν σημαντική επίδραση σε σχέση με την αρχική γεωμετρία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

3.1 Μέθοδος ζώνης συνοχής

Η μέθοδος της ζώνης συνοχής CZM [21],[22] εφαρμόζεται σε συνδυασμό με κώδικες πεπερασμένων στοιχείων για αριθμητικές αναλύσεις. Η μέθοδος αυτή βασίζεται σε έναν νόμο συνοχής (cohesive law) που συνδέει τη τάση που αναπτύσσεται στο υλικό με την παραμόρφωση ή τη μετατόπιση του υλικού τοπικά. Η μέθοδος χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει την αποκόλληση σε συνδέσεις με κόλλα ή σε σύνθετα υλικά και είναι ενσωματωμένη στα περισσότερα εμπορικά πακέτα πεπερασμένων στοιχείων. Η καμπύλη που εκφράζει τη συσχέτιση αυτή ονομάζεται καμπύλη έλξης-διαχωρισμού (traction – separation curve). Ο πιο απλός νόμος συνοχής είναι ο διγραμμικός (bilinear traction-separation curve) και δίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 3.1. Διγραμμικός νόμος συνοχής και οι χαρακτηριστικές παράμετροί του [11].

Στο σχήμα διακρίνουμε την τάση σ στον κατακόρυφο άξονα και την μετατόπιση δ στον οριζόντιο. Ο παραπάνω νόμος αναφέρεται σε Mode I φόρτιση και έτσι η τάση είναι ορθή κατά το πάχος ενώ η μετατόπιση αναφέρεται στον κατακόρυφο άξονα κατά το πάχος μίας σύνδεσης.

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Εφαρμοσμένης Μηχανικής,

Η καμπύλη χωρίζεται σε 2 γραμμικές περιοχές, η πρώτη περιοχή αντιστοιχεί στην ελαστική συμπεριφορά η οποία ισχύει μέχρι την τιμή δ^0 της μετατόπισης και την μέγιστη τιμή σ_c της τάσης (σημείο 1). Στην περιοχή αυτή δεν υπάρχει συσσώρευση βλάβης. Κατά την φόρτιση ακολουθείται η ευθεία γραμμή από το σημείο 0 μέχρι το σημείο 1 ενώ κατά την αποφόρτιση ακολουθείται η ίδια ευθεία γραμμή μέχρι το σημείο 0.

Η δεύτερη περιοχή μετά το σημείο 1 αντιστοιχεί στη περιοχή συσσώρευσης βλάβης λόγω μικροσκοπικών αλλαγών εντός του υλικού και εκφράζει την μείωση της αντοχής ως μείωση της τάσης που μπορεί να φέρει το υλικό και μείωση της δυσκαμψίας του. Όταν φτάσουμε στη τιμή δ^F της μετατόπισης (σημείο 2), υπάρχει τοπική αστοχία και διάδοση της αποκόλλησης. Η αποφόρτιση από οποιοδήποτε σημείο πάνω στην ευθεία αυτή έχει πορεία ευθύγραμμου τμήματος προς το σημείο 0.

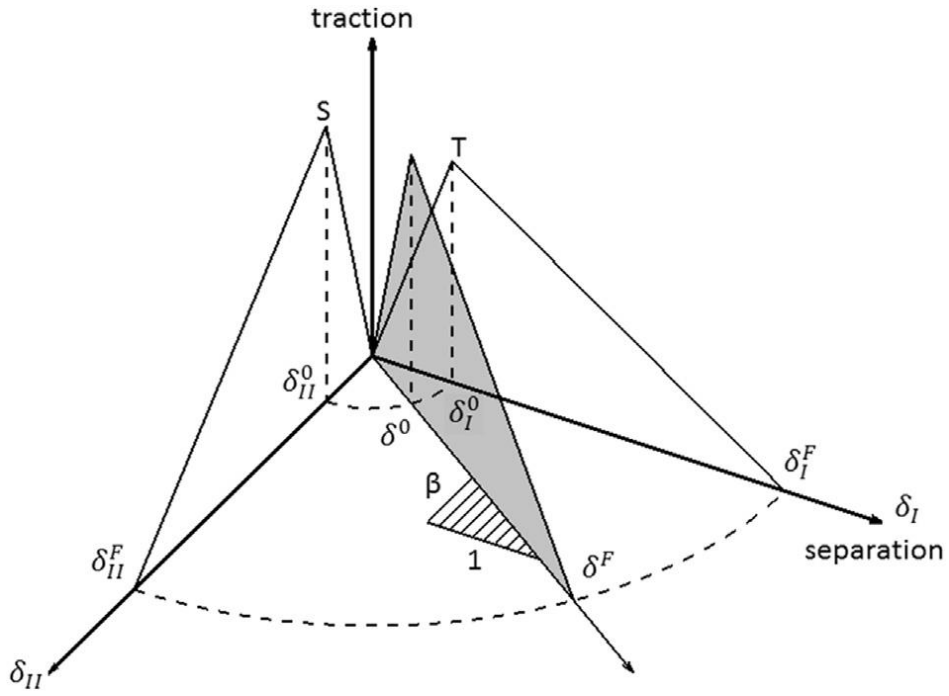
Το συνολικό εμβαδόν εσωτερικά των δύο περιοχών εκφράζει τον κρίσιμο ρυθμό απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης Gc, όταν ξεπεραστεί η τιμή του οποίου υπάρχει διάδοση της αποκόλλησης. Στο παραπάνω σχήμα το εμβαδό της καμπύλης αντιστοιχεί στον κρίσιμο ρυθμό απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης σε Mode I φόρτιση GIc. Αντίστοιχος νόμος ισχύει και για Mode II φόρτιση με τη διαφορά ότι η τάση είναι διατμητική και η μετατόπιση εγκάρσια. Επίσης το εμβαδό της καμπύλης για Mode II αντιστοιχεί στον GIIc. Οι σχέσεις που συνδέουν τα μεγέθη Gc, δ^F και σ_C είναι:

$$GIc = \sigma_C * \frac{\delta_I^F}{2} \quad (3.1)$$

$$GIIc = \tau_C * \frac{\delta_{II}^F}{2} \quad (3.2)$$

Υπάρχουν επίσης διαφορετικοί νόμοι συνοχής αναλόγως τη μορφή της καμπύλης όπως ο τριγραμμικός νόμος (τραπεζοειδές) ή ο εκθετικός. Ο κάθε νόμος ταιριάζει σε διαφορετικές περιπτώσεις ανάλογα με τη συμπεριφορά του υλικού (όλκιμη ή ψαθυρή).

Για τη μοντελοποποίηση φόρτισης μικτού τύπου Mode I + II πραγματοποιείται επέκταση του νόμου για ξεχωριστή φόρτιση Mode I ή Mode II όπως παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 3.2. Νόμος συνοχής για φόρτιση μεικτού τύπου I + II [11].

Σε αυτήν την επέκταση το εσωτερικό σκιασμένο τρίγωνο εκφράζει το νόμο που ακολουθείται και αποτελεί συνδυασμό των δύο τριγώνων της Mode I και της Mode II φόρτισης. Ο λόγος:

$$\beta = \frac{\delta^{II}}{\delta^{I}} \quad (3.3)$$

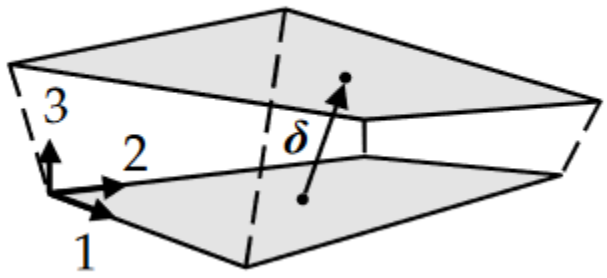
είναι ο λόγος μίξης των Modes και καθορίζει τη θέση του σκιασμένου τριγώνου. Η συνδυασμένη μετατόπιση υπολογίζεται ως εξής:

$$\delta_m = \sqrt{(\delta^I)^2 + (\delta^{II})^2} \quad (3.4)$$

Στην παραπάνω εξίσωση θεωρείται ότι $\delta^I = \delta 3$ είναι η μετατόπιση κατά το πάχος της σύνδεσης και ο άξονας 3 εκφράζει αυτή τη διεύθυνση [36]. Ο όρος m προέρχεται από το mixed για μικτή φόρτιση. Επίσης θεωρείται ότι η μετατόπιση

$$\delta^{II} = \sqrt{(\delta 1)^2 + (\delta 2)^2} \quad (3.5)$$

συμπεριλαμβάνει τις μετατοπίσεις στις διευθύνσεις 1 και 2 που είναι κάθετες στη διεύθυνση 3 της σύνδεσης. Το παρακάτω σχήμα παριστάνει ένα στοιχείο κόλλας στο οποίο διακρίνονται οι διευθύνσεις 1-2-3 και η μετατόπιση $\delta=\delta_m$. Η μετατόπιση δ^{II} βρίσκεται στο επίπεδο στο οποίο ο άξονας 3 είναι κάθετος.



Σχήμα 3.3. Στοιχείο κόλλας με τις διευθύνσεις 1-2-3 για τη μετατόπιση [36].

Η νέα οριακή μετατόπιση δ^0 για την είσοδο στη περιοχή υποβάθμισης λόγω βλάβης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\delta^0 = \delta_I^0 \delta_{II}^0 \sqrt{\frac{1+\beta^2}{(\delta_I^0)^2 + (\beta\delta_{II}^0)^2}} \quad (3.6)$$

Οι μετατοπίσεις δ_I^0 και δ_{II}^0 συνδέονται με τις μέγιστες τάσεις σε Mode I και II , T και S αντίστοιχα ως εξής:

$$\delta_I^0 = \frac{T}{EN} \quad (3.7)$$

$$\delta_{II}^0 = \frac{S}{ET} \quad (3.8)$$

Οι παράμετροι EN και ET είναι οι κλίσεις των ελαστικών περιοχών των διγραμμικών νόμων σε Mode II και Mode I αντίστοιχα. Έρευνες [37] έχουν δείξει ότι οι τιμές των παραμέτρων αυτών

καθώς και των S και T δεν είναι απαραίτητο να είναι ακριβείς σε αντίθεση με τις τιμές των GIc, GIIc και δI^F , δII^F.

Για τον υπολογισμό της μετατόπισης αστοχίας δ^F χρησιμοποιείται κάποιο κριτήριο αστοχίας για mixed mode φόρτιση, το οποίο λαμβάνει υπόψη τα GIc και GIIc. Στο LS DYNA χρησιμοποιούνται τα κριτήρια Power Law και Benzeggagh-Kenane law [38]. Εισάγεται επιπλέον μία παράμετρος XMU που διακρίνει ανάμεσα στα 2 κριτήρια ανάλογα με το πρόσημό της [35]. Στις αναλύσεις αυτής της εργασίας η παράμετρος XMU έχει την τιμή -2.0.

Για XMU > 0 (Power Law):

$$\delta^F = \frac{2(1+\beta^2)}{\delta^0}\left[\left(\frac{EN}{GIc}\right)^{XMU} + \left(ET * \frac{\beta^2}{GIIc}\right)^{XMU}\right]^{-\frac{1}{XMU}} \quad (3.9)$$

Για XMU <0 (Benzeggagh-Kenane law):

$$\delta^F = \frac{2}{\delta^0\left(\frac{1}{1+\beta^2}EN^\gamma + \frac{\beta^2}{1+\beta^2}ET^\gamma\right)^{\frac{1}{\gamma}}}\left[GIc + (GIIc - GIc)\left(ET\frac{\beta^2}{EN+\beta^2 ET}\right)^{|XMU|}\right] \quad (3.10)$$

Η παράμετρος γ λαμβάνει την τιμή 1.0 .

Στην περιοχή υποβάθμισης, η μείωση της αντοχής πραγματοποιείται σύμφωνα με μία παράμετρο βλάβης σε στατική φόρτιση ds [33] ως εξής:

$$\sigma = \sigma_{max}(1 - ds) \quad (3.11)$$

$$ds = \frac{\delta_m - \delta^0}{\delta^F - \delta^0} \quad (3.12)$$

3.2 Μέθοδος ζώνης συνοχής για κόπωση

3.2.1 Εφαρμογή του φορτίου

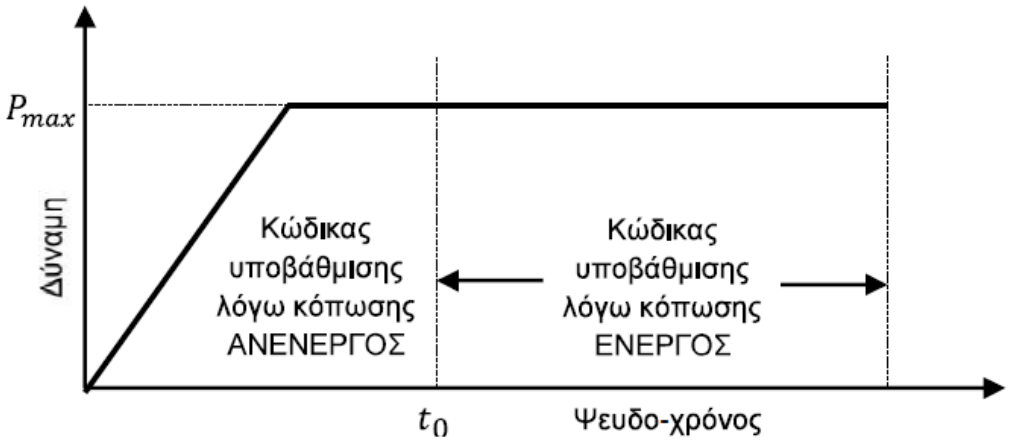
Η μέθοδος της ζώνης συνοχής για κόπωση μπορεί να εφαρμοστεί σε συνδυασμό με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με δύο διαφορετικούς τρόπους:

- Με την εφαρμογή εναλλασσόμενου φορτίου όπως αυτό εφαρμόζεται στην πραγματικότητα για συγκεκριμένο αριθμό κύκλων φόρτισης και την προσομοίωση της διάδοσης της αποκόλλησης χρησιμοποιώντας έναν κανόνα υποβάθμισης των ιδιοτήτων συναρτήσει των κύκλων.
- Με την εφαρμογή σταθερού φορτίου και την συσχέτιση της υποβάθμισης των ιδιοτήτων με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης.

Ο πρώτος τρόπος συνήθως οδηγεί σε υψηλού υπολογιστικού κόστους αναλύσεις και προτιμάται σε περιπτώσεις κόπωσης με μικρό αριθμό κύκλων φόρτισης ή με μεταβαλλόμενα εύρη φορτίσεων . Ο δεύτερος τρόπος είναι λιγότερο δαπανηρός και προτιμάται σε φορτίσεις σταθερών συνθηκών και μεγάλου αριθμού κύκλων. Ο δεύτερος τρόπος χρησιμοποιείται σε αυτήν την εργασία.

Για να εισαχθεί η υποβάθμιση λόγω κόπωσης στο υπάρχον μοντέλο ζώνης συνοχής χρησιμοποιείται υπορουτίνα στο LS DYNA μέσω της δυνατότητας που προσφέρει το πακέτο για ορισμό μοντέλων υλικών από το χρήστη (MAT_USER_DEFINED_MATERIAL_MODELS).

Το φορτίο αυξάνει γραμμικά από τη τιμή 0 μέχρι τη σταθερή τιμή του Pmax και στη συνέχεια διατηρείται σταθερό. Λόγω της άμεσης μεθόδου ολοκλήρωσης (explicit time integration method) που χρησιμοποιείται στο LS DYNA, εισάγονται δυναμικά φαινόμενα που διαταράσσουν την ενεργειακή ισορροπία κατά την εφαρμογή του σταθερού φορτίου τα οποία θα πρέπει να εξαλειφθούν πριν ενεργοποιηθεί ο κώδικας υποβάθμισης λόγω της κόπωσης.



Σχήμα 3.4. Τρόπος εφαρμογής του φορτίου σε μία ανάλυση κόπωσης [4].

Ο χρόνος t_0 στον οποίο τα δυναμικά φαινόμενα εξαλείφονται βρίσκεται με προκαταρκτικές στατικές αναλύσεις και στη συνέχεια εισάγεται στον κώδικα της κόπωσης ως το σημείο έναρξης της υποβάθμισης λόγω κόπωσης. Προκαταρκτικές στατικές αναλύσεις πραγματοποιούνται επίσης με την εφαρμογή φόρτισης μετατόπισης ώστε να βρεθεί το φορτίο αστοχίας της σύνδεσης. Το φορτίο στις αναλύσεις κόπωσης αποτελεί ποσοστό του στατικού φορτίου αστοχίας ώστε να μην υπάρχει αστοχία στοιχείων πριν την έναρξη της υποβάθμισης κόπωσης.

3.2.2 Υποβάθμιση αντοχής λόγω κόπωσης

Η μοντελοποίηση της κόπωσης βασίζεται στη μέθοδο της ζώνης συνοχής που περιεγράφηκε προηγουμένως αλλά εισάγει επιπλέον παραμέτρους που αντιστοιχούν στα χαρακτηριστικά μεγέθη της φόρτισης κόπωσης. Η συχνότητα φόρτισης εκφράζει τους κύκλους φόρτισης ανά μονάδα ψευδοχρόνου dt του LS DYNA και είναι μία παράμετρος που ορίζεται από τον χρήστη :

$$f = \frac{dN}{dt} \qquad (3.13)$$

Μία δεύτερη παράμετρος G_{thresh} χρησιμοποιείται ως μία οριακή τιμή ρυθμού απελευθέρωσης ενέργειας η οποία υπολογίζεται ολοκληρώνοντας την καμπύλη έλξης -διαχωρισμού του

πεπερασμένου στοιχείου. Όταν ξεπεραστεί η τιμή αυτή για το πεπερασμένο στοιχείο τότε ξεκινά η υποβάθμιση της αντοχής του λόγω κόπωσης.

Η διάδοση της αποκόλλησης βασίζεται στο μοντέλο της εργασίας των Harper και Hallet [33] και η οποία ρυθμίζεται από έναν τροποποιημένο νόμο Paris για διάδοση ρωγμής κόπωσης. Για αυτό το λόγο χρειάζεται να υπολογιστεί η μεταβολή του ρυθμού απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης ΔG. Η τιμή αυτή υπολογίζεται με τον παρακάτω τρόπο:

$$\Delta G = G(1 - R^2) \qquad (3.14)$$

Όπου:

$$R = \frac{Pmin}{Pmax} \qquad (3.15)$$

ο λόγος δυνάμεων της πειραματικά εφαρμοζόμενης φόρτισης και G είναι ο ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης του στοιχείου. Το μέγεθος αυτό μπορεί να υπολογιστεί από το εμβαδό της καμπύλης του νόμου συνοχής του στοιχείου. Η παράμετρος ΔG στη συνέχεια χρησιμοποιείται στον νόμο του Paris για τον υπολογισμό της αύξησης του μήκους αποκόλλησης:

$$\frac{d\alpha}{dN} = C * \Delta G^m \qquad (3.16)$$

Όπου οι σταθερές C και m λαμβάνονται από πειραματικές καμπύλες. Η επίδραση της κόπωσης οδηγεί σε επιπλέον υποβάθμιση της αντοχής του στοιχείου σύμφωνα με έναν συντελεστή βλάβης κόπωσης df ο οποίος δρα σε συνδυασμό με τον συντελεστή στατικής βλάβης ds της εξίσωσης (3.12). Η συνολική υποβάθμιση αντιστοιχεί σε έναν συντελεστή βλάβης Dtot ως εξής:

$$Dtot = ds + df \qquad (3.19)$$

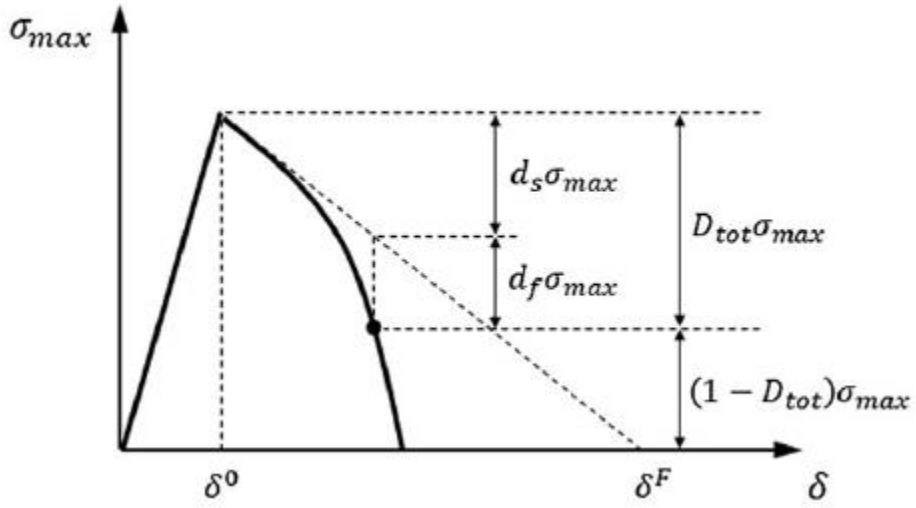
Όταν η τιμή G_{thresh} ξεπεραστεί για ένα στοιχείο τότε η τιμή της στατικής βλάβης ds μένει σταθερή και ίση με αυτήν που είχε το στοιχείο πριν ξεκινήσει η βλάβη λόγω κόπωσης μέσω του df. Η μείωση της αντοχής ενός στοιχείου εντός της ζώνης συνοχής θα είναι:

$$\sigma_m = \sigma_{m,max}(1 - Dtot) \quad (3.20)$$

Η τιμή της $\sigma_{m,\,max}$ αντιστοιχεί στην μέγιστη τάση στον διγραμμικό νόμο συνοχής της μικτής φόρτισης και είναι ίση με:

$$\sigma_{m,max} = S * T * \sqrt{\frac{(EN^2 + b^2ET^2)}{(S^2EN^2 + b^2ET^2T^2)}} \quad (3.21)$$

Η επίδραση των συντελεστών ds, df , Dtot στον νόμο συνοχής απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα όπου η διακεκομμένη γραμμή στην περιοχή υποβάθμισης αντιστοιχεί σε συμπεριφορά σε στατική φόρτιση και η συνεχής γραμμή σε φόρτιση κόπωσης.



Σχήμα 3.5. Επίδραση των συντελεστών ds, df , Dtot στον νόμο συνοχής [34].

Σε αυτήν την εργασία χρησιμοποιείται μία παράμετρος ΔN_e που εκφράζει τον αριθμό των κύκλων φόρτισης για αστοχία ενός στοιχείου και ισούται με:

$$\Delta N_e = \frac{dN}{da} * L_{el} \quad (3.22)$$

Όπου L_{el} είναι το ενεργό μήκος στοιχείου κατά το μήκος της σύνδεσης. Στη συνέχεια ο ρυθμός αύξησης της παραμέτρου βλάβης κόπωσης υπολογίζεται ως εξής:

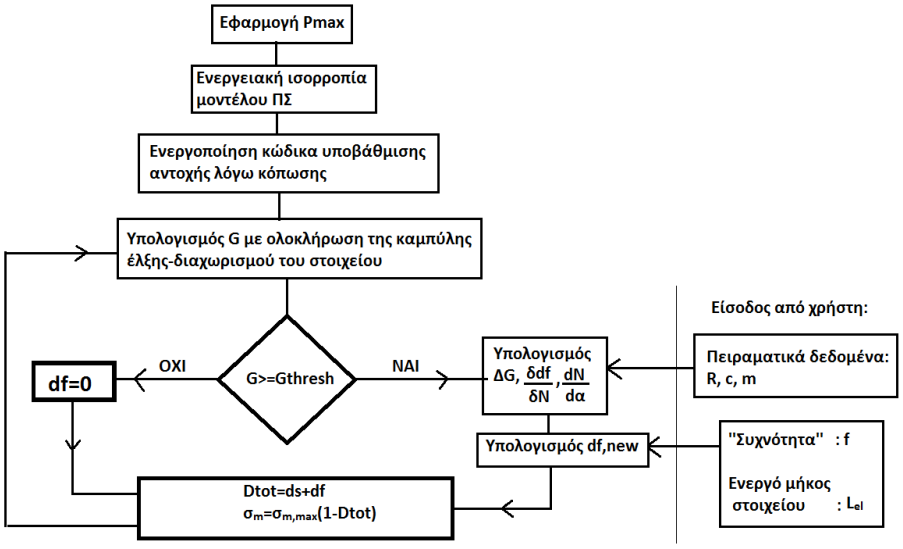
$$\frac{ddf}{dN} = \frac{1 - d_s}{\Delta N_e} \qquad (3.23)$$

Η μεταβολή του df σε κάθε βήμα της ανάλυσης θα είναι:

$$d_{f,new} = \ d_{f,old} + f * dt * \frac{ddf}{dN} \quad (3.24)$$

Στη συνέχεια η υποβάθμιση της αντοχής του στοιχείου γίνεται με την εξίσωση (3.20).

Για να εφαρμοστεί σωστά ο κώδικας υποβάθμισης λόγω κόπωσης πρέπει να γίνει διαχωρισμός ανάμεσα στα στοιχεία που δέχονται βλάβη κόπωσης και στα στοιχεία που η βλάβη τους οφείλεται κυρίως σε στατική φόρτιση επειδή το φορτίο της αριθμητικής ανάλυσης παραμένει σταθερό. Αυτό πραγματοποιείται με την κατάλληλη επιλογή της παραμέτρου G_{thresh} ώστε να εισέρχεται μία σειρά στοιχείων στην περιοχή υποβάθμισης λόγω κόπωσης με την λογική της προσομοίωσης της κορυφής αποκόλλησης. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της υποβάθμισης λόγω κόπωσης που εφαρμόζεται σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο που προσομοιώνει την συμπεριφορά της κόλλας.



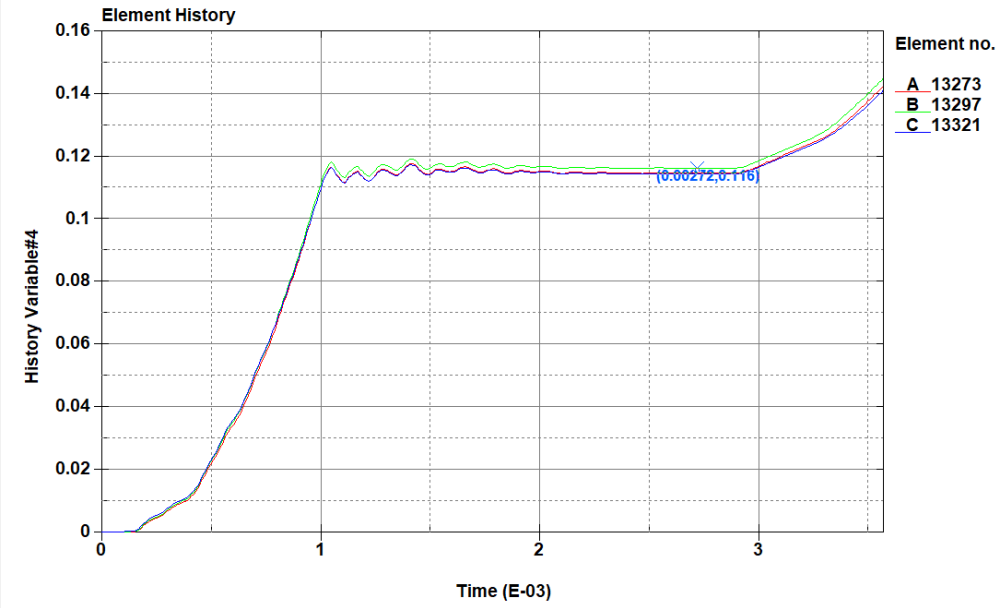
Σχήμα 3.6. Διάγραμμα ροής της εφαρμογής του κώδικα υποβάθμισης της αντοχής λόγω κόπωσης.

3.2.3 Επιλογή παραμέτρων εισόδου του κώδικα υποβάθμισης λόγω κόπωσης

Οι κύριες παράμετροι που λαμβάνει ως είσοδο από το χρήστη το μοντέλο υλικού που προγραμματίστηκε είναι οι ιδιότητες του υλικού EN, ET, GIc, GIIc, S, T, UND, UTD, XMU, gamma και η πυκνότητα όπως ακριβώς στο μοντέλο υλικού MAT_138 του LS DYNA, η συχνότητα φόρτισης f, το G_{thresh} και ο ρυθμός εξέλιξης της αποκόλλησης dN/dα ο οποίος θεωρείται σταθερός σε αυτήν την εργασία και ίσος με 579.94 κύκλοι/mm. Με αυτόν τον τρόπο δεν λαμβάνονται υπόψη οι σταθερές c, m του νόμου του Paris αλλά ούτε και ο λόγος R.

Η παράμετρος L_{el} που είναι το ενεργό μήκος στοιχείου υπολογίζεται αυτόματα από τον κώδικα ως η ρίζα της επιφάνειας του πεπερασμένου στοιχείου. Η επιλογή αυτή πραγματοποιήθηκε για να ληφθεί υπόψη το πιο πυκνό πλέγμα στοιχείων κοντά στην οπή στις αναλύσεις που περιλαμβάνουν κοχλία όπου τα στοιχεία έχουν μικρότερες διαστάσεις. Στην περίπτωση των αναλύσεων που δεν περιλαμβάνουν κοχλία και τα στοιχεία έχουν τετράγωνο σχήμα, η παράμετρος L_{el} ισούται με το μήκος του στοιχείου.

Η παράμετρος G_{thresh} χρησιμοποιείται για να ελεγχθεί αν το στοιχείο βρίσκεται στην κορυφή της ρωγμής αποκόλλησης και δεν έχει κάποια φυσική σημασία. Η επιλογή της τιμής του G_{thresh} πραγματοποιείται με προκαταρκτικές αναλύσεις στις οποίες παρακολουθείται η τιμή της ενέργειας παραμόρφωσης G που αποθηκεύουν τα στοιχεία της κόλλας που βρίσκονται στην άκρη της επικάλυψης. Τα στοιχεία αυτά είναι εκείνα που θα αστοχήσουν πρώτα λόγω κόπωσης και από εκεί θα ξεκινήσει η ρωγμή αποκόλλησης. Για αυτό το λόγο η τιμή του G_{thresh} επιλέγεται ελαφρώς μικρότερη από την τιμή G που αποθηκεύουν τα στοιχεία αυτά την χρονική στιγμή ακριβώς πριν την ενεργοποίηση της υποβάθμισης της αντοχής λόγω κόπωσης. Η επιλογή της τιμής του G_{thesh} απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα όπου λίγο πριν τη χρονική στιγμή 3E-03 στην οποία ενεργοποιείται η υποβάθμιση κόπωσης, η τιμή του G των στοιχείων είναι 0.116 N/mm. Η τιμή του G_{thresh} σε αυτή τη περίπτωσση επιλέγεται 0.115 N/mm.



Σχήμα 3.7. Παράδειγμα επιλογής της παραμέτρου G_{thresh}.

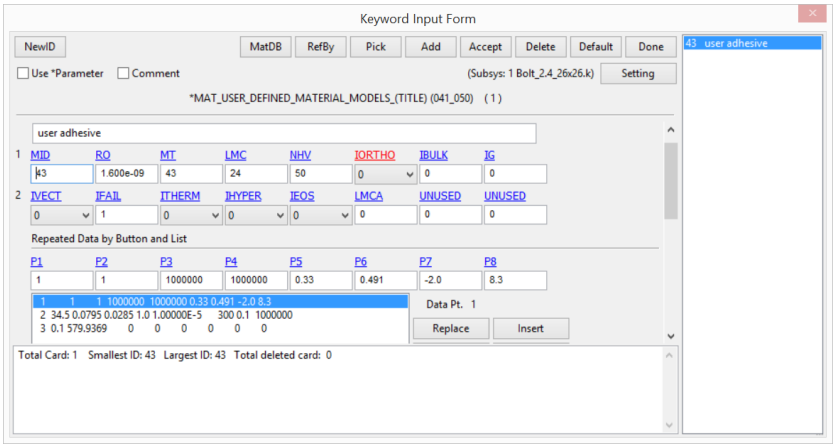
Η συχνότητα κόπωσης f=dN/dt επιλέγεται με κριτήριο η ανάλυση να τερματίζει σε λογικό χρονικά πλαίσιο. Σε αυτήν την εργασία η τιμή της f λαμβάνεται ίση με 10^6 κύκλοι ανά μονάδα ψευδοχρόνου του LS DYNA. Έτσι αν η υποβάθμιση λόγω κόπωσης είναι ενεργή για 0.001 s ψευδοχρόνου, θα έχουν πραγματοποιηθεί 10^6*0.001=1000 κύκλοι φόρτισης. Η τιμή της f δεν πρέπει να είναι πολύ υψηλή καθώς τα στοιχεία της κόλλας αστοχούν στιγμιαία και εισάγονται δυναμικά φαινόμενα στην ανάλυση.

Ως παράμερος εισόδου λαμβάνεται και η στιγμή στην οποία θα ενεργοποιηθεί η υποβάθμιση λόγω κόπωσης σαν αριθμός βημάτων καταγραφής των αποτελεσμάτων. Σε αυτή την εργασία καταγραφή πραγματοποιείται κάθε 1E-05 s ενώ η υποβάθμιση ξεκινά την στιγμή 0.03 s όταν και υπάρχει ενεργειακή ισορροπία. Έτσι τα βήματα για την στιγμή ενεργοποίησης είναι 0.03/1E-05=300 βήματα.

3.3 Ανάπτυξη υπορουτίνας για προσομοίωση της κόπωσης στην κόλλα με το LS DYNA

Η ανάπτυξη της υπορουτίνας για την ενσωμάτωση της υποβάθμισης της αντοχής των στοιχείων της κόλλας λόγω κόπωσης πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων LS DYNA και της δυνατότητας που προσφέρει για προγραμματισμό μοντέλων υλικών από τον χρήστη. Ο

κώδικας της υπορουτίνας αναπτύχθηκε για την έκδοση R10.0. του LS DYNA σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN. Η δημιουργία του .exe αρχείου για τον κώδικα επίλυσης δημιουργήθηκε με τον Intel Visual Fortran Compiler. Το μοντέλο υλικού που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις κόπωσης ενσωματώθηκε στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων μέσω της εντολής MAT_USER_DEFINED_MATERIAL_MODELS. Μέσω του περιβάλλοντος του LS PrePost εισάχθηκαν οι παράμετροι που περιγράφονται στην ενότητα 3.2.3 όπως απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.8. Περιβάλλον εισαγωγής παραμέτρων της υπορουτίνας κόπωσης στο LS PrePost.

Για τον υπολογισμό του ρυθμού απελευθέρωσης ενέργειας G των στοιχείων και άλλων παραμέτρων αποθηκεύονται ως έξοδοι (extra history variables). Με αυτόν τον τρόπο ελέγχεται η σωστή λειτουργία του κώδικα.

3.4 Προσομοίωση της βλάβης στο σύνθετο υλικό

Η βλάβη των πολύστρωτων πλακών για τις στατικές αναλύσεις λαμβάνεται υπόψη με το μοντέλο υλικού MAT162 /*MAT_COMPOSITE_MSC_DMG [36] του LS DYNA. Αυτό το μοντέλο υλικού χρησιμοποιεί τη μέθοδο της προοδευτικής εξέλιξης βλάβης (progressive damage modeling) για να μοντελοποιήσει την προοδευτική αστοχία σε σύνθετα υλικά με ενίσχυση σε μία διεύθυνση (Unidirectional) αλλά και σε σύνθετα υλικά με την ενίσχυση σε μορφή πλέξης (Woven). Τα κριτήρια προοδευτικής αστοχίας για κάθε στρώση διαμορφώνονται με βάση τη μεθοδολογία του Hashin [39] και επιπλέον λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της υψηλής

συγκέντρωσης πίεσης στην αστοχία του συνθέτου υλικού. Η αστοχία των ινών, η βλάβη της μήτρας και η διαστρωματική αποκόλληση μπορούν να μοντελοποιηθούν με αυτόν τον τύπο υλικού. Ακόμη, μετά την έναρξη της βλάβης στο υλικό είναι δυνατό να μοντελοποιηθεί η μείωση των ελαστικών σταθερών (softening) με μία Damage Mechanics προσέγγιση από τους Matzenmiller et.al. [40].

Σαν είσοδο από το χρήστη το μοντέλο υλικού απαιτεί τις ελαστικές σταθερές της στρώσης του σύνθετου υλικού και τις τιμές των τάσεων αστοχίας της στρώσης στις διάφορες διευθύνσεις. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε αυτή την εργασία έχουν ενίσχυση στη μία διεύθυνση οπότε τα κριτήρια αστοχίας του MAT162 που παρουσιάζονται στη συνέχεια αφορούν Unidirectional στρώσεις. Οι συμβολισμοί a, b, c εκφράζουν άξονες στη διεύθυνση των ινών, στη διεύθυνση κάθετη στις ίνες πάνω στο επίπεδο της στρώσης και την κάθετη στο επίπεδο της στρώσης διεύθυνση αντίστοιχα. Οι συμβολισμοί του διανύσματος τάσης σε κάθε στρώση είναι (σ_a, σ_b, σ_c, τ_{ab}, τ_{bc}, τ_{ca}).

Κριτήρια αστοχίας για τις ίνες

Εφελκυσμός – Διάτμηση των ινών (Tension – Shear fiber mode) :

$$f1 = \left(\frac{\langle \sigma_\alpha \rangle}{S_{aT}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{\alpha b}^2 + \tau_{c\alpha}^2}{S_{FS}^2}\right) - 1 = 0 \quad (3.25)$$

Θλίψη ινών (Compression fiber mode):

$$f2 = \left(\frac{\langle \sigma'_\alpha \rangle}{S_{aC}}\right)^2 - 1 = 0 \quad (3.26), \qquad \sigma'_\alpha = -\sigma_\alpha + \langle -\frac{\sigma_b + \sigma_C}{2} \rangle \quad (3.27)$$

Σύνθλιψη Ινών (Crush mode):

$$f3 = \left(\frac{\langle p \rangle}{S_{FC}}\right)^2 - 1 = 0 \quad (3.28), \qquad p = -\frac{\sigma_\alpha + \sigma_b + \sigma_C}{3} \quad (3.29)$$

Όπου $\langle\ \rangle$ είναι οι παρενθέσεις Macaulay, S_{aT} και S_{aC} είναι η εφελκυστική και θλιπτική τάση αστοχίας στη διεύθυνση των ινών αντίστοιχα, S_{FS} και S_{FC} είναι οι τάσεις αστοχίας σε διάτμηση και σύνθλιψη των ινών αντίστοιχα.

Κριτήρια αστοχίας για τη μήτρα

Η αστοχία της μήτρας πρέπει να προκύπτει χωρίς αστοχία των ινών και για αυτό το λόγο συμβαίνει σε επίπεδα παράλληλα στις ίνες. Για απλότητα θεωρούνται μόνο δύο επίπεδα αστοχίας, ένα κάθετο στο επίπεδο των στρώσεων και ένα παράλληλο σε αυτές. Τα κριτήρια αστοχίας για κάθε ένα από τα δύο επίπεδα είναι τα εξής:

Αστοχία μήτρας στο κάθετο επίπεδο (Perpendicular matrix mode):

$$f4 = \left(\frac{\langle\sigma_b\rangle}{S_{bT}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{bc}}{S'_{bc}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{ab}}{S_{ab}}\right)^2 - 1 = 0 \quad (3.30)$$

Αστοχία μήτρας στο παράλληλο επίπεδο (Parallel matrix mode – Delamination):

$$f5 = S^2\left\{\left(\frac{\langle\sigma_c\rangle}{S_{bT}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{bc}}{S''_{bc}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{ca}}{S_{ca}}\right)^2\right\} - 1 = 0 \quad (3.31)$$

Όπου S_{bT} είναι η εγκάρσια αντοχή σε εφελκυσμό. Ο συντελεστής S χρησιμεύει για την καλύτερη συσχέτιση με πειραματικά δεδομένα. Με βάση τη θεωρία Coulomb – Mohr , οι διατμητικές αντοχές υπολογίζονται από τις εξισώσεις:

$$S_{ab} = S_{ab}^{(0)} + \tan(\varphi)\,\langle -\sigma_b\rangle \quad (3.32)$$

$$S'_{bc} = S_{bc}^{(0)} + \tan(\varphi)\,\langle -\sigma_b\rangle \quad (3.33)$$

$$S_{ca} = S_{ca}^{(0)} + \tan(\varphi)\,\langle -\sigma_c\rangle \quad (3.34)$$

$$S''_{bc} = S_{bc}^{(0)} + \tan(\varphi)\,\langle -\sigma_c\rangle \quad (3.35)$$

Όπου φ είναι σταθερά του υλικού με την έννοια ότι η τιμή tan(φ) αποτελεί το συντελεστή τριβής του υλικού, και τα $S_{ab}^{(0)}$, $S_{ca}^{(0)}$, $S_{bc}^{(0)}$ είναι οι αντοχές σε διάτμηση για τους αντίστοιχους τύπους αστοχίας υπό εφελκυσμό.

Υποβάθμιση των ελαστικών σταθερών μετά την έναρξη της βλάβης

Η μείωση της δυσκαμψίας που προκύπτει μετά την αστοχία κάποιας στρώσης εκφράζεται με την υποβάθμιση των ελαστικών σταθερών. Η υποβάθμιση επιτυγχάνεται με τις παραμέτρους βλάβης ω_i ως εξής:

$$E'_i = (1 - \omega_i)E_i \quad (3.36)$$

Όπου E_i η αρχική τιμή της ελαστικής σταθεράς, E_i' η υποβαθμισμένη τιμή της ελαστικής σταθεράς και ω_i η παράμετρος βλάβης που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\omega_i = 1 - \exp\left(-\frac{r_i^{m_i}}{m_i}\right), \; r_i \geq 0, \qquad i = 1, \ldots, 6 \quad (3.37)$$

Όπου r_i είναι η ρίζα της τιμής των συναρτήσεων βλάβης f1,…,f5 των κριτηρίων αστοχίας ινών, μήτρας και αποκόλλησης και m_i είναι παράμετροι βλάβης του υλικού. Οι συναρτήσεις βλάβης f1,…,f5 εκφράζονται συναρτήσει των παραμορφώσεων της στρώσης χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο poisson. Οι συναρτήσεις βλάβης λαμβάνουν την επίδραση της μη γραμμικής συμπεριφοράς της στρώσης. Η επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης (strain rate) στην καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης μοντελοποιείται με συναρτήσεις που εκφράζουν την εξάρτηση των ελαστικών σταθερών από τον ρυθμό αυτό με τις σχέσεις:

$$\{E_{RT}\} = \{E_0\}\left(1 + \{C_{rate}\}\ln\left(\frac{\{\dot{\varepsilon}\}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right) \quad (3.38)$$

$$\{E_{RT}\} = (E_a\,, E_b\,, E_c\,\,, G_{ab}\,, G_{bc}\,, G_{ca}\,)^T \quad (3.39)$$

$$\{\dot{\varepsilon}\} = \left(|\dot{\varepsilon}_a|, |\dot{\varepsilon}_b\,|\,, |\dot{\varepsilon}_c\,|, |\dot{\varepsilon}_{ab}|, |\dot{\varepsilon}_{bc}\,|, |\dot{\varepsilon}_{ca}|\right)^T \quad (3.40)$$

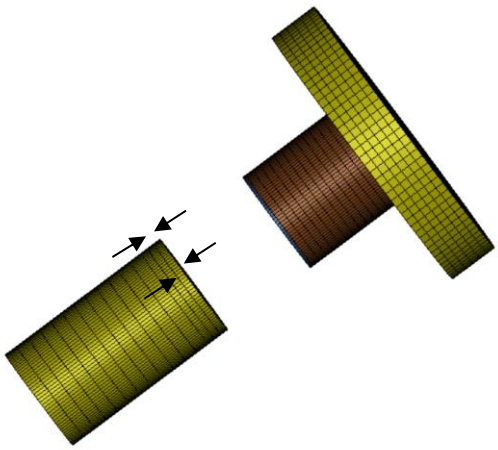
$$\{C_{rate}\} = (C_{rate2}, C_{rate2}, C_{rate4}, C_{rate3}, C_{rate3}, C_{rate3})^T \quad (3.41)$$

Όπου $\{C_{rate}\}$ οι σταθερές ρυθμού παραμόρφωσης, $\{E_0\}$ είναι οι τιμές των ελαστικών σταθερών $\{ E_{RT} \}$στον ρυθμό αναφοράς $\dot{\varepsilon}_0$. Οι τιμές των f1,f2,f3,f4,f5 αποθηκεύονται σε μεταβλητές κατά την επίλυση του μοντέλου για κάθε πεπερασμένο στοιχείο. Σε αυτή την εργασία δεν εξετάζεται η επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης και οι τιμές των C_{rate} ορίζονται ως μηδενικές.

3.5 Προσομοίωση της σύσφιξης του κοχλία

Προκειμένου να είναι δυνατή η παραλαβή φορτίων και από τον κοχλία κατά τη διάρκεια των αριθμητικών αναλύσεων, είναι απαραίτητο να μοντελοποιηθεί η σύσφιξη και η ανάπτυξη προέντασης στον κοχλία, την κόλλα και στις πολύστρωτες πλάκες. Αυτό επιτυγχάνεται πραγματοποιώντας μία επιπλέον ανάλυση η οποία εξελίσσεται πριν από την κύρια ανάλυση στο LS DYNA με χρήση της εντολής CONTROL_DYNAMIC_RELAXATION. Στην ανάλυση αυτή αρχικοποιούνται οι τιμές των τάσεων και οι παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στον κοχλία, την κόλλα και τις πολύστρωτες πλάκες κατά την σύσφιξη του κοχλία. Η ανάλυση αυτή σταματά όταν επέλθει ενεργειακή ισορροπία στο μοντέλο και αμέσως μετά ξεκινά η κύρια ανάλυση.

Η τάση που αναπτύσσεται στη διατομή του κοχλία κατά τη σύσφιξη ορίζεται μέσω μίας καμπύλης τάσης-χρόνου από την εντολή DEFINE_CURVE. Η διατομή του κοχλία στην οποία θα εφαρμοστεί η καμπύλη τάσης-χρόνου ορίζεται με την εντολή DATABASE_CROSS_SECTION. Στη συνέχεια με την εντολή INITIAL_STRESS_SECTION αρχικοποιείται η τιμή της προέντασης στην διατομή που ορίστηκε προηγουμένως και τέλος με την εντολή CONTROL_DYNAMIC_RELAXATION ορίζονται οι συνθήκες ολοκλήρωσης της ανάλυσης για την σύσφιξη του κοχλία.



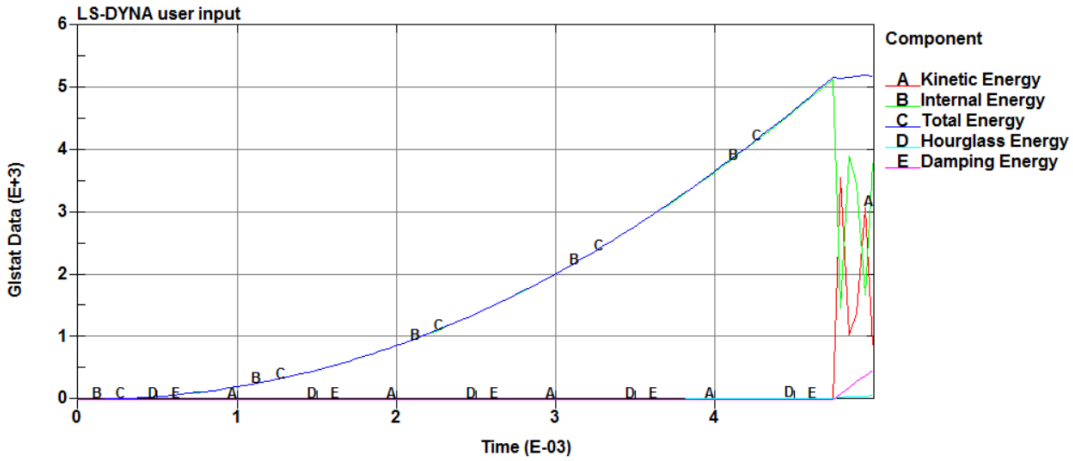
Σχήμα 3.9. Τάση προέντασης στον κοχλία.

3.6 Αριθμητική ανάλυση με το LS DYNA

Η μοντελοποίηση μίας σύνδεσης με κόλλα στο LS DYNA πραγματοποιείται σε αυτήν την εργασία με explicit μέθοδο αριθμητικής ολοκλήρωσης. Η επιλογή explicit αντί implicit μεθόδου βασίζεται στην ευκολία επίλυσης και την ταχύτητα επίλυσης που παρουσιάζει η πρώτη μέθοδος όταν χρησιμοποιείται σε αναλύσεις που παρουσιάζουν μεγάλη μη γραμμικότητα όπως μία σύνδεση με κόλλα.

Οι στατικές αναλύσεις αυτής της εργασίας λαμβάνουν υπόψη τη μη γραμμική συμπεριφορά της κόλλας. Ο χρόνος για τον οποίο διαρκεί η ανάλυση είναι αρκετός για να αποκολληθούν τα στοιχεία της κόλλας. Ο ψευδοστατικός χαρακτήρας της ανάλυσης απαιτεί η κινητική ενέργεια του μοντέλου να είναι σχεδόν μηδενική. Ο χρόνος τερματισμού της ανάλυσης όμως είναι μικρός ώστε να οδηγεί σε υπολογιστικά αποδεκτό χρόνο και κόστος. Λόγω αυτού εμφανίζονται δυναμικά φαινόμενα που αυξάνουν την κινητική ενέργεια του μοντέλου. Για την καταπολέμηση αυτού του φαινομένου χρησιμοποιείται τεχνητή απόσβεση που εξαλείφει τα ανεπιθύμητα δυναμικά φαινόμενα. Για την αποφυγή διατμητικού κλειδώματος χρησιμοποιείται μειωμένη ολοκλήρωση ενός σημείου. Η χρήση μειωμένης ολοκλήρωσης μπορεί να οδηγήσει σε μη πραγματικές ιδιομορφές (hourglass) για τα πεπερασμένα στοιχεία και για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται αλγόριθμος ελέγχου του hourglass. Τα παραπάνω αφαιρούν ενέργεια από το μοντέλο και η ενέργεια αυτή υπολογίζεται από το LS DYNA ως Damping Energy και Hourglass Energy. Για την

εξαγωγή σωστών αποτελεσμάτων από την ανάλυση θα πρέπει η εσωτερική ενέργεια (internal energy) να ισούται με την ολική ενέργεια (total energy) . Οι κινητική ενέργεια (kinetic energy) , damping energy και hourglass energy θα πρέπει να διατηρούνται σε χαμηλά ποσοστά επί της ολικής ενέργειας για να θεωρείται αποδεκτή η ανάλυση. Αυτό επιτυγχάνεται με την κατάλληλη επιλογή συντελεστή τεχνητής απόσβεσης και αλγορίθμου ελέγχου του hourglass. Οι ίδιες μέθοδοι χρησιμοποιούνται στις αναλύσεις κόπωσης. Οι μορφές των ενεργειών από μία ανάλυση που θεωρείται αποδεκτή δίνονται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 3.10. Ενέργειες από μία ανάλυση με LS DYNA.

Η εσωτερική ενέργεια σχεδόν ταυτίζεται με την ολική μέχρι την στιγμή που υπάρχει πλήρη αποκόλληση των στοιχείων της κόλλας και στη συνέχεια αυξάνει πολύ η κινητική ενέργεια λόγω έντονων δυναμικών φαινομένων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

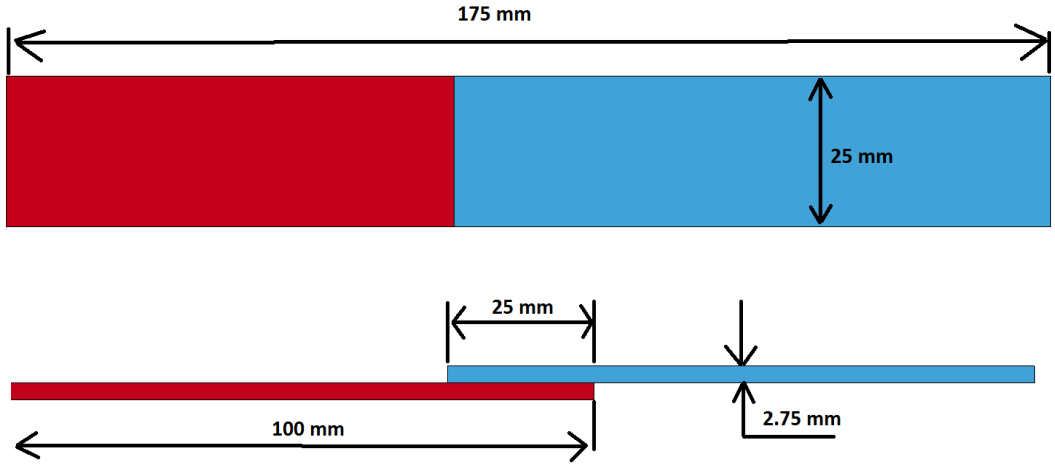
Η ανάλυση των συνδέσεων τύπου SLS με μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιήθηκε με το πακέτο λογισμικού LS DYNA. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν δέκα αναλύσεις εκ των οποίων οι δύο ήταν στατικές αναλύσεις, μία για τη σύνδεση χωρίς κοχλία και μία για τη σύνδεση με κοχλία για την εύρεση του φορτίου αστοχίας της κόλλας υπό στατική φόρτιση. Έξι αναλύσεις αφορούσαν τις ίδιες γεωμετρίες σύνδεσης υπό φόρτιση κόπωσης με φορτίο ίσο με το 60% του φορτίου αστοχίας του στατικού μοντέλου χωρίς κοχλία και για δύο διαφορετικές πυκνότητες πλέγματος για κάθε περίπτωση. Οι υπόλοιπες δύο αναλύσεις κόπωσης αφορούσαν τη σύνδεση χωρίς κοχλία και με κοχλία διαμέτρου 2.4mm σε φόρτιση ίση με το 50% του φορτίου αστοχίας του στατικού μοντέλου χωρίς κοχλία, για να μελετηθεί η επίδραση της τιμής της εξωτερικής φόρτισης. Για να μελετηθεί η επίδραση του σχήματος του πλέγματος στην εξέλιξη της αποκόλλησης πραγματοποιήθηκαν δύο ακόμη αναλύσεις κόπωσης για μοντέλα χωρίς κοχλία αλλά με πλέγμα που προκύπτει από την αφαίρεση του κοχλία. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι γεωμετρίες των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων, οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν, ο τρόπος στήριξης και φόρτισης καθώς και λεπτομέρειες της μοντελοποίησης των συνδέσεων.

4.1 Γεωμετρία των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων

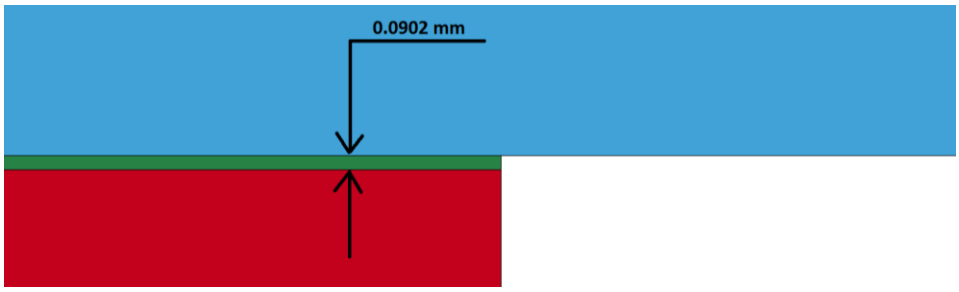
Οι κύριες διαστάσεις των συνδέσεων είναι όμοιες για όλα τα μοντέλα που εξετάστηκαν. Οι μόνες αλλαγές οφείλονται στην ενσωμάτωση της κοχλίωσης στα αντίστοιχα μοντέλα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι διαστάσεις των δοκιμίων που μοντελοποιήθηκαν.

4.1.1 Διαστάσεις

Οι πολύστρωτες πλάκες από σύνθετο υλικό έχουν μήκος 100mm, πλάτος 25mm και πάχος 2.75 mm. Το μήκος επικάλυψης των πλακών(overlap) είναι 25mm και το στρώμα της κόλλας έχει πάχος 0.0902mm.



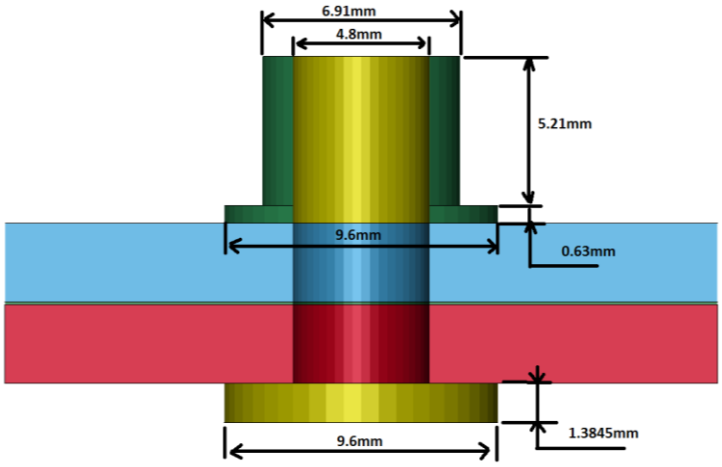
Σχήμα 4.1. Γενικές διαστάσεις σύνδεσης .



Σχήμα 4.2. Πάχος στρώματος κόλλας.

4.1.2 Διαστάσεις κοχλίωσης με διάμετρο κοχλία 4.8mm

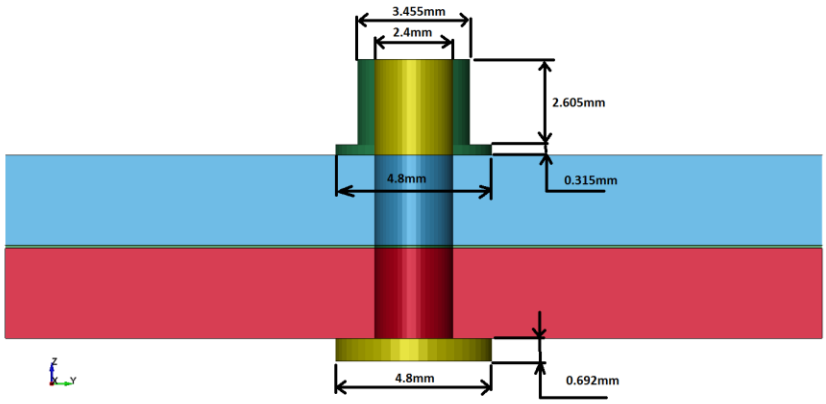
Οι διαστάσεις της κοχλία διαμέτρου 4.8mm και του περικοχλίου δίνονται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 4.3. Διαστάσεις κοχλίωσης με διάμετρο κοχλία 4.8mm.

4.1.3 Διαστάσεις κοχλίωσης με διάμετρο κοχλία 2.4mm

Οι διαστάσεις της κοχλία διαμέτρου 2.4mm και του περικοχλίου δίνονται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 4.4. Διαστάσεις κοχλίωσης με διάμετρο κοχλία 2.4mm.

4.2 Ιδιότητες υλικών

Οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση των πολύστρωτων πλακών, της κόλλας, του κοχλία και του περικοχλίου παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα.

4.2.1 Ιδιότητες υλικών για τις πολύστρωτες πλάκες

Οι πολύστρωτες πλάκες από σύνθετο υλικό αποτελούνται από 12 Carbon/Epoxy στρώσεις με ενίσχυση σε μία διεύθυνση. Η διαστρωμάτωση των πλακών είναι συμμετρική της μορφής $[0/90/+45/-45/0/90]_s$. Το συνολικό πάχος κάθε πλάκας είναι 2.75mm. Η πυκνότητα του υλικού είναι ίση με 1580 kg/m^3. Οι ελαστικές ιδιότητες της στρώσης είναι οι εξής:

Πίνακας 4.1. Τιμές των ελαστικών ιδιοτήτων της στρώσης.

Ελαστική Ιδιότητα	**Τιμή**
E_1	165 [GPa]
E_2	9 [Gpa]
E_3	9 [Gpa]
G_{12}	5.6 [GPa]
G_{23}	2.8[GPa]
G_{13}	5.6 [GPa]
v_{21}	0.0185 [-]
v_{32}	0.5 [-]
v_{31}	0.0185 [-]

Οι τάσεις αστοχίας που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση της βλάβης του συνθέτου υλικού είναι οι εξής:

Πίνακας 4.2. Τιμές των τάσεων αστοχίας της στρώσης.

Τάση Αστοχίας	**Τιμή**
Xt (τάση αστοχίας σε εφελκυσμό στη διεύθυνση των ινών 1)	2560 [MPa]
Xc (τάση αστοχίας σε θλίψη στη διεύθυνση των ινών 1)	1590 [MPa]

Yt (τάση αστοχίας σε εφελκυσμό στην εγκάρσια διεύθυνση 2)	73 [MPa]
Yc (τάση αστοχίας σε θλίψη στην εγκάρσια διεύθυνση 2)	185 [MPa]
Zt (τάση αστοχίας σε εφελκυσμό στην κάθετη στο επίπεδο διεύθυνση 3)	73 [MPa]
Zc (τάση αστοχίας σε θλίψη στην κάθετη στο επίπεδο διεύθυνση 3)	185 [MPa]
S (τάση αστοχίας σε διάτμηση στην 12 διεύθυνση)	90 [MPa]
R (τάση αστοχίας σε διάτμηση στην 23 διεύθυνση)	90 [MPa]
T (τάση αστοχίας σε διάτμηση στην 13 διεύθυνση)	90 [MPa]
S_{FC} (τάση αστοχίας σε διάτμηση της ίνας)	185 [MPa]
S_{FS} (τάση αστοχίας σε σύνθλιψη)	300 [MPa]
φ (γωνία τριβής)	10^{o}

4.2.2 Ιδιότητες της κόλλας

Η κόλλα έχει συμπεριφορά που ακολουθεί τριγωνικό νόμο τάσης-μετατόπισης με τις ιδιότητες:

Πίνακας 4.3. Τιμές των ιδιοτήτων της κόλλας.

Ιδιότητα	**Τιμή**
ρ (πυκνότητα)	1600 [kg/m^3]
E_N (δυσκαμψία στην κάθετη διεύθυνση)	10^6 [N/mm^3]
E_T (δυσκαμψία στην εφαπτομενική διεύθυνση)	10^6 [N/mm^3]

G_{IC} (κρίσιμος ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας σε Mode I)	0.33 [N/mm]
G_{IIC} (κρίσιμος ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας σε Mode II)	0.491 [N/mm]
T (μέγιστη τάση στην κάθετη διεύθυνση)	8.3 [MPa]
S (μέγιστη τάση στην εφαπτομενική διεύθυνση)	34.5 [MPa]
UTD (μέγιστη μετατόπιση στην εφαπτομενική διεύθυνση)	0.0795 [mm]
UND (μέγιστη μετατόπιση στην κάθετη διεύθυνση)	0.0285 [mm]
XMU (εκθέτης του κριτηρίου αστοχίας)	-2.0

Όπου η κάθετη διεύθυνση είναι η κάθετη στο επίπεδο κόλλησης και η εφαπτομενική πάνω στο επίπεδο κόλλησης.

4.2.3 Ιδιότητες κοχλία και περικοχλίου

Ο κοχλίας και το περικόχλιο μοντελοποιούνται ως ισότροπα υλικά με τις ακόλουθες ιδιότητες:

Πίνακας 4.4. Τιμές των ιδιοτήτων κοχλία και περικοχλίου.

Ιδιότητα	**Τιμή**
ρ (πυκνότητα)	4430 [kg/m^3]
E (μέτρο ελαστικότητας)	113 [GPa]
ν (λόγος Poisson)	0.34

4.3 Επιλογή τύπων πεπερασμένων στοιχείων και μοντέλων υλικών

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται οι τύποι πεπερασμένων στοιχείων και μοντέλων υλικού που επιλέχθηκαν για την μοντελοποίηση των πολύστρωτων πλακών, της κόλλας, του κοχλία και του περικοχλίου.

Για όλες τις αναλύσεις επιλέχθηκαν τρισδιάστατα SOLID στοιχεία οκτώ κόμβων ενός σημείου ολοκλήρωσης τύπου ELFORM 1 για τις πολύστρωτες πλάκες, τον κοχλία και το περικόχλιο μέσω της εντολής SECTION_SOLID. Για την κόλλα επιλέχθηκαν τρισδιάστατα στοιχειά τεσσάρων σημείων ολοκλήρωσης τύπου ELFORM 19 μέσω της εντολής SECTION_SOLID.

Η συμπεριφορά των πολύστρωτων πλακών για τις ψευδοστατικές αναλύσεις μοντελοποιήθηκε με το μοντέλο υλικού MAT_162/MAT_COMPOSITE_MSC_DMG το οποίο είναι ικανό να προσομοιώσει τη βλάβη του σύνθετου υλικού. Για τη σωστή λειτουργία του MAT_162 όλες οι στρώσεις με διαφορετικό προσανατολισμό ινών αποτέλεσαν ξεχωριστό PART. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκαν τέσσερα PARTS για όλες τις στρώσεις των 0,90,45,-45 μοιρών αντίστοιχα. Κάθε στρώση προσομοιώθηκε με 1 πεπερασμένο στοιχείο κατά το πάχος.

Για τις αναλύσεις κόπωσης οι πολύστρωτες πλάκες μοντελοποιήθηκαν με το MAT_002/MAT_ORTHOTROPIC_ELASTIC το οποίο υποθέτει γραμμική ελαστική συμπεριφορά και δεν μοντελοποιεί τη βλάβη του υλικού. Χρησιμοποιήθηκε 1 πεπερασμένο στοιχείο κατά το πάχος κάθε στρώσης και ο προσανατολισμός των ινών καθορίστηκε περιστρέφοντας τα τοπικά συστήματα συντεταγμένων των στοιχείων ώστε η διεύθυνση x να συμπίπτει με την κατεύθυνση των ινών.

Ο κοχλίας και το περικόχλιο είχαν γραμμική ελαστική συμπεριφορά και μοντελοποιήθηκαν με το MAT_001/MAT_ELASTIC. Η συμπεριφορά της κόλλας για τις στατικές αναλύσεις προσομοιώθηκε με το MAT_138/MAT_COHESIVE_MIXED_MODE το οποίο εφαρμόζει τη μέθοδο της ζώνης συνοχής για μικτό τύπο Mode I+II. Για τις αναλύσεις κόπωσης η συμπεριφορά της κόλλας προσομοιώθηκε με την υπορουτίνα που κατασκευάστηκε για την προσθήκη της βλάβης λόγω κόπωσης στη μέθοδο της ζώνης συνοχής. Η ενσωμάτωση της υπορουτίνας πραγματοποιήθηκε μέσω της εντολής MAT_USER_DEFINED_MATERIAL_MODELS και το μοντέλο υλικού 43(UMAT43).

Πίνακας 4.5. Τύποι στοιχείων και υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις.

Ψευδοστατικές Αναλύσεις	**Τύπος στοιχείου**	**Μοντέλο Υλικού**
Κόλλα	ELFORM 19	MAT_138
Πλάκες	ELFORM 1	MAT_162
Κοχλίας & περικόχλιο	ELFORM 1	MAT_001
Αναλύσεις Κόπωσης	**Τύπος στοιχείου**	**Μοντέλο Υλικού**
Κόλλα	ELFORM 19	UMAT_43
Πλάκες	ELFORM 1	MAT_002
Κοχλίας & περικόχλιο	ELFORM 1	MAT_001

4.4 Συνοριακές συνθήκες

4.4.1 Στήριξη

Οι συνοριακές συνθήκες στήριξης ήταν κοινές για όλες τις αναλύσεις. Το ένα άκρο της SLS σύνδεσης ήταν πακτωμένο με δέσμευση όλων των βαθμών ελευθερίας των κόμβων τις αντίστοιχης πλάκας από την εντολή BOUNDARY_SPC_SET. Το άκρο που δέχεται τη φόρτιση κατά τη x διεύθυνση έχει δεσμευμένους τους βαθμούς ελευθερίας των κόμβων στις υπόλοιπες διευθύνσεις εκτός από τη διεύθυνση φόρτισης με την ίδια εντολή. Προκειμένου να εφαρμοστούν οι παραπάνω συνοριακές συνθήκες δημιουργούνται δύο σετ κόμβων, ένα για κάθε άκρο, μέσω της εντολής SET_NODE_LIST. Στο επόμενο σχήμα απεικονίζονται οι στηρίξεις της σύνδεσης.



Σχήμα 4.5. Συνοριακές συνθήκες της σύνδεσης.

4.4.2 Φόρτιση ψευδοστατικών Αναλύσεων

Η φόρτιση των στατικών αναλύσεων ήταν τύπου ταχύτητας μετατόπισης. Η καμπύλη που ακολουθεί η φόρτιση ορίζεται με την εντολή DEFINE_CURVE και ξεκινά από την τιμή 0 για χρόνο 0, αυξάνει στην τιμή 150 mm/s τη στιγμή $1*10^{-5}$ s και παραμένει σε αυτή την τιμή μέχρι το τέλος της ανάλυσης. Στη συνέχεια με την εντολή BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_SET η φόρτιση εφαρμόζεται κατά τη x διεύθυνση στο σετ κόμβων του αντίστοιχου άκρου. Η επιλογή της τιμής 150 mm/s έγινε ώστε η ανάλυση να τερματίζει σε αποδεκτό χρονικό διάστημα.

4.4.3 Φόρτιση Αναλύσεων κόπωσης

Η φόρτιση των αναλύσεων κόπωσης εφαρμόζεται με την εντολή LOAD_NODE_SET στο σετ κόμβων του φορτιζόμενου άκρου. Ξανά η τιμή του φορτίου ορίζεται με καμπύλη από την εντολή DEFINE_CURVE και ξεκινά από τιμή 0 στον χρόνο 0, φτάνει στην τιμή των 4920 N την στιγμή 0.001 s και μένει σταθερή ως το τέλος της ανάλυσης. Η τιμή 4920 N αποτελεί το 60% του φορτίου για πλήρη αποκόλληση στη στατική ανάλυση του μοντέλου χωρίς κοχλία. Στα μοντέλα όπου εφαρμόζεται μικρότερη τιμή φόρτισης, η τιμή αυτή είναι ίση με 4090 N που αποτελεί το 50% του φορτίου για πλήρη αποκόλληση στη στατική ανάλυση του μοντέλου χωρίς κοχλία. Η επιλογή της τιμής 0.001 s ήταν τέτοια ώστε οι ενέργειες να σταθεροποιούνται πριν τη στιγμή 0.003 s που ξεκινά η υποβάθμιση λόγω κόπωσης.

4.5 Τύπος ανάλυσης

Για όλα τα μοντέλα ΠΣ χρησιμοποιήθηκε άμεση μέθοδος επίλυσης (explicit method). Για τις αναλύσεις στατικής φόρτισης η κόλλα και οι πλάκες από σύνθετο υλικό είχαν μη γραμμική συμπεριφορά ενώ ο κοχλίας και το περικόχλιο είχαν γραμμικά ελαστική συμπεριφορά. Για τις αναλύσεις κόπωσης μόνο η συμπεριφορά της κόλλας ήταν μη γραμμική ενώ γραμμική συμπεριφορά είχαν οι πλάκες από σύνθετο υλικό, ο κοχλίας και το περικόχλιο. Στον επόμενο πίνακα αναγράφεται ο τύπος της ανάλυσης για κάθε μέλος των μοντέλων.

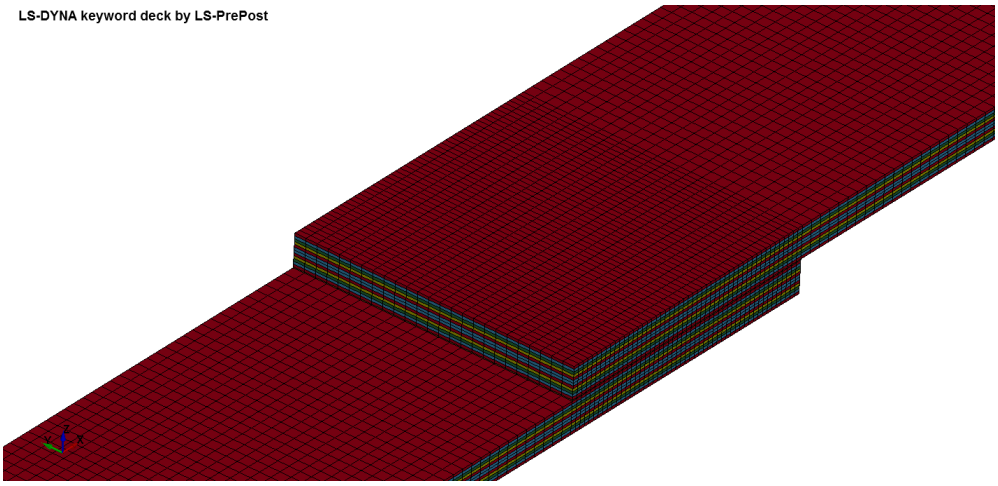
Πίνακας 4.6. Τύπος ανάλυσης για κάθε περίπτωση φόρτισης.

Στατική φόρτιση	**Τύπος ανάλυσης**
Κόλλα	Μη-γραμμική
Σύνθετο Υλικό	Μη-γραμμική
Κοχλίας & Περικόχλιο	Γραμμική
Φόρτιση κόπωσης	**Τύπος ανάλυσης**
Κόλλα	Μη-γραμμική
Σύνθετο Υλικό	Γραμμική
Κοχλίας & Περικόχλιο	Γραμμική

4.6 Εικόνες μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων

4.6.1 Μοντέλα χωρίς κοχλία υπό ψευδοστατική φόρτιση

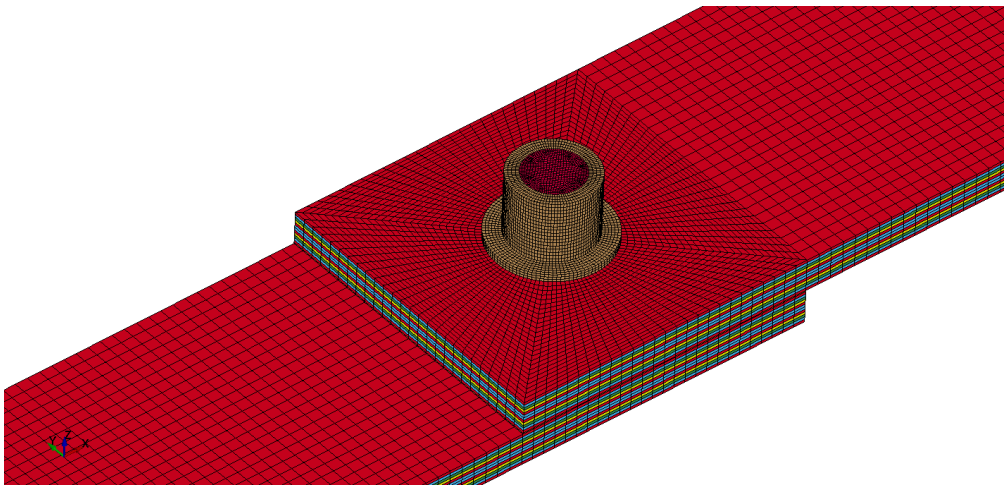
Το μοντέλο για την ανάλυση σε ψευδοστατική φόρτιση της σύνδεσης χωρίς κοχλία παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα.



Σχήμα 4.6. Μοντέλο για την ανάλυση σε ψευδοστατική φόρτιση της σύνδεσης χωρίς κοχλία.

4.6.2 Μοντέλα με κοχλία διαμέτρου 4.8 mm υπό ψευδοστατική φόρτιση

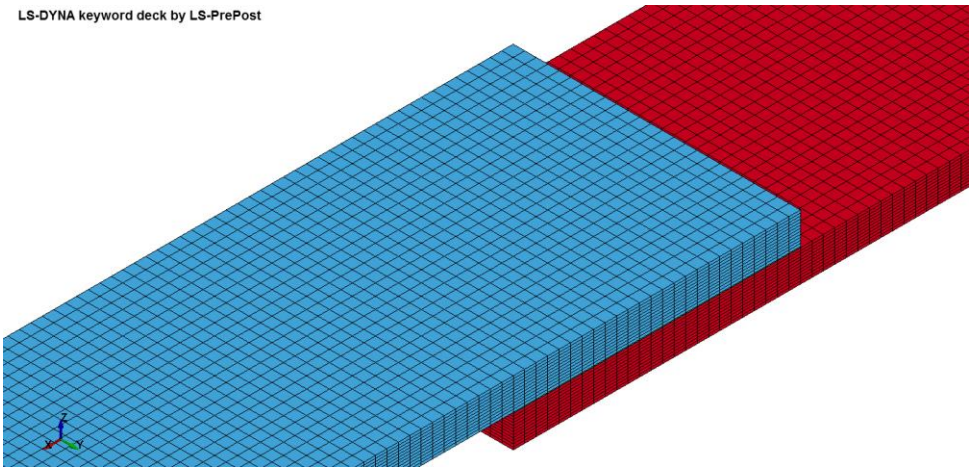
Το μοντέλο για την ανάλυση σε ψευδοστατική φόρτιση της σύνδεσης με κοχλία διαμέτρου 4.8 mm παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα.



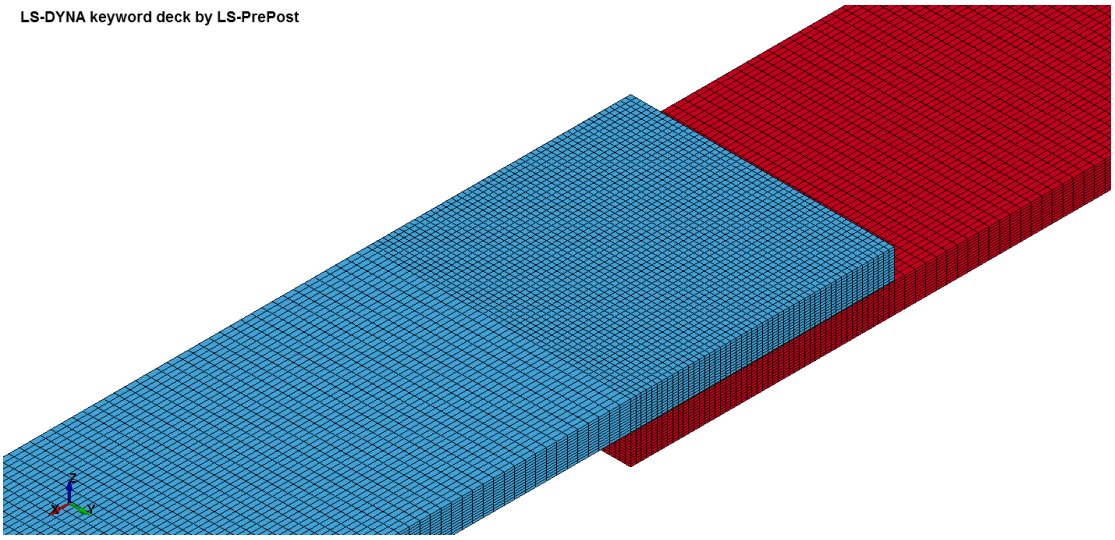
Σχήμα 4.7. Μοντέλο για την ανάλυση σε ψευδοστατική φόρτιση της σύνδεσης με κοχλία διαμέτρου 4.8mm.

4.6.3 Μοντέλα για φόρτιση κόπωσης χωρίς κοχλία

Για την ανάλυση κόπωσης της σύνδεσης χωρίς κοχλία αναπτύχθηκαν τρία μοντέλα ΠΣ με διαφορετική πυκνότητα πλέγματος ώστε να μελετηθεί η επίδραση στα αποτελέσματα. Το αραιό μοντέλο έχει διαστάσεις στοιχείου 1x1mm στην περιοχή της επικάλυψης , το μεσαίο μοντέλο 0.5x0.5mm και το πυκνό 0.25x0.25mm. Τα μοντέλα παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν.



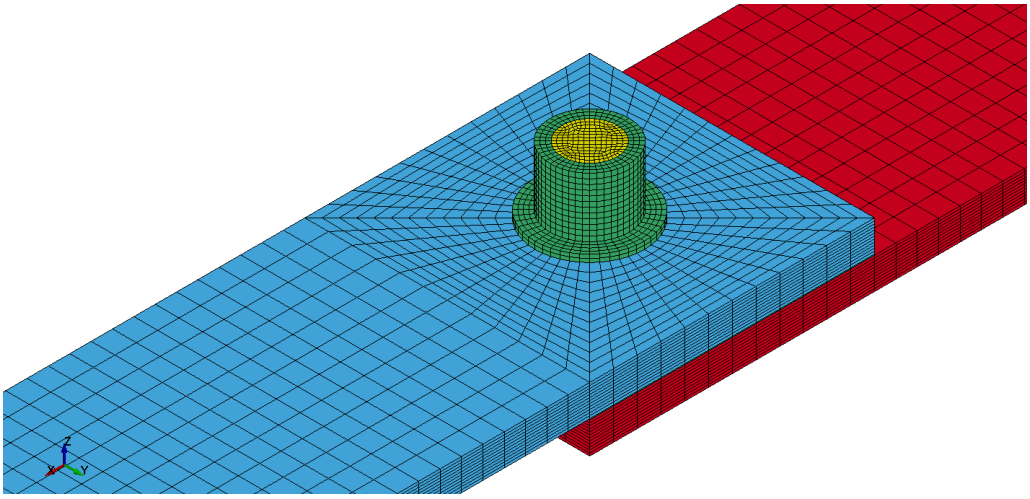
Σχήμα 4.8. Μοντέλο με πλέγμα 1x1mm για φόρτιση κόπωσης της σύνδεσης χωρίς κοχλία.



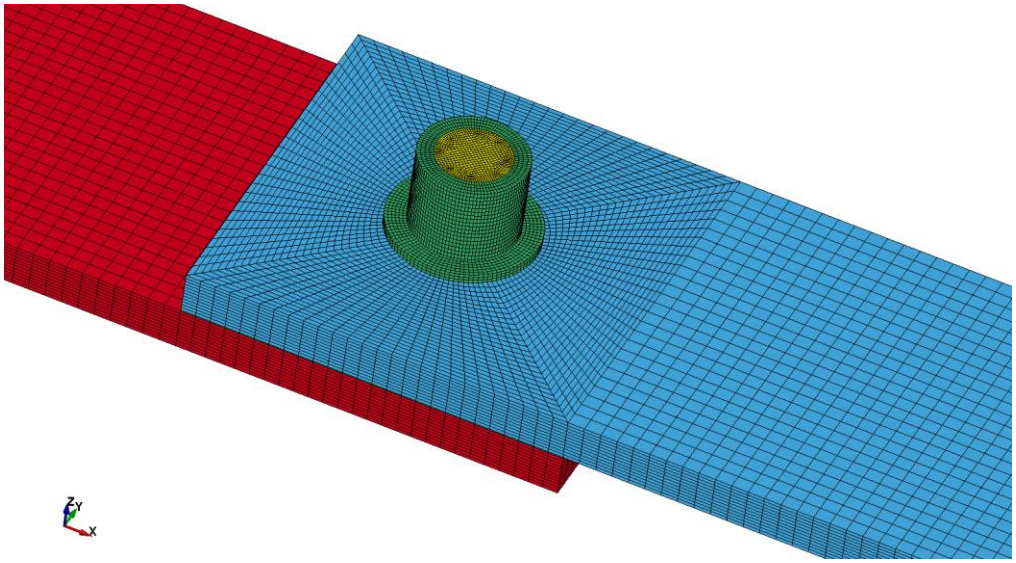
Σχήμα 4.9. Μοντέλο με πλέγμα 0.5x0.5mm για φόρτιση κόπωσης της σύνδεσης χωρίς κοχλία.

4.6.4 Μοντέλα για φόρτιση κόπωσης με κοχλία διαμέτρου 4.8 mm

Για την ανάλυση κόπωσης της σύνδεσης με κοχλία διαμέτρου 4.8mm αναπτύχθηκαν δύο μοντέλα ΠΣ με διαφορετική πυκνότητα πλέγματος. Το αραιό μοντέλο έχει 13x12 στοιχεία περιμετρικά της περιοχής της επικάλυψης και το πυκνό μοντέλο 26x26. Τα μοντέλα παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν.



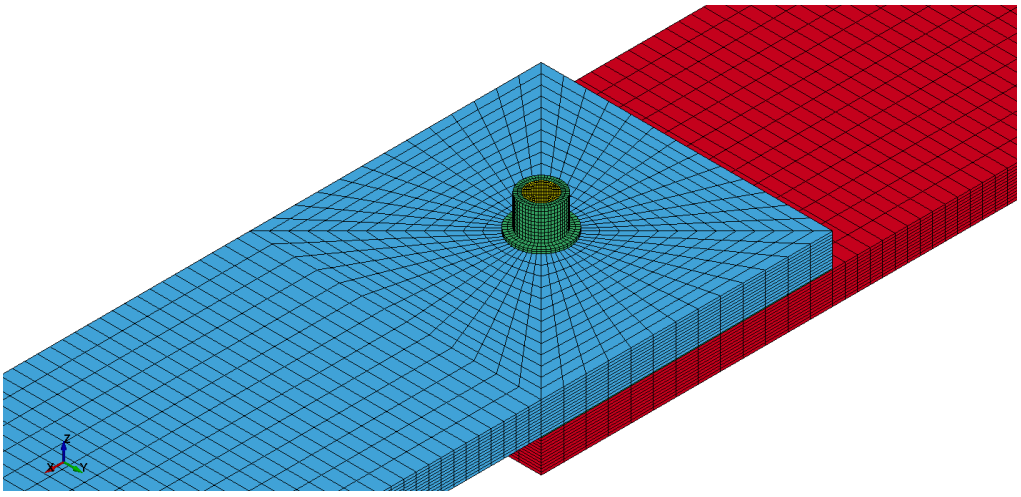
Σχήμα 4.10. Μοντέλο με αραιό πλέγμα για φόρτιση κόπωσης της σύνδεσης με κοχλία διαμέτρου 4.8mm



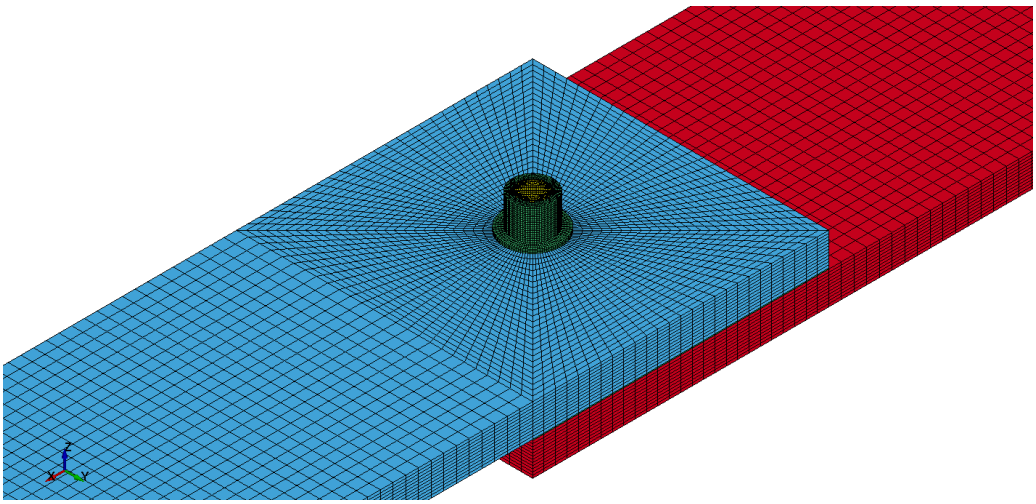
Σχήμα 4.11. Μοντέλο με πυκνό πλέγμα για φόρτιση κόπωσης της σύνδεσης με κοχλία διαμέτρου 4.8mm.

4.6.5 Μοντέλα για φόρτιση κόπωσης με κοχλία διαμέτρου 2.4 mm

Για την ανάλυση κόπωσης της σύνδεσης με κοχλία διαμέτρου 2.4mm αναπτύχθηκαν τρία μοντέλα ΠΣ με διαφορετική πυκνότητα πλέγματος. Το αραιό μοντέλο έχει 13x13 στοιχεία περιμετρικά της περιοχής της επικάλυψης, το μεσαίο 26x26 και το πυκνό μοντέλο 52x52. Τα μοντέλα παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν.



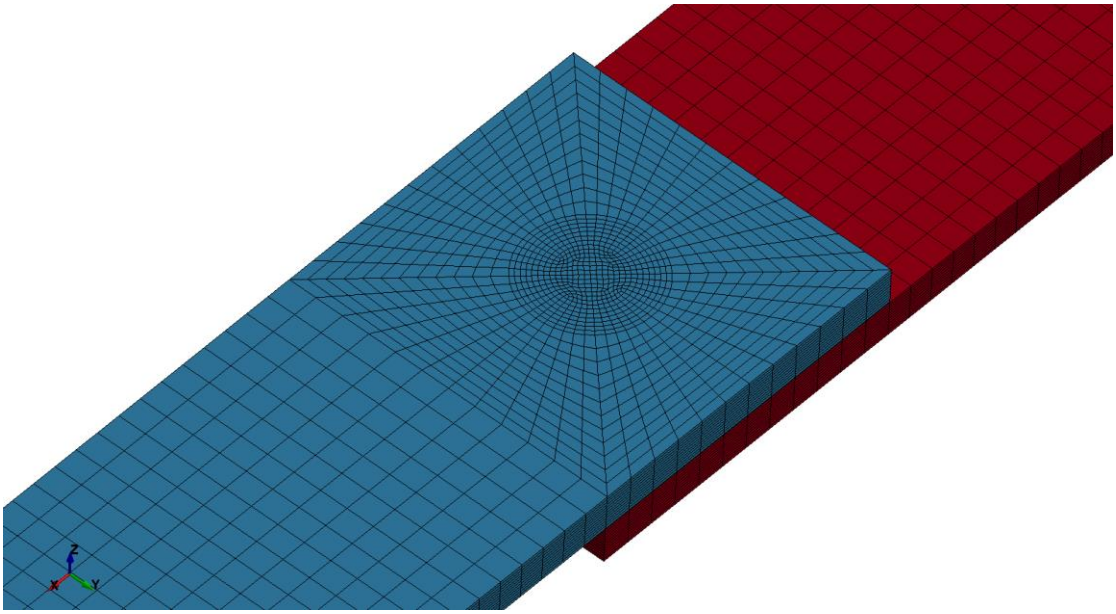
Σχήμα 4.12. Μοντέλο με πλέγμα 13x13 για φφόρτιση κόπωσης της σύνδεσης με κοχλία διαμέτρου 2.4mm



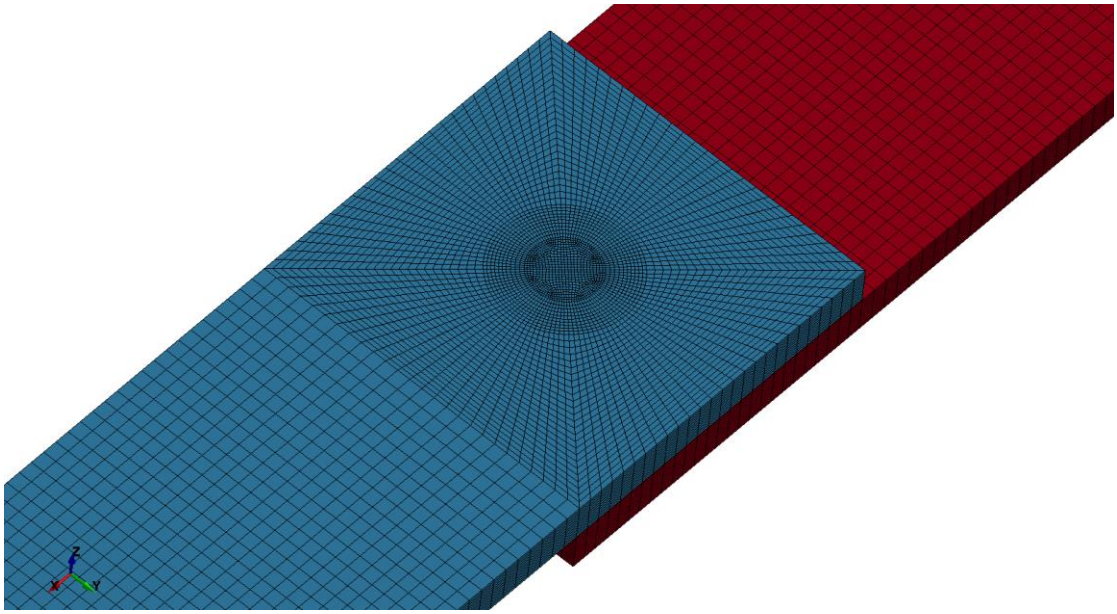
Σχήμα 4.13. Μοντέλο με πλέγμα 26x26 για φόρτιση κόπωσης της σύνδεσης με κοχλία διαμέτρου 2.4mm

4.6.6 Μοντέλα με πλέγμα που προκύπτει από αφαίρεση του κοχλία για την μελέτη της επίδρασης του σχήματος του πλέγματος

Για την μελέτη της επίδρασης του σχήματος του πλέγματος στην εξέλιξη της αποκόλλησης χρησιμοποιήθηκαν δύο μοντέλα με πλέγμα που προκύπτει από αφαίρεση του κοχλία και γέμισμα της οπής με πλέγμα παρόμοιας μορφής με αυτό του κοχλία. Το ένα από αυτά τα μοντέλα είχε αραιό πλέγμα με 13x12 στοιχεία περιμετρικά της περιοχής της επικάλυψης ενώ το άλλο μοντέλο είχε πυκνό πλέγμα με 26x26 στοιχεία στην περιοχή της επικάλυψης. Τα μοντέλα παρουσιάζονται στις επόμενες εικόνες.



Σχήμα 4.14. Μοντέλο χωρίς κοχλία με αραιό πλέγμα και με μορφή πλέγματος παρόμοια με αυτή του κοχλία.



Σχήμα 4.15. Μοντέλο χωρίς κοχλία με πυκνό πλέγμα και με μορφή πλέγματος παρόμοια με αυτή του κοχλία.

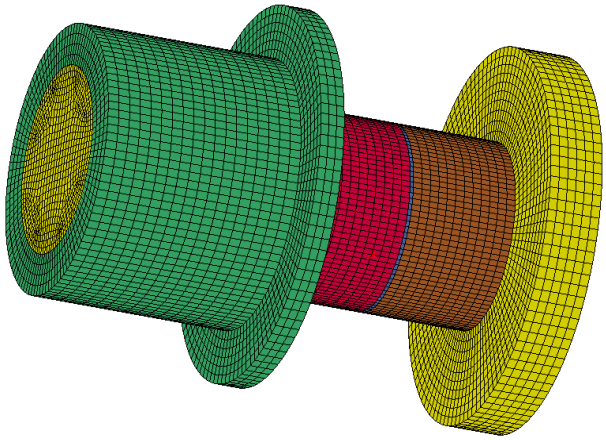
4.6.7 Μοντέλα κόπωσης για μελέτη της επίδρασης της τιμής της εξωτερικής φόρτισης

Για την μελέτη της επίδρασης της τιμής της εξωτερικής φόρτισης στα αποτελέσματα που δίνει ο κώδικας υποβάθμισης λόγω κόπωσης χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα χωρίς κοχλία με διαστάσεις

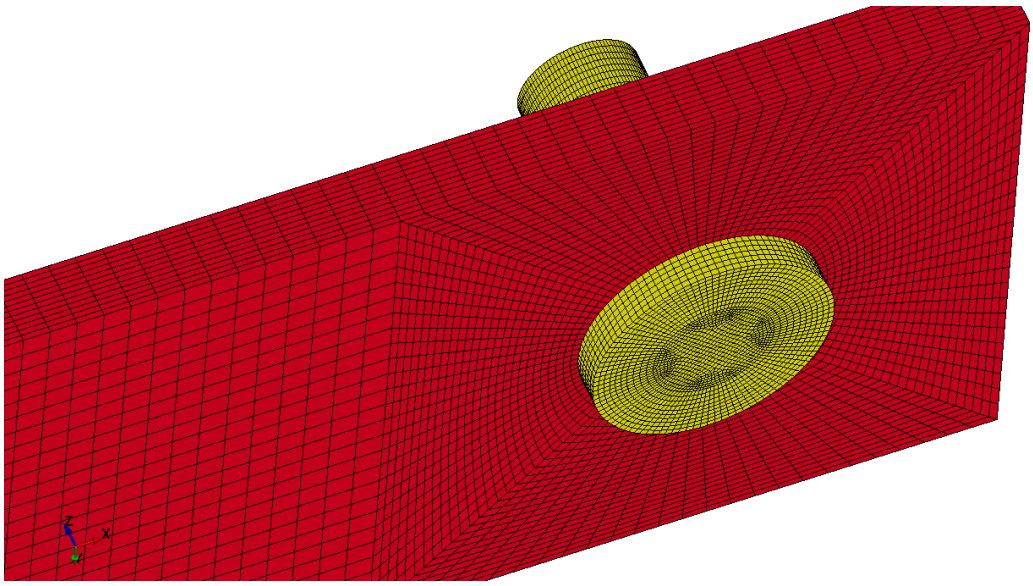
στοιχείων πλέγματος 0.5x0.5mm (εικόνα 3.9) και με κοχλία διαμέτρου 2.4mm με πυκνότητα πλέγματος 26x26 στοιχεία (εικόνα 3.12). Στα μοντέλα αυτά εφαρμόστηκε μικρότερη εξωτερική φόρτιση των 4090 N, ίση με το 50% του φορτίου αστοχίας της κόλλας στο μοντέλο χωρίς κοχλία υπό στατική φόρτιση.

4.7 Τύποι επαφής για την προσομοίωση του κοχλία

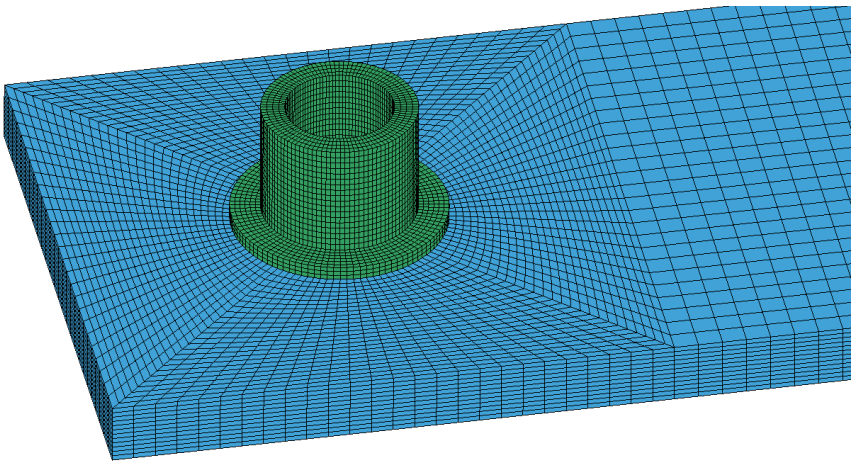
Επειδή για την μοντελοποίηση του κοχλία έχει μοντελοποιηθεί ξεχωριστά το περικόχλιο, χρησιμοποιείται η εντολή CONTACT_TIED_SURFACE_TO_SURFACE για τον ορισμό της επαφής μεταξύ του κοχλία και του περικοχλίου, του περικοχλίου και της άνω πολύστρωτης πλάκας και της κεφαλής του κοχλία με την κάτω πολύστρωτη πλάκα. Η επαφή μεταξύ του κορμού του κοχλία και των πολύστρωτων πλακών εντός της οπής μοντελοποιείται με την εντολή CONTACT_AYTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE. Η τιμή της τάσης προέντασης που χρησιμοποιείται είναι 235 MPa για όλες τις αναλύσεις. Η επιλογή SOFT=1.0 είναι ενεργή για όλες τις αναλύσεις και έχει χρησιμοποιηθεί τεχνητή απόσβεση ίση με 20% της κρίσιμης με τον συντελεστή VDC. Οι συντελεστές στατικής και δυναμικής τριβής FS και FD έχουν μηδενική τιμή. Η ενέργεια SLIDING ENERGY ελεγχόταν κατά τη διάρκεια των αναλύσεων μέσω του GLSTAT ώστε να έχει θετική τιμή και οι επαφές να λειτουργούν σωστά.



Σχήμα 4.16. Επαφή μεταξύ κορμού κοχλία και περικοχλίου.



Σχήμα 4.17. Επαφή μεταξύ κεφαλής κοχλία και της κάτω πολύστρωτης πλάκας.



Σχήμα 4.18. Επαφή μεταξύ περικοχλίου και της άνω πολύστρωτης πλάκας.

4.8 Επιλογή παραμέτρων DAMPING και HOURGLASS

Για την καλύτερη προσέγγιση ψευδοστατικής φόρτισης εισάχθηκε τεχνητή απόσβεση Damping σε όλα τα μοντέλα. Για την αποφυγή χαμηλών συχνοτήτων ταλάντωσης χρησιμοποιήθηκε η εντολή DAMPING_GLOBAL που εφαρμόζει τεχνητή απόσβεση σε όλα τα μέλη της ανάλυσης. Ο συντελεστής απόσβεσης είχε τιμή 10000 για τις στατικές αναλύσεις και 5000 για τις αναλύσεις κόπωσης. Για την αποφυγή υψηλών συχνοτήτων ταλάντωσης εφαρμόστηκε επιπλέον απόσβεση

σε κάθε μέλος με την εντολή DAMPING_PART_STIFFNESS με συντελεστή 0.2. Η ενέργεια απόσβεσης Damping Energy ελεγχόταν κατά τη διάρκεια των αναλύσεων ώστε να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα.

Για την αποφυγή μορφής hourglass των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιήθηκε η εντολή CONTROL_HOURGLASS για εφαρμογή ελέγχου του hourglass. Ο τύπος ελέγχου που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις αναλύσεις ήταν ο τύπος 5 και με συντελεστή 0.05. Οι μορφές των πεπερασμένων στοιχείων καθώς και η ενέργεια hourglass energy ελέγχονταν κατά τη διάρκεια των αναλύσεων. Μία σύνοψη των παραμέτρων Damping και Hourglass δίνεται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 4.7. Παράμετροι Damping και Hourglass που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις.

Φόρτιση	**DAMPING_GLOBAL**	**DAMPING_PART_STIFFNESS**
Ψευδοστατική	10000	0.2
Κόπωσης	5000	0.2
Φόρτιση	**HOURGLASS ID**	**Συντελεστής**
Ψευδοστατική	5	0.05
Κόπωσης	5	0.05

4.9 Σύνοψη των αναλύσεων που πραγματοποιούνται στην εργασία

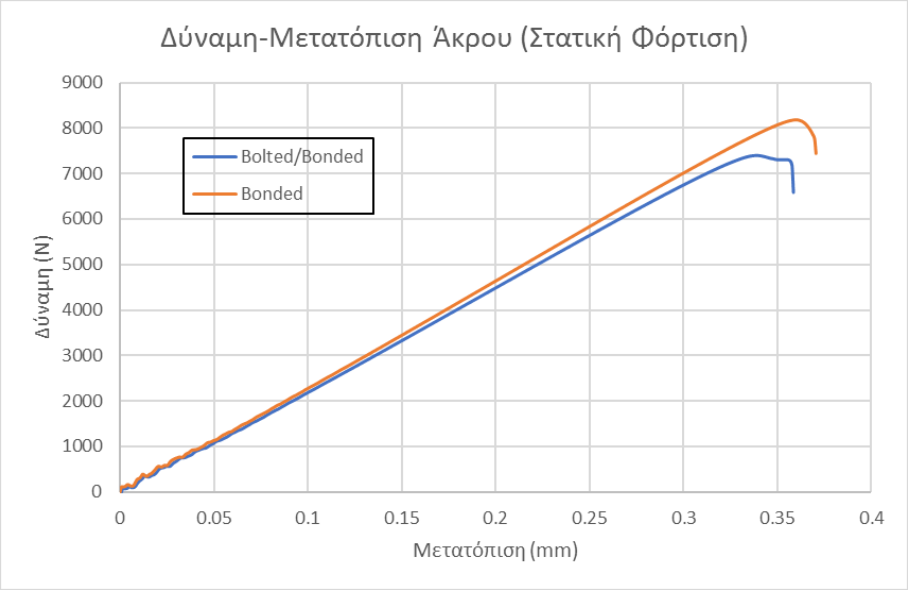
Αρχικά πραγματοποιούνται δύο αναλύσεις σε συνδέσεις με και χωρίς κοχλία υπό ψευδοστατική φόρτιση ώστε να βρεθεί το φορτίο αστοχίας της κόλλας και να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια σε αναλύσεις για φόρτιση κόπωσης. Έπειτα πραγματοποιούνται αναλύσεις για φόρτιση κόπωσης σε μοντέλα συνδέσεων χωρίς κοχλία, με κοχλία διαμέτρου 4.8mm και με κοχλία διαμέτρου 2.4mm για δύο διαφορετικές πυκνότητες πλέγματος σε κάθε περίπτωση. Στη συνέχεια πραγματοποιούνται δύο αναλύσεις σε φόρτιση κόπωσης για να εξεταστεί η επίδραση του σχήματος των πεπερασμένων στοιχείων στα αποτελέσματα. Τέλος, πραγματοποιούνται 2 αναλύσεις σε φόρτιση κόπωσης με μικρότερη εξωτερική φόρτιση για τις συνδέσεις χωρίς κοχλία και με κοχλία διαμέτρου 2.4mm.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

5.1 Αποτελέσματα ψευδοστατικών αναλύσεων

5.1.1 Διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης του άκρου στην x διεύθυνση

Οι καμπύλες δύναμης-μετατόπισης στη x διεύθυνση του φορτιζόμενου άκρου της σύνδεσης παρουσιάζονται σε συγκριτικό γράφημα για τα δύο μοντέλα με και χωρίς κοχλία.



Σχήμα 5.1. Καμπύλες Δύναμης-Μετατόπισης άκρου των ψευδστατικών αναλύσεων.

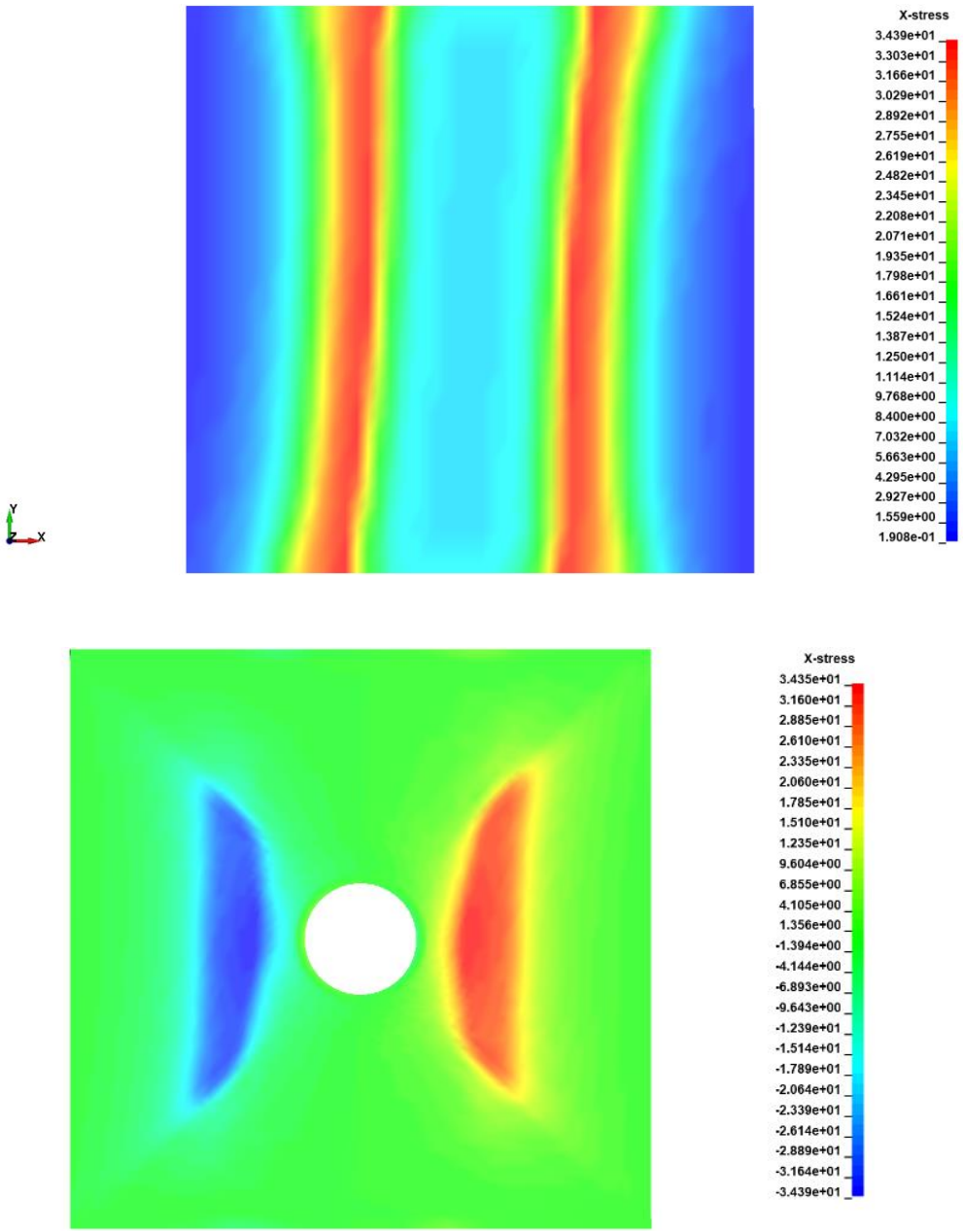
Η δύναμη για αστοχία της κόλλας που παρουσιάστηκε σε κάθε περίπτωση δίνεται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 5.1. Μέγιστες δυνάμεις ψευδοστατικών αναλύσεων.

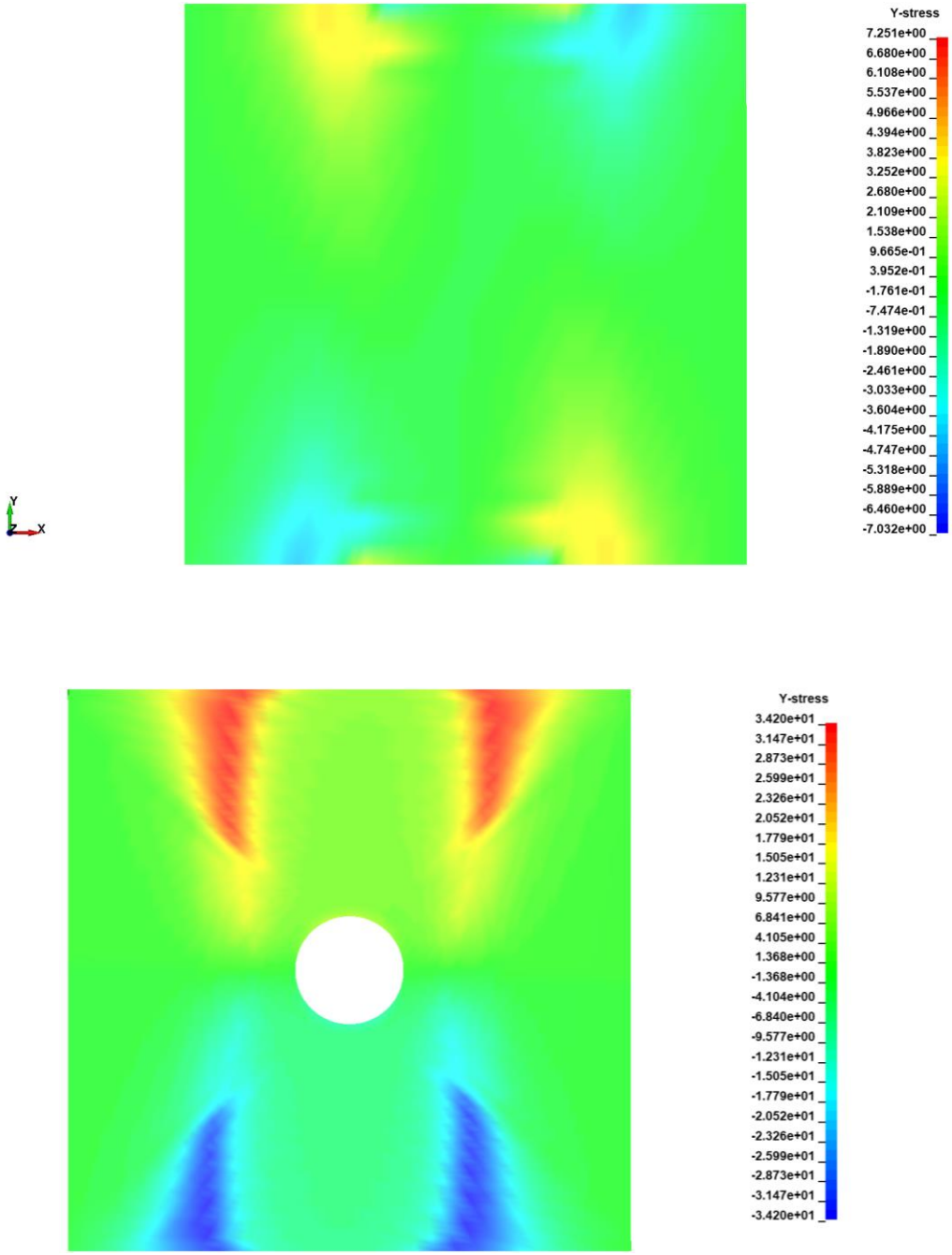
Μοντέλο	**Μέγιστη δύναμη**
Χωρίς κοχλία	8181 N
Με κοχλία	7400 N

5.1.2 Κατανομές τάσεων στην κόλλα

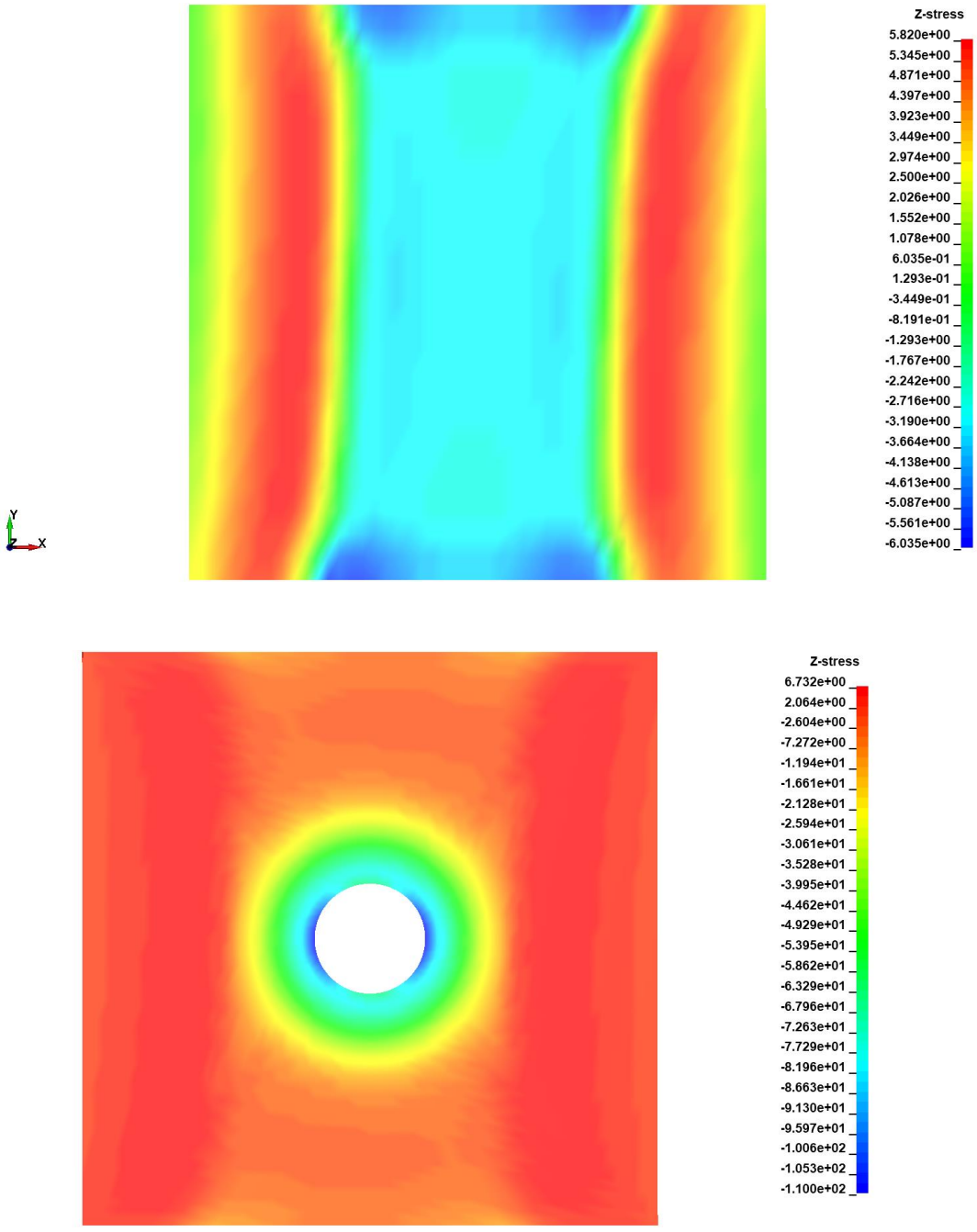
Οι κατανομές τάσεων στις διευθύνσεις x, y και z ακριβώς πριν την εκκίνηση της αποκόλλησης για τα μοντέλα με και χωρίς κοχλία παρουσιάζονται στα σχήματα που ακολουθούν.



Σχήμα 5.2. Κατανομές τάσης στην κόλλα στη x διεύθυνση ακριβώς πριν την εκκίνηση της αποκόλλησης: χωρίς κοχλία (πάνω), με κοχλία (κάτω), τιμές σε MPa.

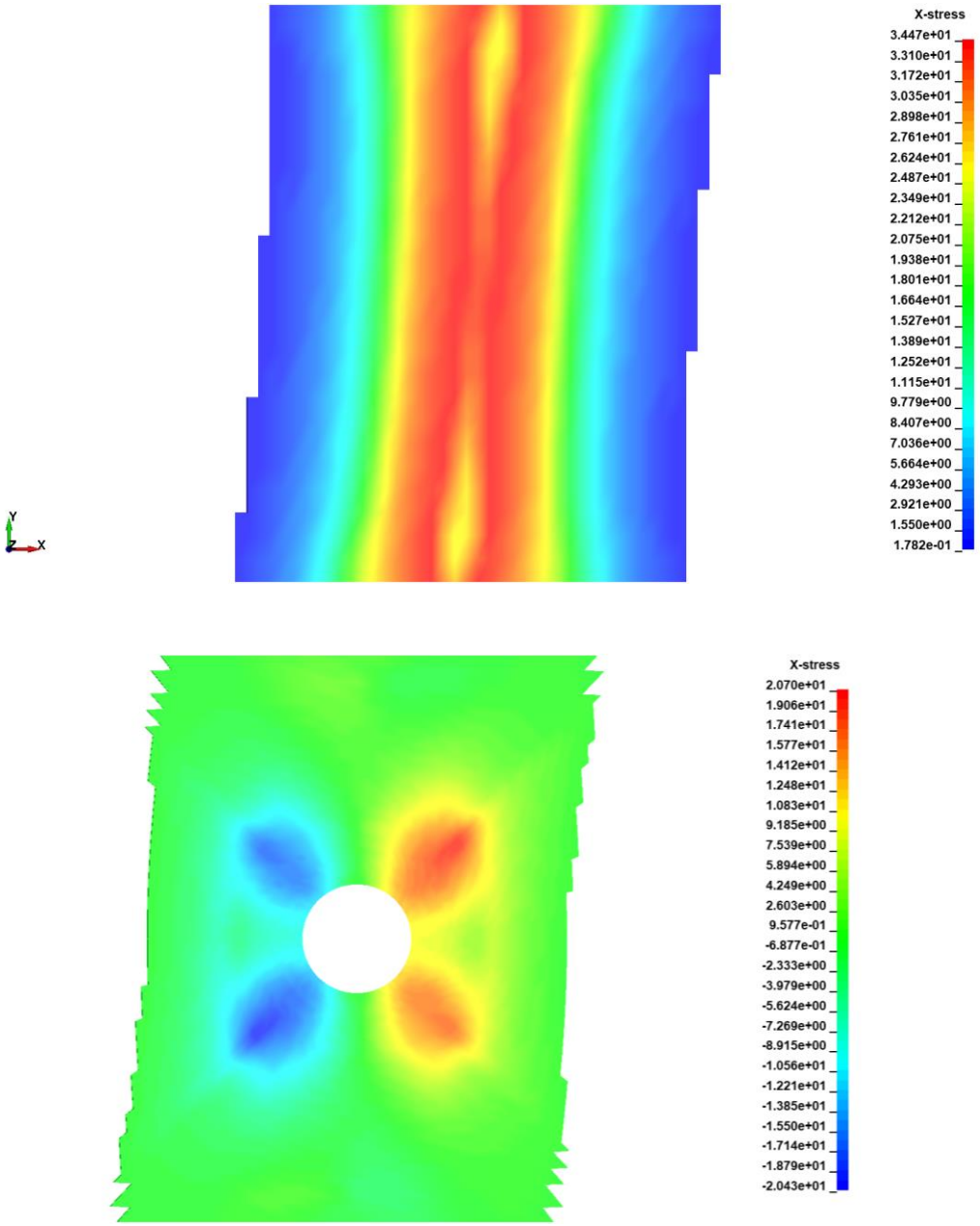


Σχήμα 5.3. Κατανομές τάσης στην κόλλα στη y διεύθυνση ακριβώς πριν την εκκίνηση της αποκόλλησης: χωρίς κοχλία (πάνω), με κοχλία (κάτω), τιμές σε MPa.

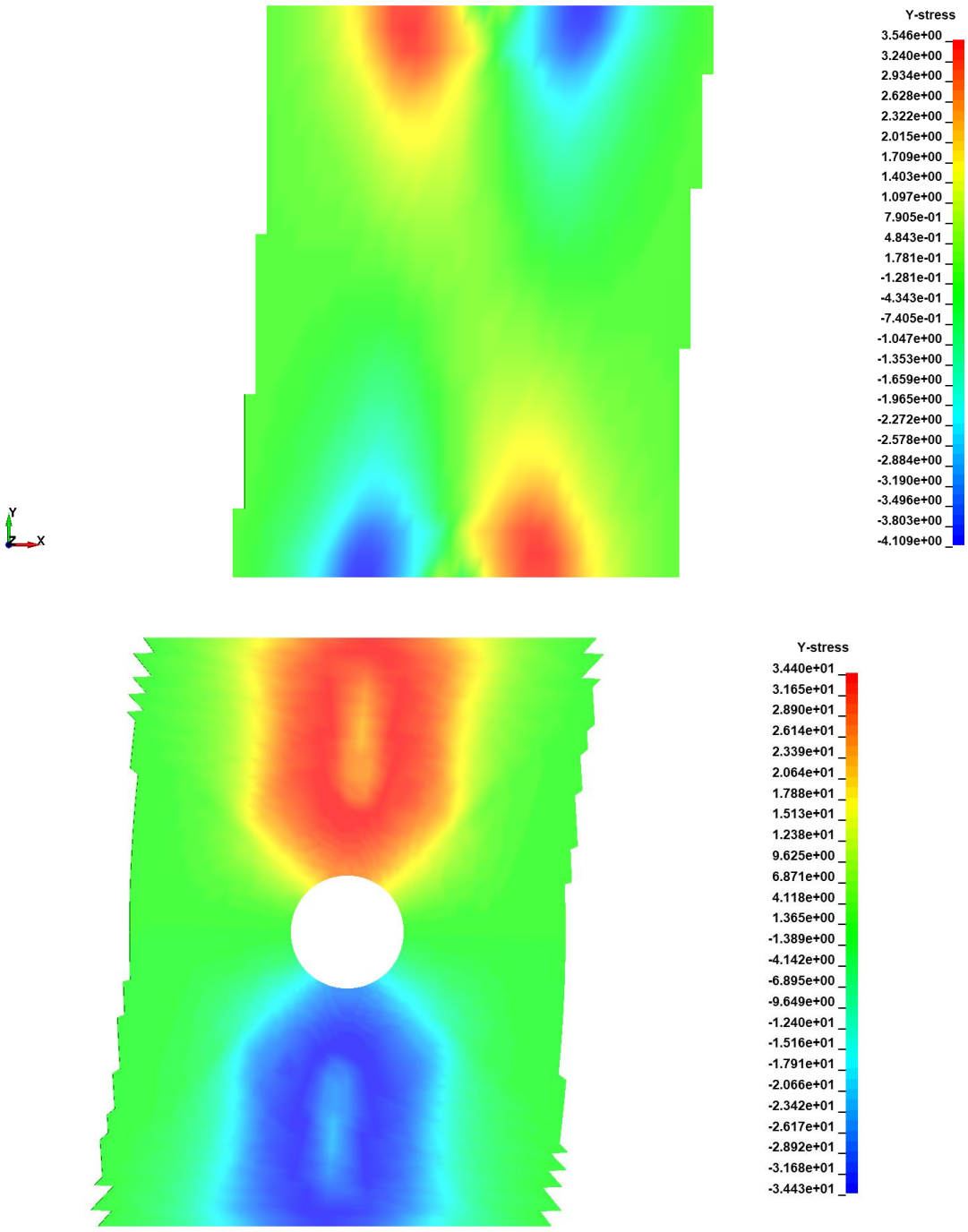


Σχήμα 5.4. Κατανομές τάσης στην κόλλα στη z διεύθυνση ακριβώς πριν την εκκίνηση της αποκόλλησης: χωρίς κοχλία (πάνω), με κοχλία (κάτω), τιμές σε MPa.

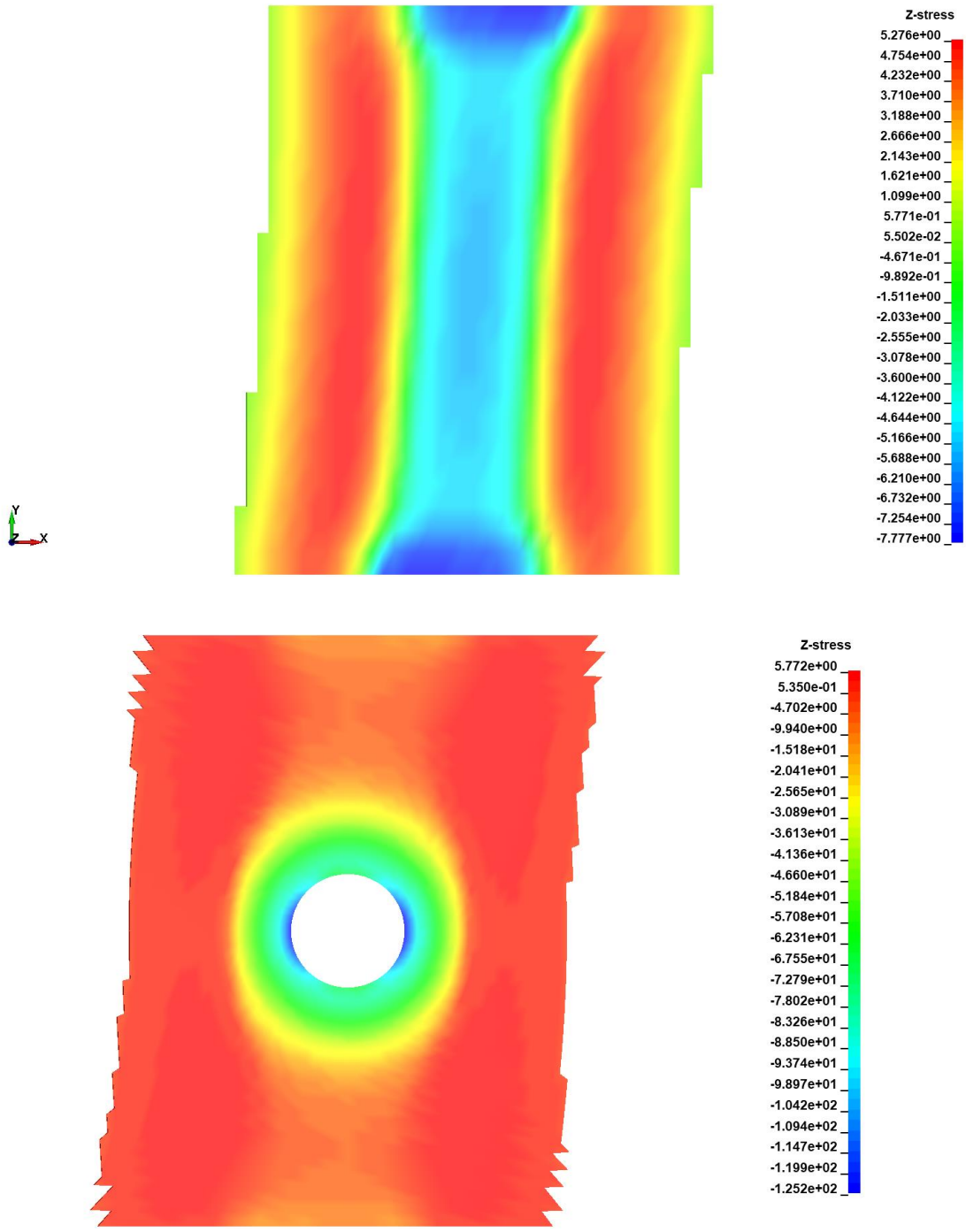
Οι αντίστοιχες κατανομές για προχωρημένο στάδιο αποκόλλησης παρουσιάζονται στα επόμενα σχήματα.



Σχήμα 5.5. Κατανομές τάσης στην κόλλα στη x διεύθυνση σε προχωρημένο στάδιο αποκόλλησης: χωρίς κοχλία (πάνω), με κοχλία (κάτω), τιμές σε MPa.



Σχήμα 5.6. Κατανομές τάσης στην κόλλα στη y διεύθυνση σε προχωρημένο στάδιο αποκόλλησης: χωρίς κοχλία (πάνω), με κοχλία (κάτω), τιμές σε MPa.



Σχήμα 5.7. Κατανομές τάσης στην κόλλα στη z διεύθυνση σε προχωρημένο στάδιο αποκόλλησης: χωρίς κοχλία (πάνω), με κοχλία (κάτω), τιμές σε MPa.

Για τις ψευδοστατικές αναλύσεις σημειώνονται οι εξής παρατηρήσεις:

1. Από το σχήμα 5.1 παρατηρείται ότι η πλήρης αποκόλληση συμβαίνει πολύ γρήγορα, σε χαμηλές τιμές μετατόπισης ενώ στις καμπύλες δεν παρουσιάζεται εμφανής περιοχή διάδοσης της αποκόλλησης.
2. Οι καμπύλες φτάνουν μέχρι το σημείο όπου υπάρχει πλήρης αποκόλληση στην κόλλα και δεν συνεχίζουν από εκεί και έπειτα. Επειδή ο κοχλίας εξακολουθεί να φέρει φορτίο, η καμπύλη του αντίστοιχου μοντέλου θα συνέχιζε να αυξάνει. Όμως λόγω της φύσης της explicit ανάλυσης που χρησιμοποιείται, υπάρχουν έντονα δυναμικά φαινόμενα μετά την αστοχία ης κόλλας και για αυτό η καμπύλη αποκόπτεται.
3. Το φορτίο αστοχίας της κόλλας στο μοντέλο με κοχλία είναι μικρότερο από το αντίστοιχο φορτίο στο μοντέλο χωρίς κοχλία. Επίσης παρουσιάζεται μία ελάττωση της δυσκαμψίας για το μοντέλο με κοχλία που φαίνεται από τη μείωση της κλίσης της καμπύλης του αντίστοιχου μοντέλου σε σχέση με αυτό χωρίς κοχλία στο σχήμα 5.1.
4. Η παρουσία του κοχλία μεταβάλλει το εντατικό πεδίο στην κόλλα και δημιουργεί συγκέντρωση τάσεων όπως φαίνεται από τα σχήματα 5.2 έως 5.7 που παρουσιάζουν τις κατανομές τάσεων στα μοντέλα με και χωρίς κοχλία.
5. Η βλάβη στο σύνθετο υλικό είναι μεγαλύτερη στο μοντέλο με κοχλία, κοντά στην περιοχή του κοχλία από τα αποτελέσματα του MAT_162 που προσομοιώνει τη βλάβη στο σύνθετο υλικό.

5.2 Αποτελέσματα αναλύσεων για φόρτιση κόπωσης

5.2.1 Κύκλοι για πλήρη αποκόλληση

Οι κύκλοι φόρτισης που χρειάστηκαν ώστε να αποκολληθεί πλήρως η στρώση της κόλλας για κάθε ανάλυση ήταν οι εξής:

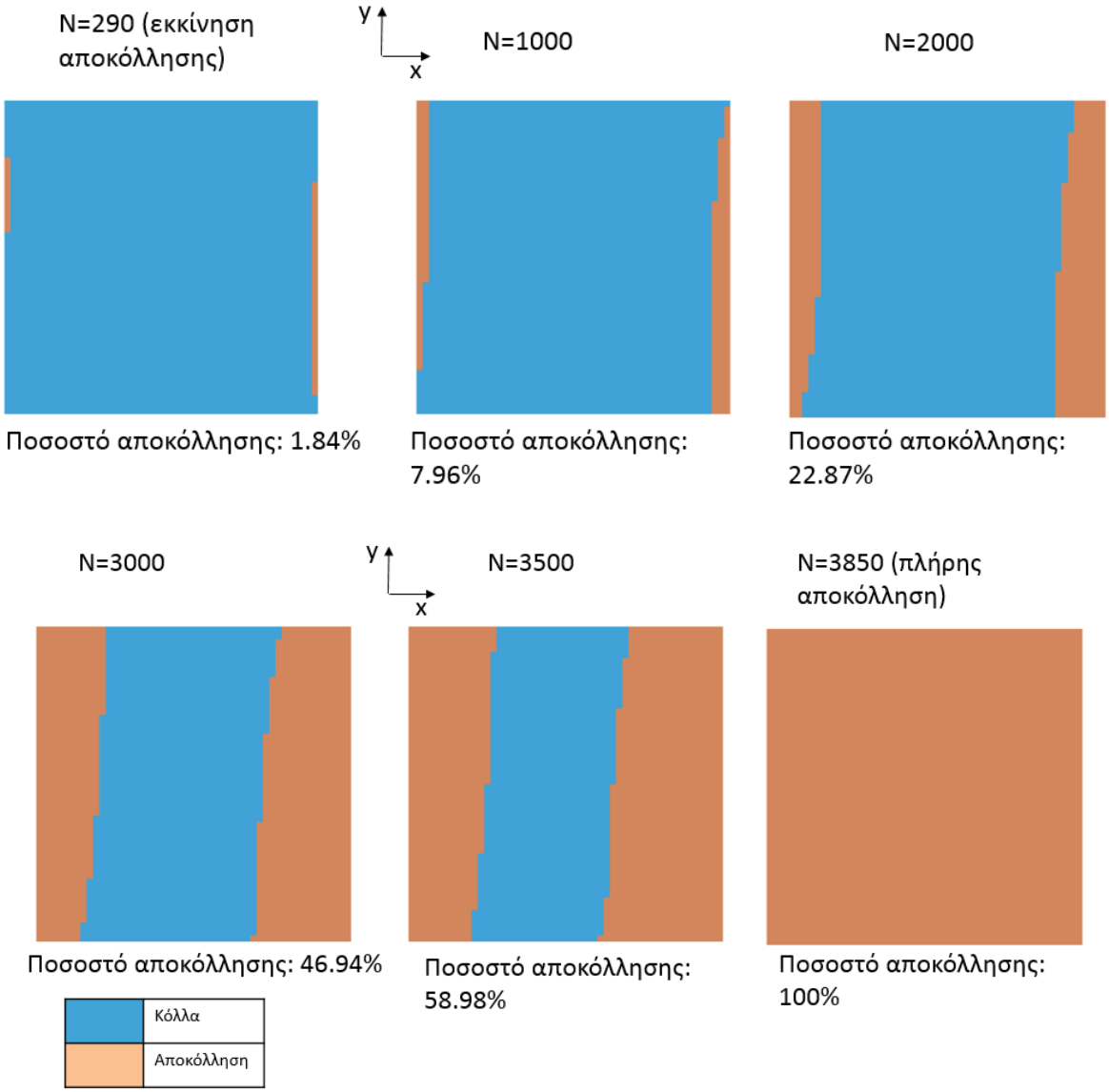
Πίνακας 5.2. Κύκλοι για πλήρη αποκόλληση των αναλύσεων κόπωσης.

Μοντέλο	**Κύκλοι για πλήρη αποκόλληση**
Χωρίς κοχλία (1x1mm)	3960
Χωρίς κοχλία (0.5x0.5mm)	3850
Με κοχλία 4.8mm (13x12)	5050
Με κοχλία 4.8mm (26x26)	6500 (Διακοπή αποκόλλησης)
Με κοχλία 2.4mm (13x13)	4430
Με κοχλία 2.4mm (26x26)	4480
Χωρίς κοχλία - Με παρόμοιο mesh με το μοντέλο με κοχλία για μελέτη της επίδρασης του σχήματος του πλέγματος (αραιό mesh)	4970
Χωρίς κοχλία - Με παρόμοιο mesh με το μοντέλο με κοχλία για μελέτη της επίδρασης του σχήματος του πλέγματος (πυκνό mesh)	4850

Στην περίπτωση του μοντέλου με κοχλία διαμέτρου 4.8mm με πλέγμα 26x26 παρουσιάστηκε διακοπή της αποκόλλησης και το μοντέλο ήρθε σε ενεργειακή ισορροπία.

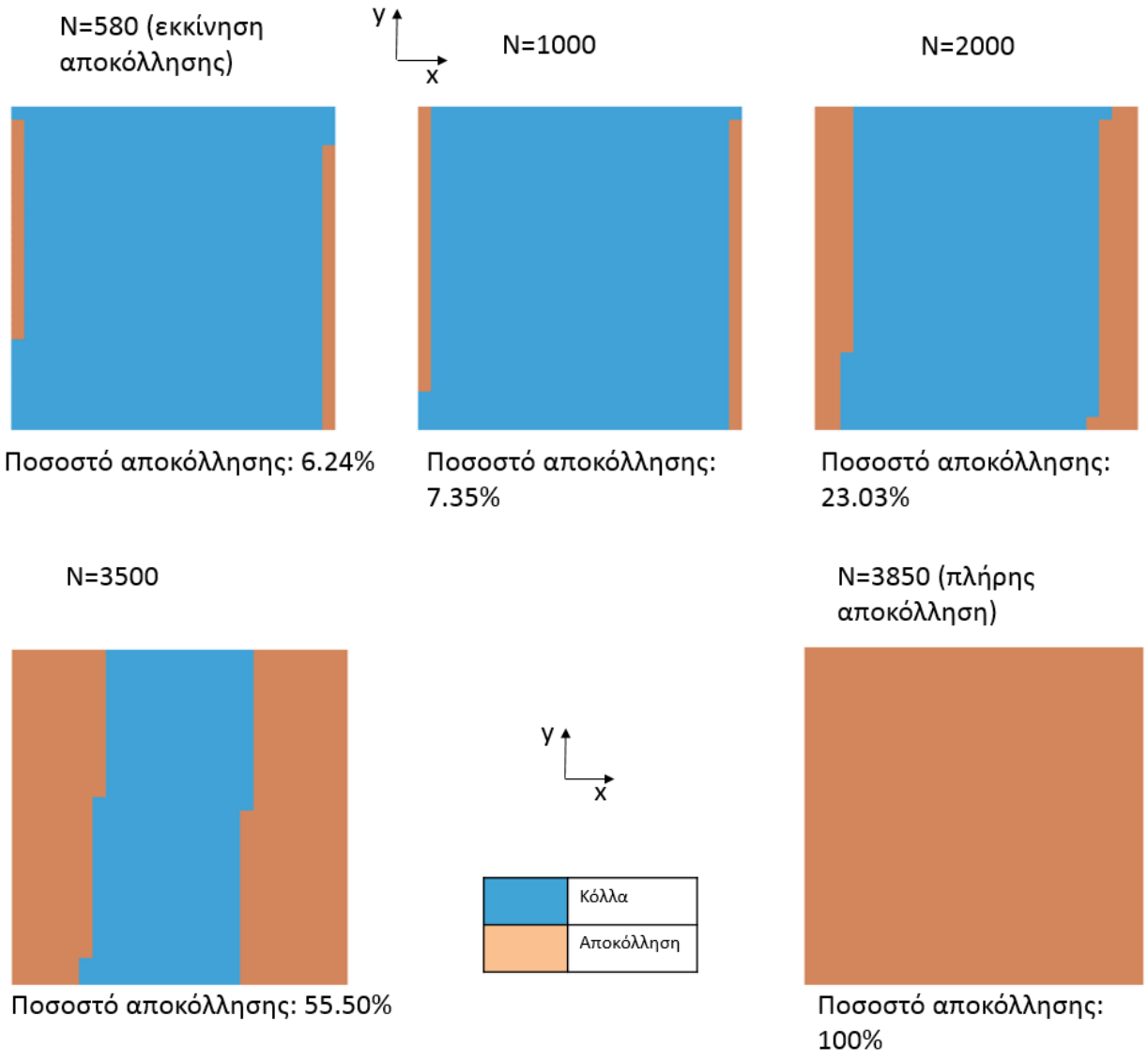
5.2.2 Εξέλιξη της αποκόλλησης στα μοντέλα χωρίς κοχλία

Η εξέλιξη της αποκόλλησης παρουσιάζεται με σχήματα όπου σε συγκεκριμένο αριθμό κύκλων φόρτισης απεικονίζεται η κατάσταση του στρώματος της κόλλας. Για το μοντέλο χωρίς κοχλία με mesh 0.5x0.5mm καταγράφηκε η εικόνα που ακολουθεί.



Σχήμα 5.8. Εξέλιξη της αποκόλλησης στο μοντέλο χωρίς κοχλία με mesh 0.5x0.5mm.

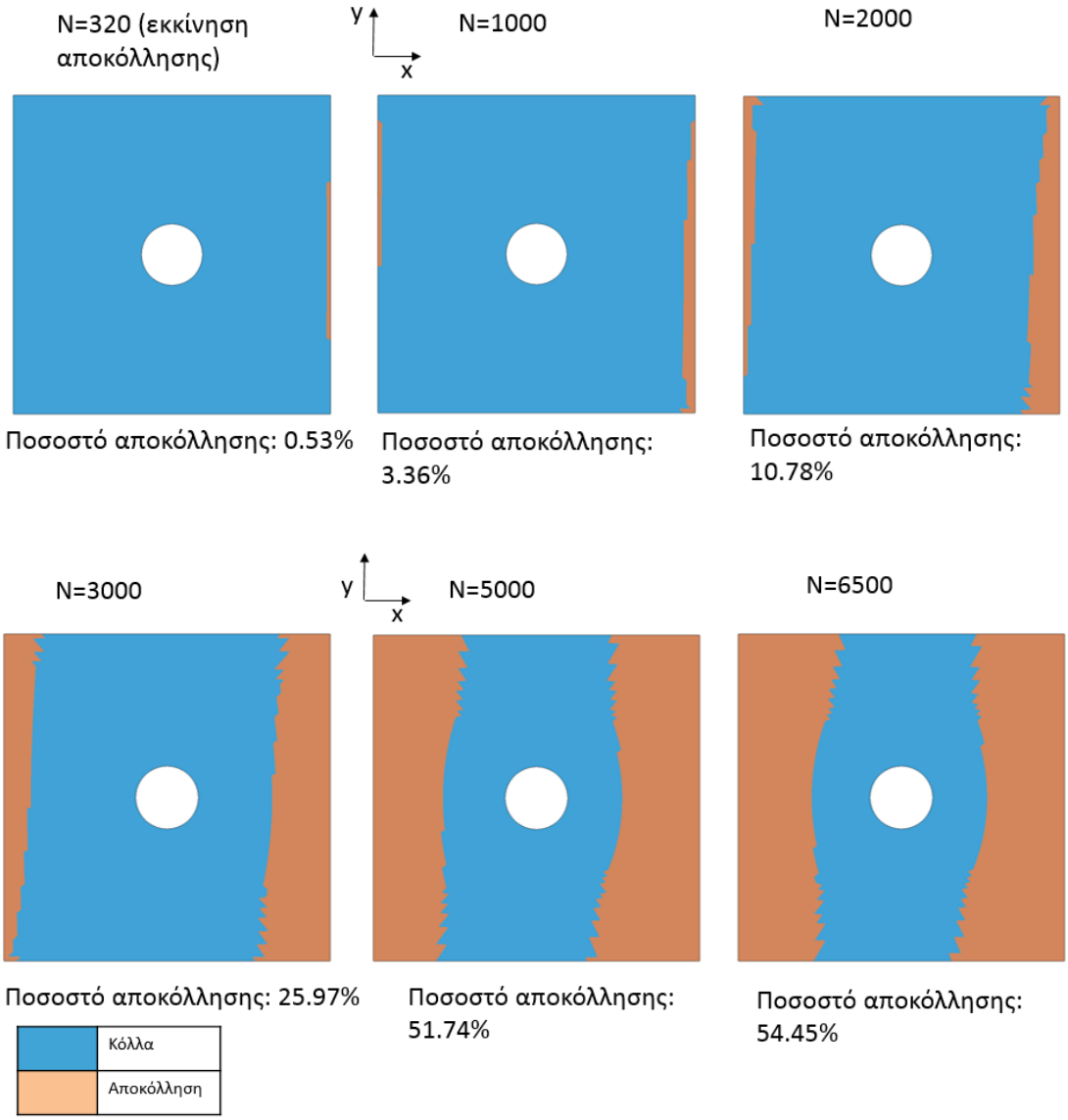
Για το μοντέλο με mesh 1x1mm καταγράφηκε η εξής εικόνα:



Σχήμα 5.9. Εξέλιξη της αποκόλλησης στο μοντέλο χωρίς κοχλία με mesh 1x1 mm.

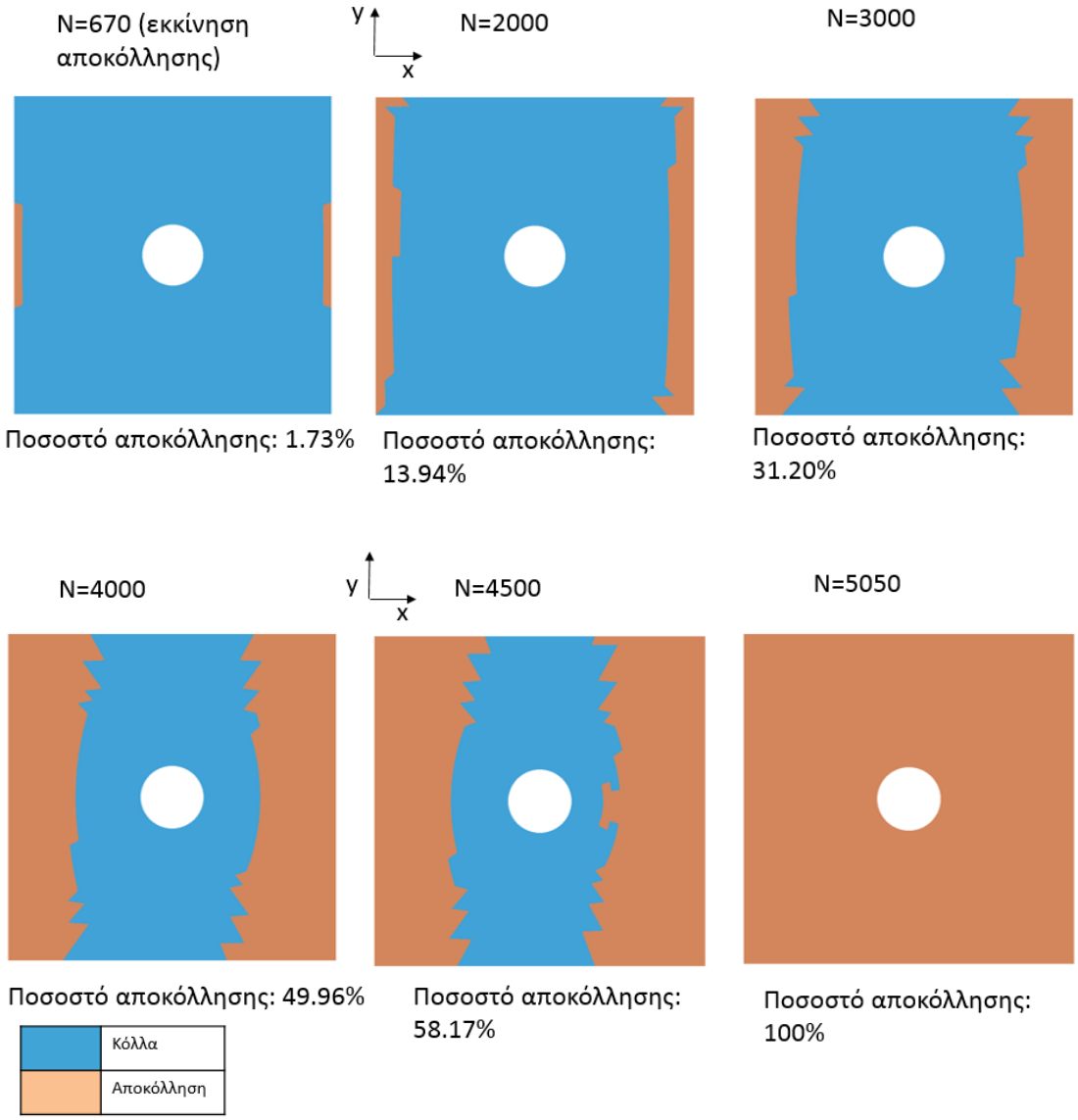
5.2.3 Εξέλιξη της αποκόλλησης στα μοντέλα με κοχλία διαμέτρου 4.8mm

Για το μοντέλο με κοχλία διαμέτρου 4.8mm και με πυκνό mesh:



Σχήμα 5.10. Εξέλιξη της αποκόλλησης στο μοντέλο με κοχλία διαμέτρου 4.8mm με πυκνό mesh.

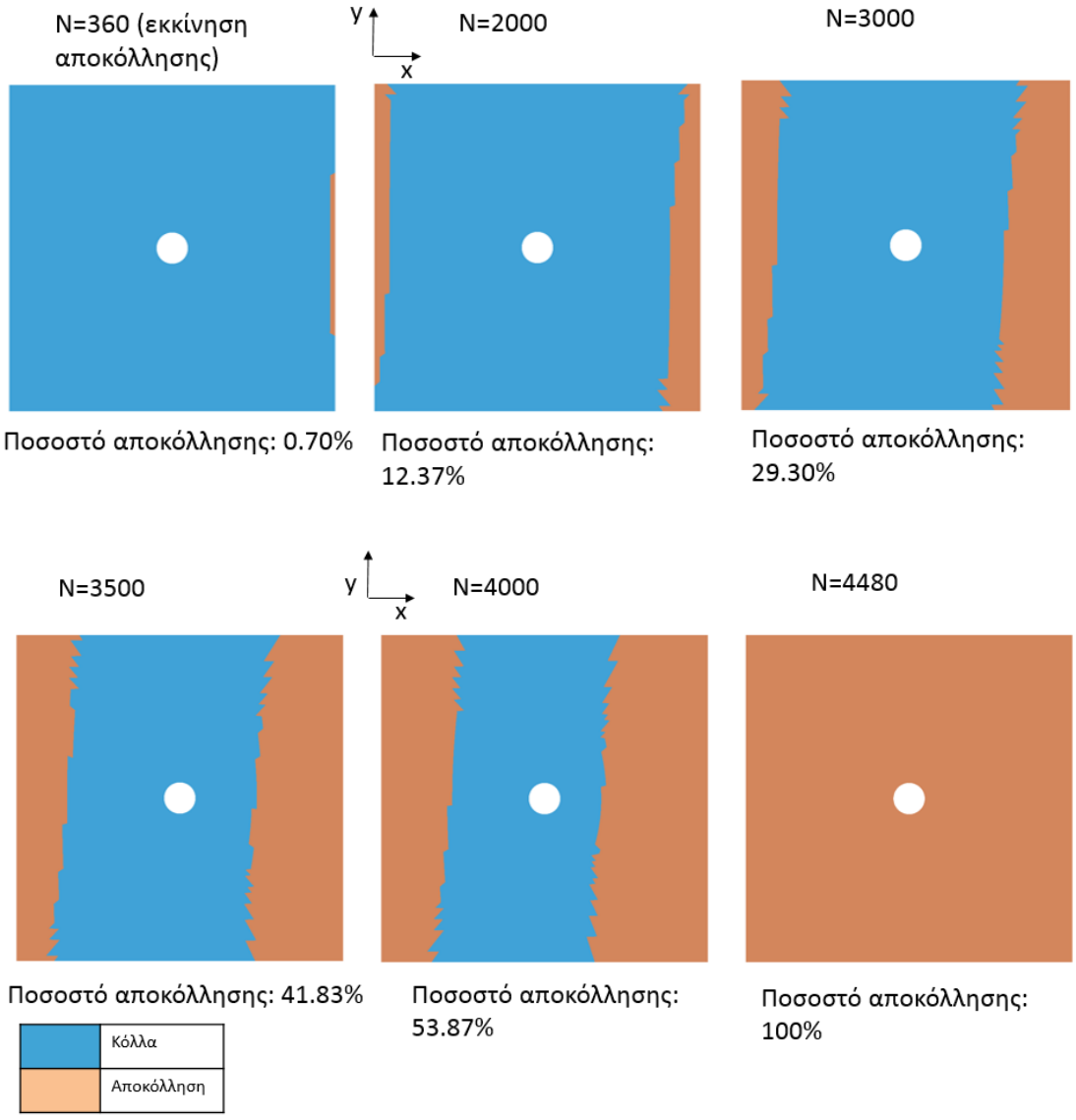
Για το μοντέλο με κοχλία διαμέτρου 4.8mm και με αραιό mesh:



Σχήμα 5.11. Εξέλιξη της αποκόλλησης στο μοντέλο με κοχλία διαμέτρου 4.8mm με αραιό mesh.

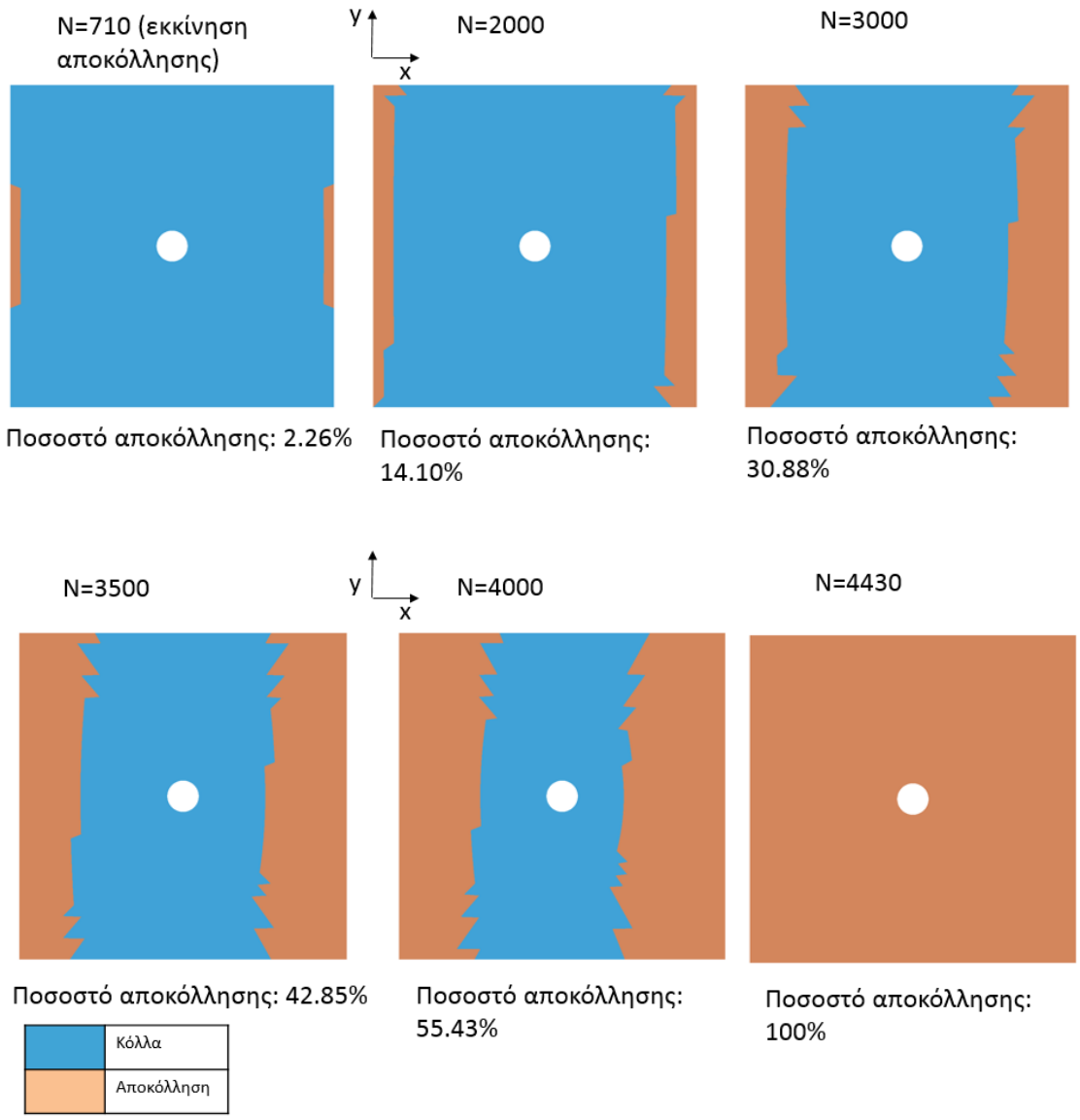
5.2.4 Εξέλιξη της αποκόλλησης στα μοντέλα με κοχλία διαμέτρου 2.4mm

Για το μοντέλο με κοχλία διαμέτρου 2.4mm και με πυκνότητα mesh 26x26:



Σχήμα 5.12. Εξέλιξη της αποκόλλησης στο μοντέλο με κοχλία διαμέτρου 2.4mm με mesh 26x26.

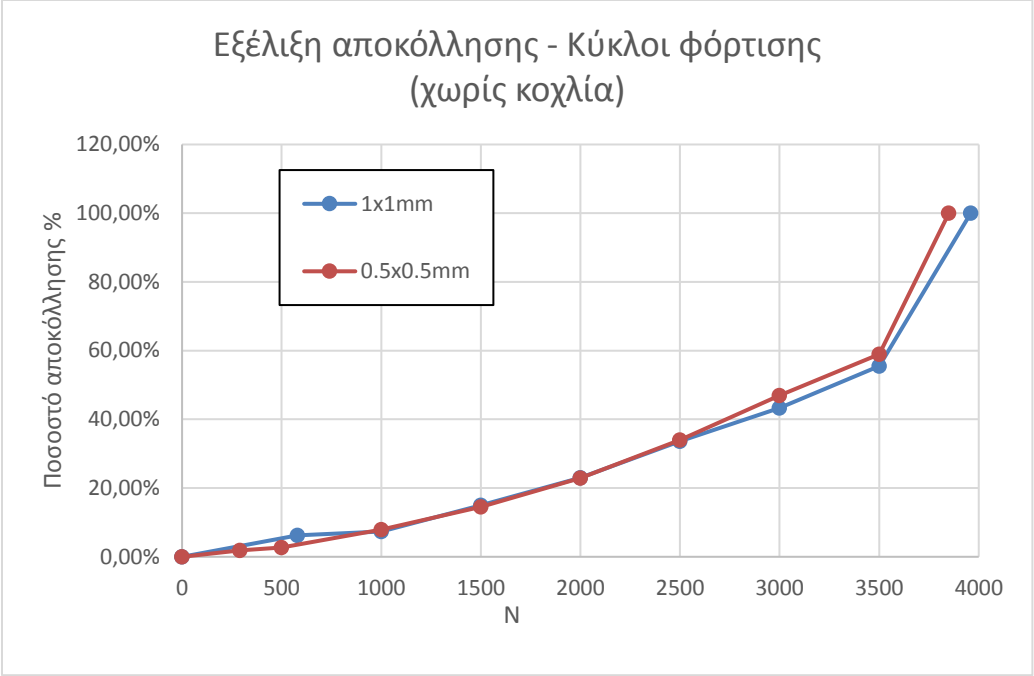
Για το μοντέλο με κοχλία διαμέτρου 2.4mm και με πυκνότητα mesh 13x13:



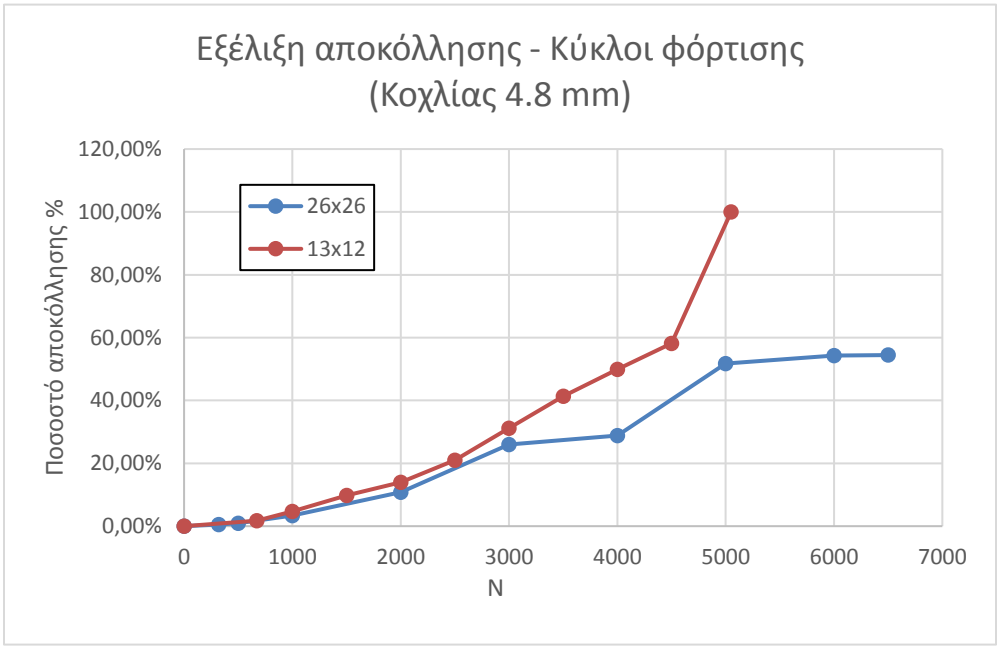
Σχήμα 5.13. Εξέλιξη της αποκόλλησης στο μοντέλο με κοχλία διαμέτρου 2.4mm με mesh 13x13.

5.2.5 Διαγράμματα εξέλιξης της αποκόλλησης

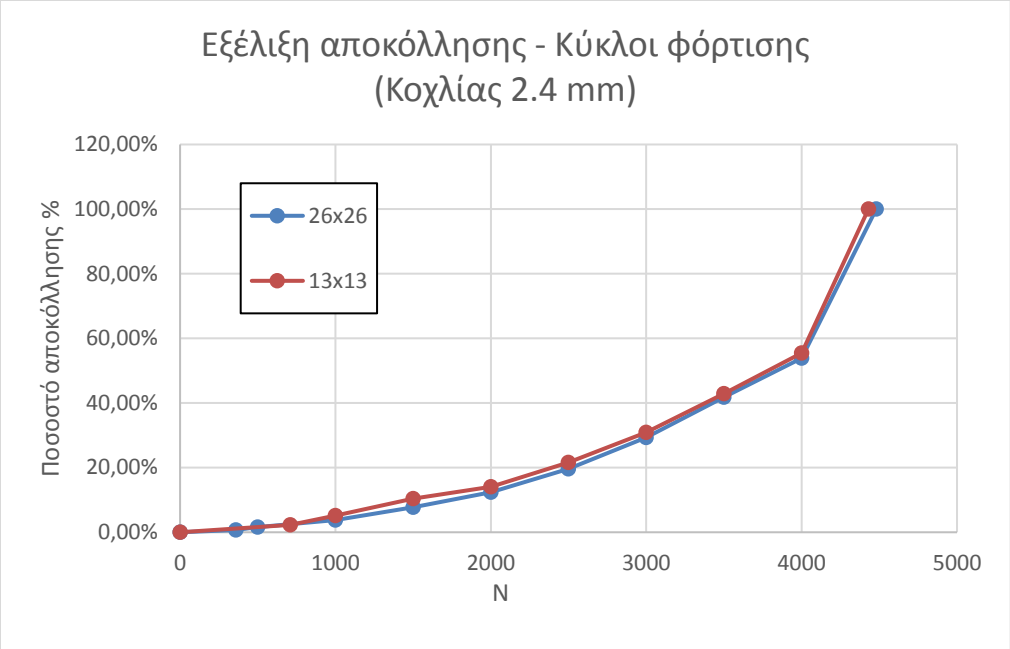
Οι καμπύλες ποσοστού αποκόλλησης(υπολογισμένη ως προς την αρχική επιφάνεια της κόλλας) συναρτήσει των κύκλων φόρτισης για τα δύο μοντέλα με πυκνό και αραιό mesh, με κοχλία διαμέτρου 4.8mm,2.4 mm και χωρίς κοχλία παρουσιάζονται στα επόμενα γραφήματα:



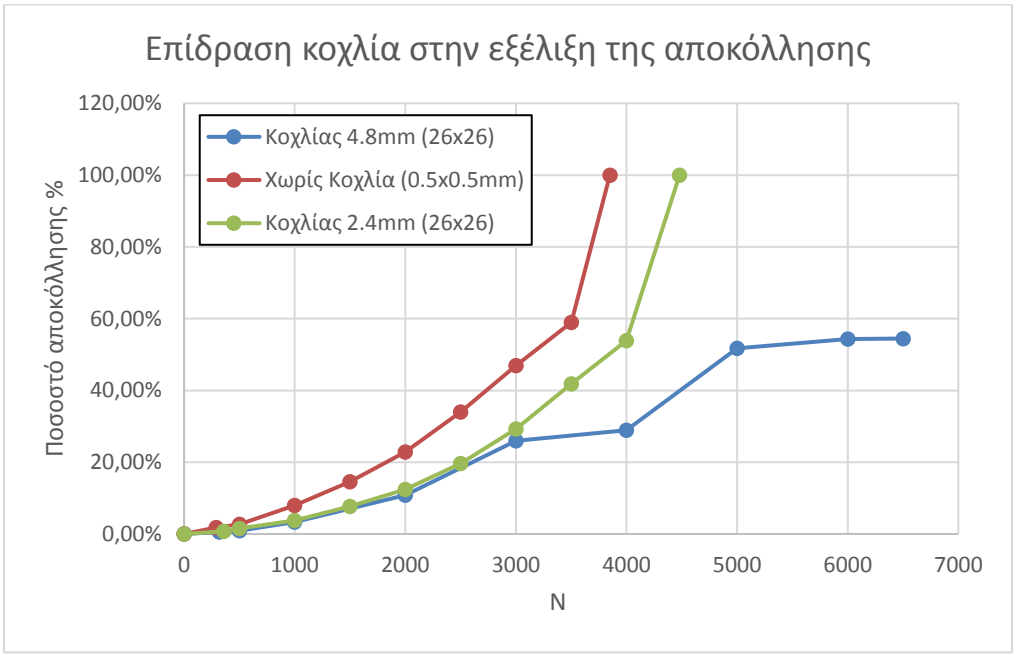
Σχήμα 5.14. Συγκριτικό γράφημα Ποσοστού αποκόλλησης- Κύκλων φόρτισης για τα μοντέλα χωρίς κοχλία.



Σχήμα 5.15. Συγκριτικό γράφημα Ποσοστού αποκόλλησης- Κύκλων φόρτισης για τα μοντέλα με κοχλία διαμέτρου 4.8mm.



Σχήμα 5.16. Συγκριτικό γράφημα Ποσοστού αποκόλλησης- Κύκλων φόρτισης για τα μοντέλα με κοχλία διαμέτρου 2.4mm.



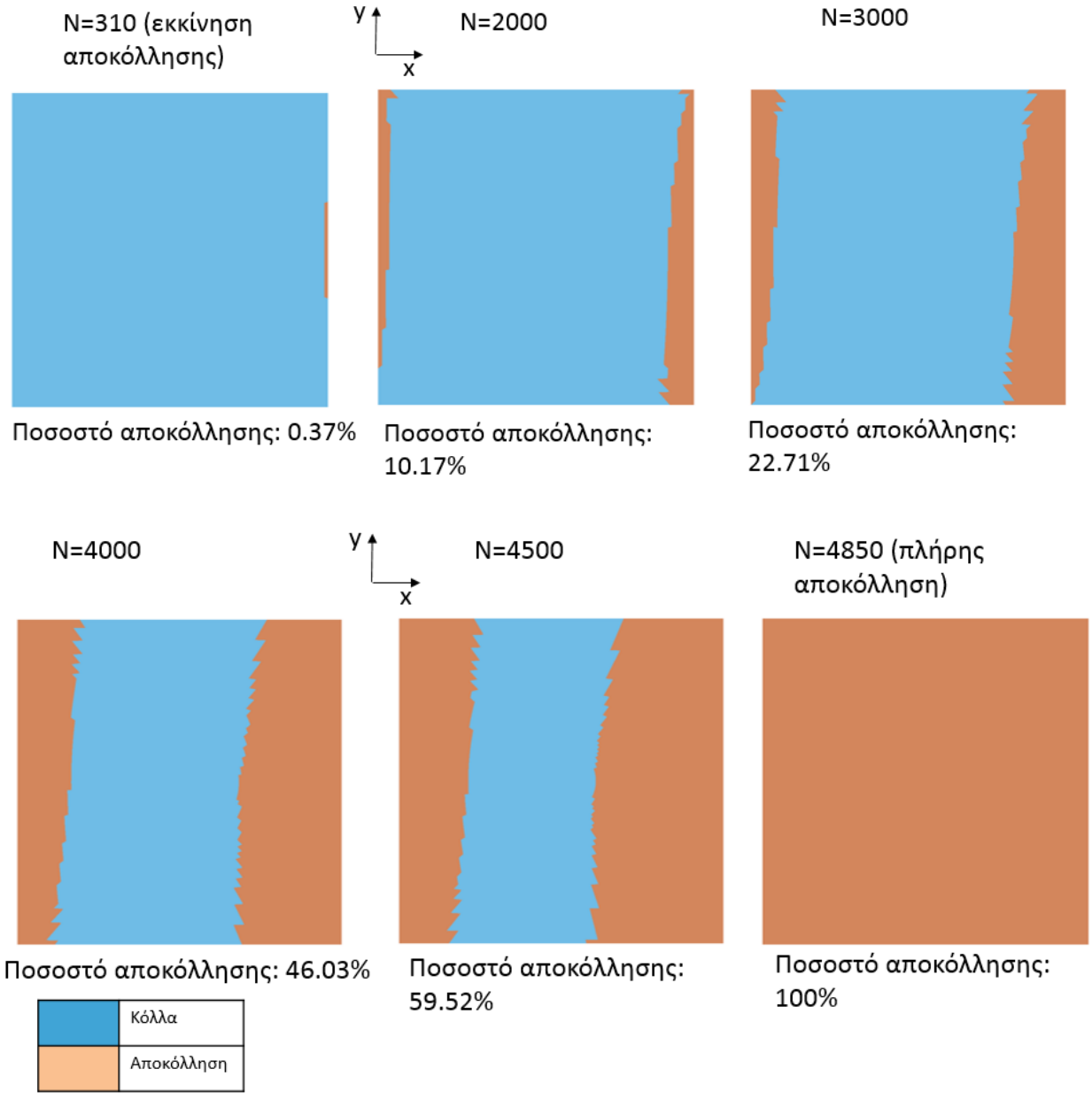
Σχήμα 5.17. Συγκριτικό γράφημα Ποσοστού αποκόλλησης- Κύκλων φόρτισης για τα μοντέλα με το πυκνότερο πλέγμα.

Σαν παρατηρήσεις από την εφαρμογή του κώδικα υποβάθμισης λόγω κόπωσης στα παραπάνω μοντέλα σημειώνονται τα εξής:

1. Υπήρξε σύγκλιση των αποτελεσμάτων που δίνουν τα μοντέλα για τις δύο διαφορετικές πυκνότητες πλέγματος στις περιπτώσεις με χρήση κοχλία διαμέτρου 2.4mm και χωρίς κοχλία. Σε κάθε περίπτωση από αυτές τις δύο όμως υπήρξε μία μικρή διαφορά στους κύκλους για πλήρη αποκόλληση της κόλλας.
2. Στο μοντέλο με κοχλία διαμέτρου 4.8mm παρατηρείται διαφορά στα αποτελέσματα του αραιού και του πιο πυκνού πλέγματος. Στο αραιό πλέγμα υπάρχει πλήρης αστοχία της κόλλας στους 5050 κύκλους φόρτισης ενώ στο πυκνό πλέγμα το μοντέλο έφτασε σε ενεργειακή ισορροπία και η αποκόλληση της κόλλας διακόπηκε ενώ το μοντέλο έτρεξε για περισσότερους από 6500 κύκλους φόρτισης. Αυτό συνέβη διότι ο ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας G των στοιχείων στην κορυφή της ρωγμής αποκόλλησης ήταν μικρότερος από την τιμή κατώφλι Gthresh που ορίστηκε σαν παράμετρος του κώδικα υποβάθμισης. Αυτό υποδεικνύει ότι η παρουσία του κοχλία μικραίνει τα φορτία που δέχεται το στρώμα της κόλλας και για αυτό το λόγο μίκρυνε η τιμή του G των στοιχείων της κόλλας κοντά στον κοχλία σε σχέση με την τιμή του G που είχαν τα στοιχεία μακριά από τον κοχλία στις άκρες του overlap. Στο μοντέλο με πυκνότερο πλέγμα το Gthresh που ορίστηκε ήταν μεγαλύτερο λόγω του μικρότερου μεγέθους των στοιχείων στα άκρα του overlap. Επειδή το μέγεθος των στοιχείων αυτών ήταν μικρότερο, το G που αποθήκευαν ήταν μεγαλύτερο αφού φορτίζονταν περισσότερο σε σχέση με το αμέσως επόμενο στοιχείο. Το Gthresh υπολογίζεται πάντα από τα στοιχεία στην άκρη του overlap.
3. Στα μοντέλα που περιέχουν κοχλία παρουσιάζεται καθυστέρηση της αποκόλλησης σε σχέση με τα μοντέλα χωρίς κοχλία, το οποίο υποδεικνύει ότι η χρήση κοχλία σαν μηχανισμό επιβράδυνσης της αποκόλλησης έχει επιτυχία.
4. Σε κάθε περίπτωση, η έναρξη της αποκόλλησης στα μοντέλα με πυκνότερο πλέγμα παρατηρείται σε μικρότερο αριθμό κύκλων φόρτισης. Αυτό συμβαίνει λόγω του μεγέθους των στοιχείων, που είναι μικρότερο στα μοντέλα με πυκνότερο πλέγμα και για αυτό αστοχούν γρηγορότερα.

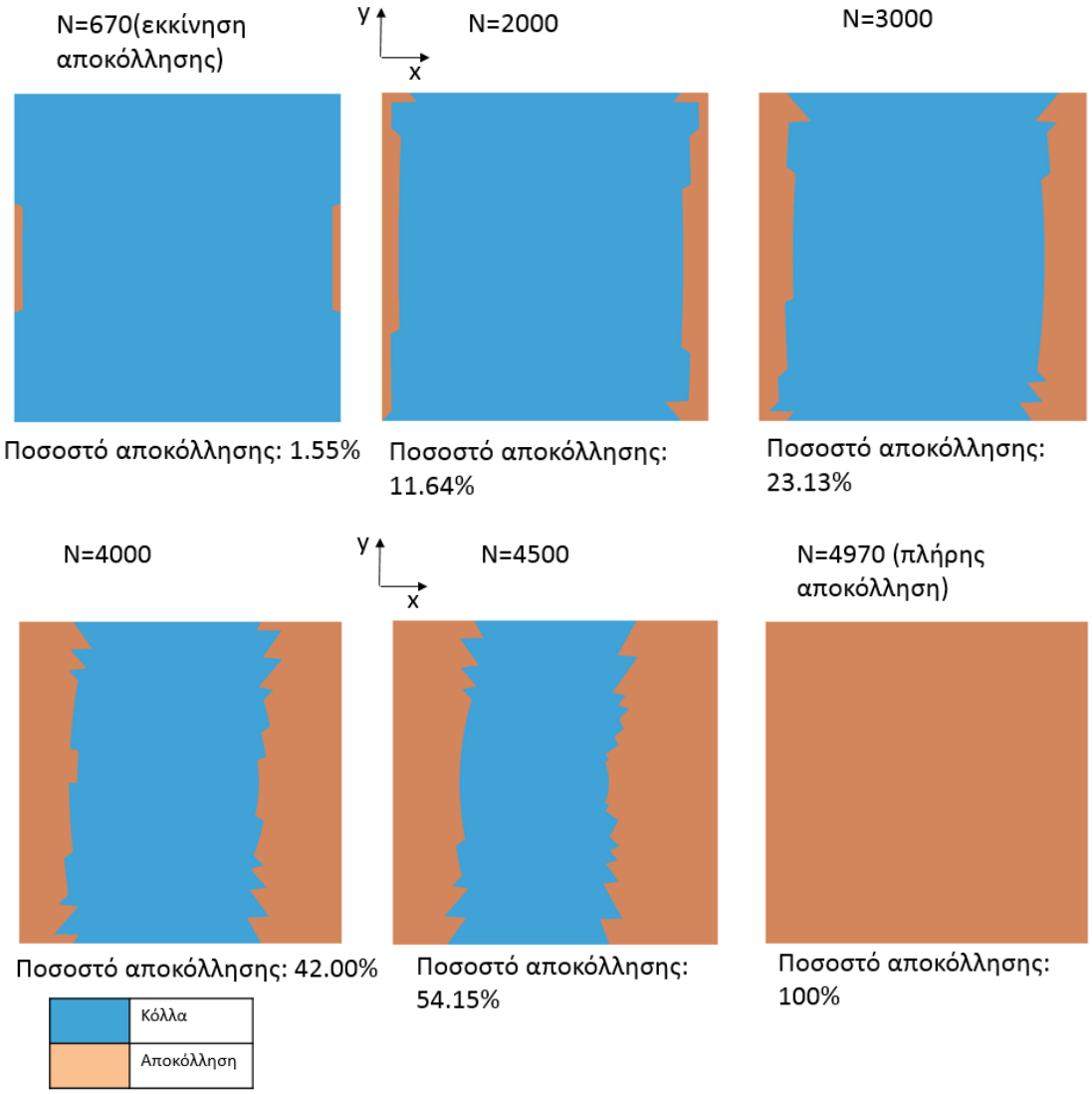
5.2.6 Επίδραση του σχήματος του πλέγματος στην εξέλιξη της αποκόλλησης

Η εξέλιξη της αποκόλλησης για τα μοντέλα με παρόμοιο πλέγμα με αυτό των μοντέλων με κοχλία αλλά χωρίς τον κοχλία παρουσιάζεται στα επόμενα σχήματα για τα μοντέλα με αραιό και πυκνό πλέγμα. Για το μοντέλο με πυκνό πλέγμα:



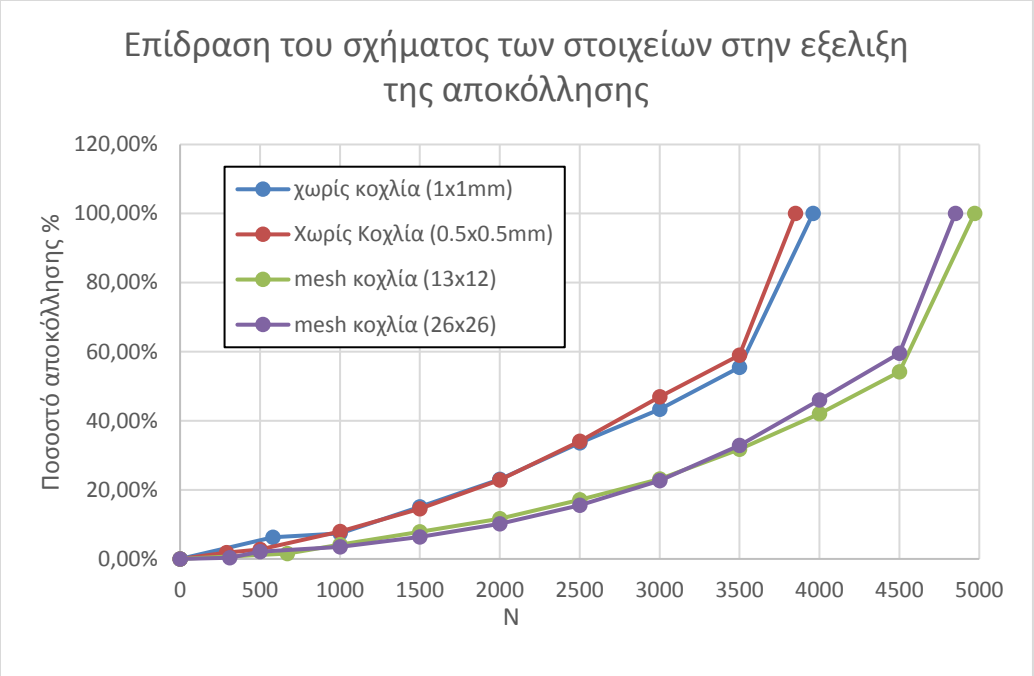
Σχήμα 5.18. Εξέλιξη της αποκόλλησης στο μοντέλο με παρόμοιο mesh με το μοντέλο με κοχλία για μελέτη της επίδρασης του σχήματος του πλέγματος (πυκνό mesh

Για το μοντέλο με αραιό πλέγμα:



Σχήμα 5.19. Εξέλιξη της αποκόλλησης στο μοντέλο με παρόμοιο mesh με το μοντέλο με κοχλία για μελέτη της επίδρασης του σχήματος του πλέγματος (αραιό mesh).

Οι καμπύλες του ποσοστού αποκόλλησης (υπολογισμένη ως προς την αρχική επιφάνεια της κόλλας) συναρτήσει των κύκλων φόρτισης για τα δύο μοντέλα με παρόμοιο πλέγμα με τα μοντέλα με κοχλία, με πυκνό και αραιό mesh, καθώς και για τα μοντέλα χωρίς κοχλία παρουσιάζονται στο ίδιο γράφημα για ευκολότερη σύγκριση:



Σχήμα 5.20. Επίδραση του σχήματος του πλέγματος στην εξέλιξη της αποκόλλησης συναρτήσει των κύκλων φόρτισης για τα μοντέλα χωρίς κοχλία.

Παρατηρείται ότι η αλλαγή του σχήματος των στοιχείων οδήγησε σε μία επιπλέον καθυστέρηση της αποκόλλησης σε σχέση με το μοντέλο χωρίς κοχλία. Οι κύκλοι αστοχίας για το πυκνό μοντέλο χωρίς κοχλία με κανονικό πλέγμα για διαστάσεις στοιχείου 0.5x0.5mm ήταν 3850 ενώ για το μοντέλο με πλέγμα παρόμοιο με αυτό για κοχλία 4.8mm με 26x26 στοιχεία στην περίμετρο του overlap, οι κύκλοι αστοχίας ήταν 4850. Η παράμετρος L_{el} που χρησιμοποιείται στον κώδικα και ορίζεται ως η ρίζα της επιφάνειας του στοιχείου είναι υπεύθυνη για αυτό το φαινόμενο καθώς στο μοντέλο με πλέγμα για κοχλία 4.8mm, τα στοιχεία μακριά από τον κοχλία έχουν μεγαλύτερη επιφάνεια και χρειάζονται περισσότερους κύκλους για να αστοχήσουν. Η ρίζα της επιφάνειας των στοιχείων αυτών είναι μεγαλύτερη από την διάστασή τους στη διεύθυνση του άξονα της σύνδεσης και στην πραγματικότητα η αποκόλληση έχει προχωρήσει σε μικρότερο αριθμό κύκλων κατά τη διεύθυνση αυτή. Αν όμως συγκριθούν τα μοντέλα με πλέγμα για κοχλία με τα μοντέλα με κοχλία διαμέτρου 4.8 mm παρατηρείται ότι υπάρχει μία καθυστέρηση στην αποκόλληση λόγω της παρουσίας του κοχλία καθώς τα μοντέλα με τον κοχλία για αντίστοιχη πυκνότητα πλέγματος φτάνουν σε μεγαλύτερους κύκλους φόρτισης.

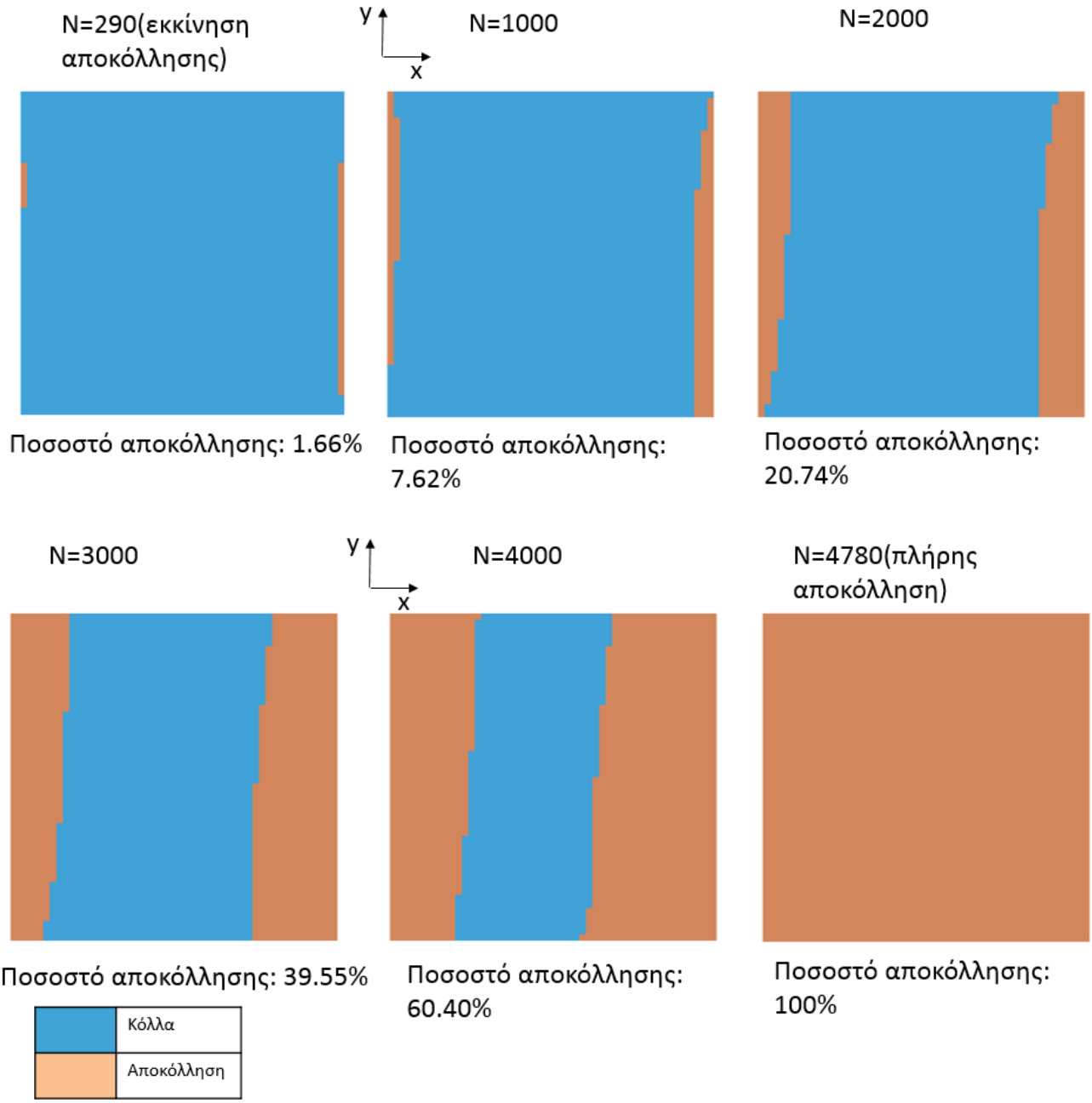
5.2.7 Επίδραση της εξωτερικής φόρτισης

Στα μοντέλα όπου η εξωτερική φόρτιση είναι ίση με 4090 N, οι κύκλοι για αστοχία σε σύγκριση με τα αντίστοιχα μοντέλα με φόρτιση ίση με 4920 N παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 5.3. Κύκλοι για πλήρη αποκόλληση των αναλύσεων κόπωσης με μικρότερη φόρτιση-4090N.

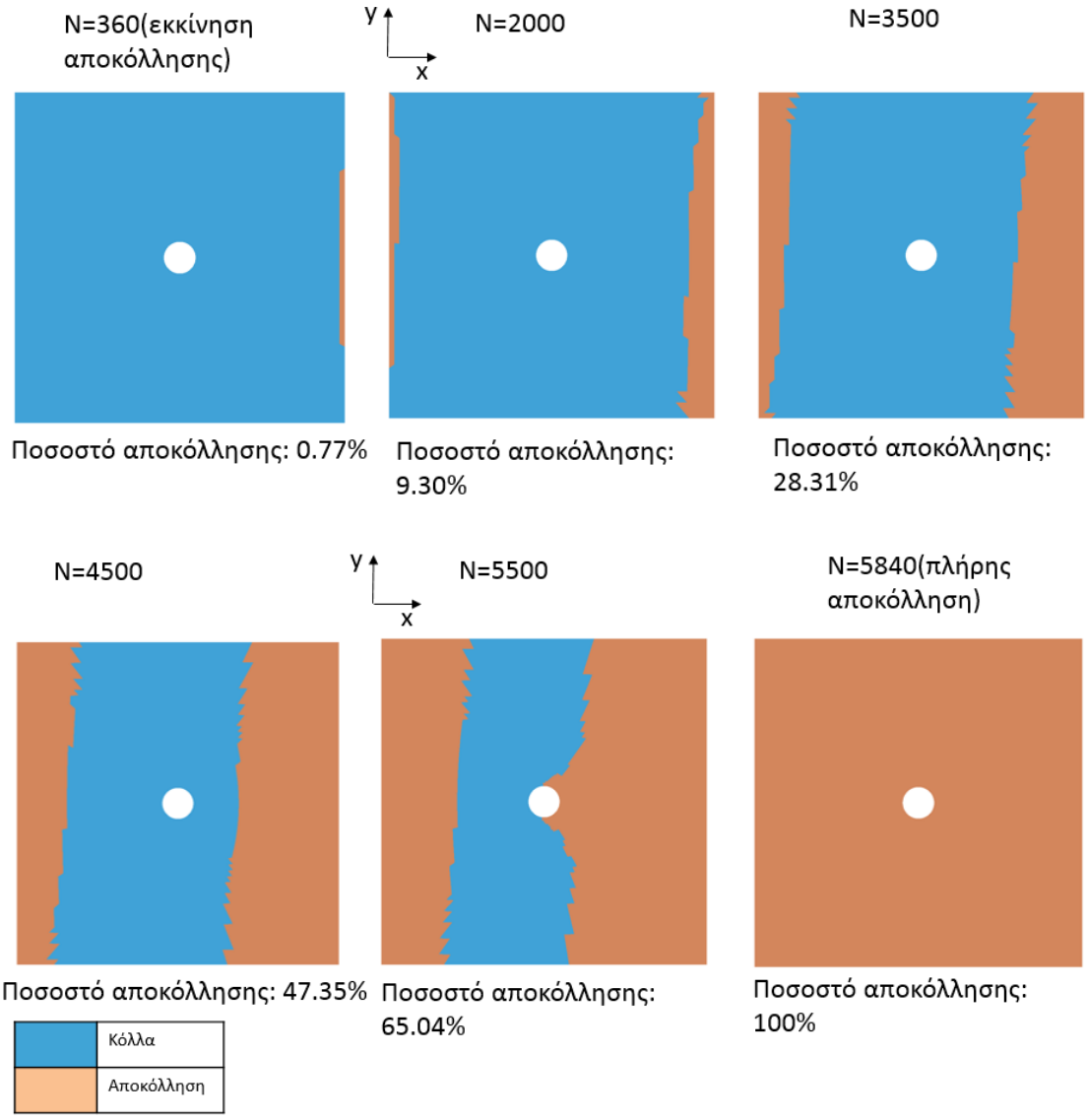
Μοντέλο	**Κύκλοι για πλήρη αποκόλληση**
Χωρίς κοχλία (0.5x0.5mm)-4920 N	3850
Χωρίς κοχλία (0.5x0.5mm)-4090 N	4780
Με κοχλία 2.4mm (26x26)-4920 N	4480
Με κοχλία 2.4mm (26x26)-4090 N	5840

Η εξέλιξη της αποκόλλησης στο μοντέλο χωρίς κοχλία:



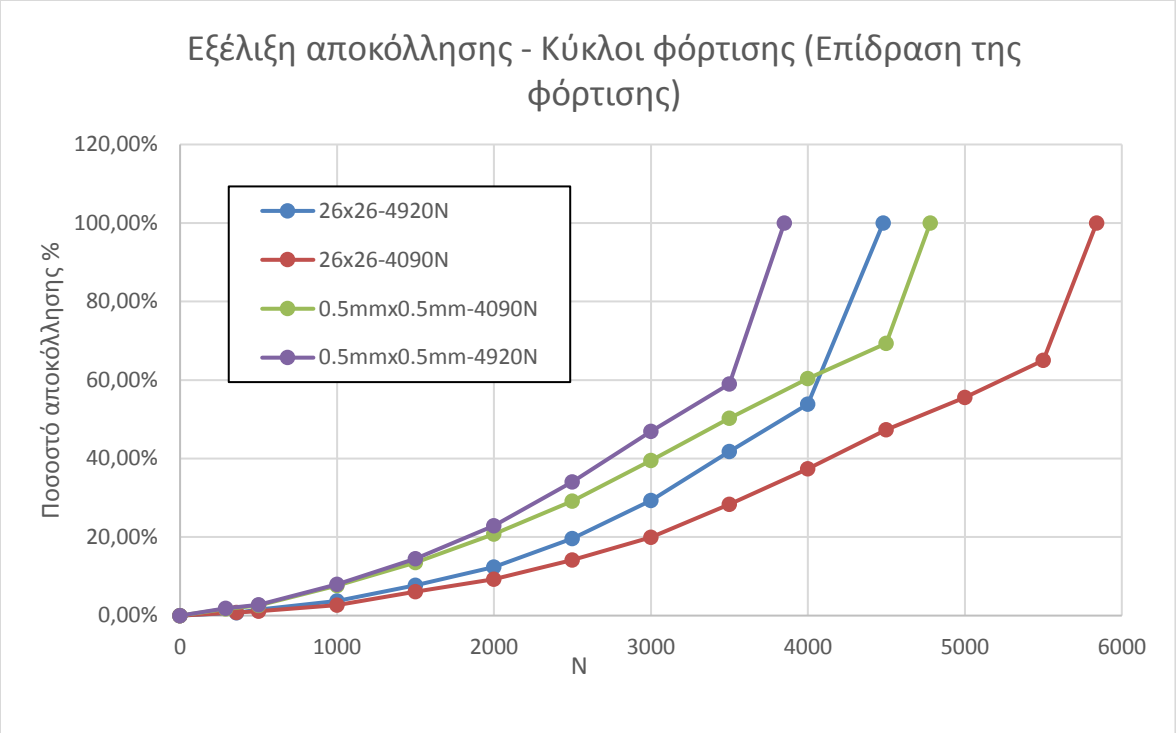
Σχήμα 5.21. Εξέλιξη της αποκόλλησης στο μοντέλο χωρίς κοχλία για φόρτιση 4090 N.

Η εξέλιξη της αποκόλλησης στο μοντέλο με κοχλία διαμέτρου 2.4mm:



Σχήμα 5.22. Εξέλιξη της αποκόλλησης στο μοντέλο με κοχλία 2.4 mm για φόρτιση 4090 N.

Οι καμπύλες του ποσοστού αποκόλλησης συναρτήσει των κύκλων φόρτισης για τα μοντέλα με και χωρίς κοχλία για φόρτιση 4090 N δίνονται στα επόμενα γραφήματα. Τα γραφήματα περιέχουν τις αντίστοιχες καμπύλες των μοντέλων για φόρτιση 4920 N για σύγκριση.



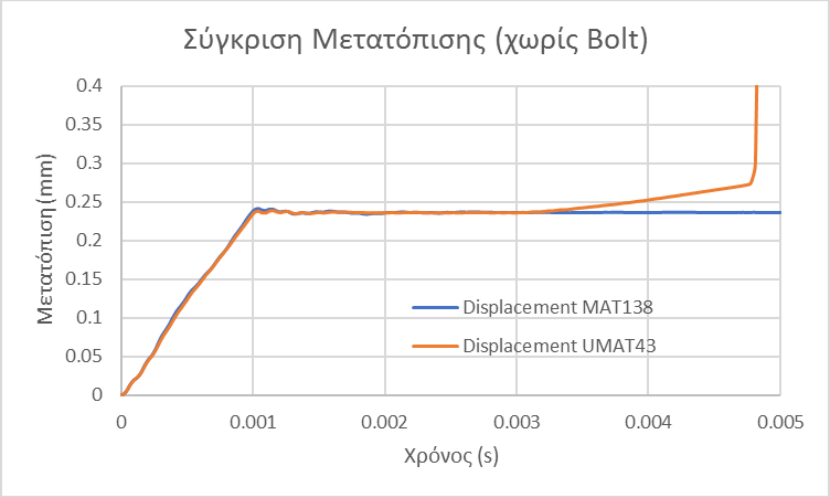
Σχήμα 5.23. Καμπύλες εξέλιξης της αποκόλλησης συναρτήσει των κύκλων φόρτισης για φόρτιση 4090 N και 4920N.

Παρατηρείται ότι στα μοντέλα που δέχονται μικρότερη φόρτιση, η αστοχία της κόλλας συμβαίνει σε μεγαλύτερο αριθμό κύκλων. Για μικρό αριθμό κύκλων υπάρχει μία ταύτιση των αποτελεσμάτων αλλά όσο μεγαλώνει ο αριθμός των κύκλων παρατηρείται πιο αργή διάδοση της αποκόλλησης στα μοντέλα με χαμηλότερη φόρτιση. Η σύγκριση μεταξύ των καμπυλών με και χωρίς κοχλία για την μικρότερη φόρτιση δείχνει ξανά ότι ο κοχλίας επιβραδύνει την αποκόλληση και οδηγεί σε μεγαλύτερο αριθμό κύκλων για αστοχία.

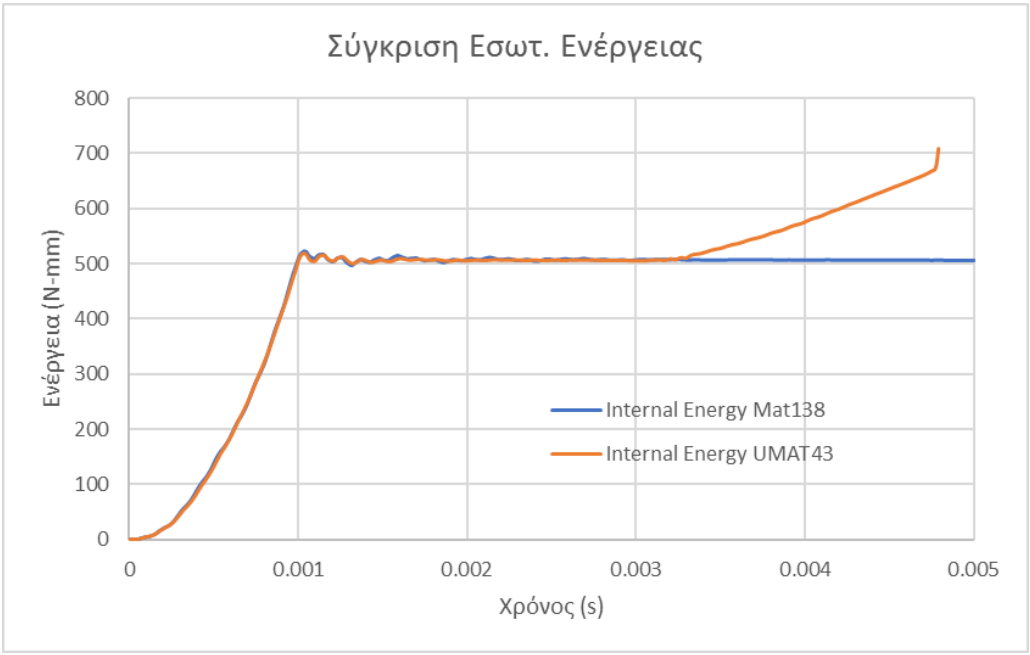
5.3 Σύγκριση της υπορουτίνας με το MAT_138 του Ls dyna

Για την σωστή λειτουργία του μοντέλου υλικού που προγραμματίστηκε με την υπορουτίνα για υποβάθμισης αντοχής λόγω κόπωσης, συγκρίνονται η μετατόπιση του άκρου που φορτίζεται συναρτήσει του χρόνου καθώς και η εσωτερική ενέργεια των μοντέλων συναρτήσει του χρόνου πριν την εκκίνηση της υποβάθμισης. Για την σύγκριση αυτή πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με

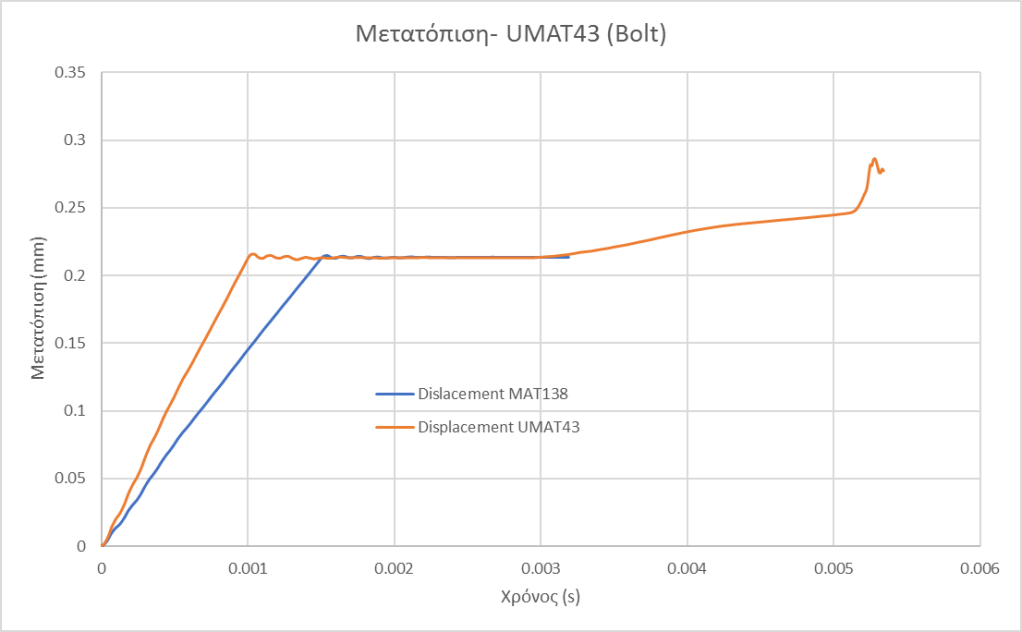
χρήση του MAT_138 του LS DYNA και με χρήση του μοντέλου υλικού που προγραμματίστηκε (UMAT43) για ένα μοντέλο με και χωρίς κοχλία. Τα διαγράμματα της σύγκρισης παρουσιάζονται στη συνέχεια.



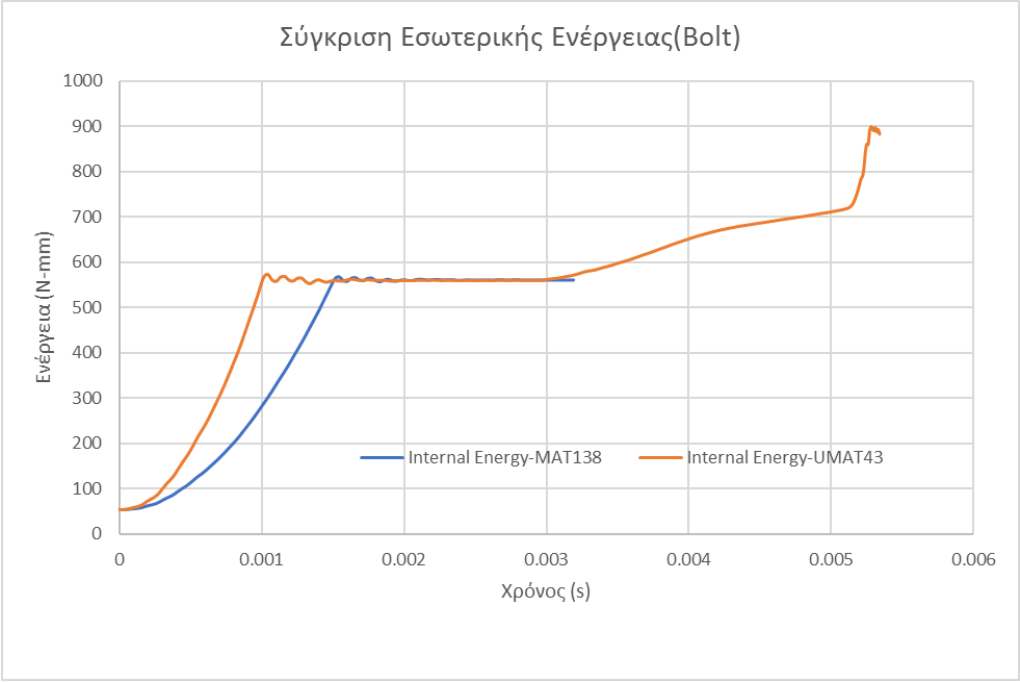
Σχήμα 5.24. Σύγκριση MAT_138 με την υπορουτίνα κόπωσης(UMAT43) ως προς τη μετατόπιση για μοντέλο χωρίς κοχλία.



Σχήμα 5.25. Σύγκριση MAT_138 με την υπορουτίνα κόπωσης(UMAT43) ως προς την εσωτερική ενέργεια για μοντέλο χωρίς κοχλία.



Σχήμα 5.26. Σύγκριση MAT_138 με την υπορουτίνα κόπωσης(UMAT43) ως προς τη μετατόπιση για μοντέλο με κοχλία.



Σχήμα 5.27. Σύγκριση MAT_138 με την υπορουτίνα κόπωσης(UMAT43) ως προς την εσωτερική ενέργεια για μοντέλο με κοχλία.

Στα διαγράμματα που αναφέρονται σε μοντέλα με κοχλία, η εφαρμογή της δύναμης πραγματοποιείται σε μικρότερο χρονικό διάστημα όταν χρησιμοποιείται η υπορουτίνα (UMAT43). Η εκκίνηση της υποβάθμισης λόγω κόπωσης πραγματοποιείται τη στιγμή 0.003 s όπου και οι καμπύλες που αναφέρονται στην υπορουτίνα αρχίζουν να αποκλίνουν από αυτές του MAT_138, λόγω της υποβάθμισης.

Παρατηρείται ότι η υπορουτίνα μπορεί να δώσει παρόμοια αποτελέσματα με το MAT_138 του LS DYNA και άρα είναι σε θέση να προσομοιώσει φόρτιση μικτού τύπου I+II. Αυτό είναι σημαντικό ώστε το εντατικό πεδίο και το πεδίο μετατοπίσεων πριν την εφαρμογή της υποβάθμισης κόπωσης να έχει τις σωστές τιμές. Επίσης τόσο κατά την εφαρμογή της υποβάθμισης κόπωσης όσο και πριν από αυτή είναι σημαντικό να υπολογίζεται σωστά η στατική βλάβη Ds και ο ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας παραμόρφωσης G.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

6.1 Συμπεράσματα

Από τις αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν προέκυψαν τα συμπεράσματα:

1. Η παρουσία του κοχλία μειώνει την επιφάνεια της κόλλας που μπορεί να φέρει φορτίο και δημιουργεί συγκέντρωση τάσεων σε αυτή στην περιοχή όπου αυτός βρίσκεται. Για αυτό το λόγο το φορτίο αστοχίας της κόλλας στις στατικές αναλύσεις ήταν μικρότερο στο μοντέλο με τον κοχλία.
2. Στις αναλύσεις κόπωσης, η αποκόλληση παρατηρείται γρηγορότερα όταν το μήκος του στοιχείου είναι μικρότερο. Επομένως για ακριβέστερο υπολογισμό της στιγμής έναρξης της αποκόλλησης θα πρέπει να χρησιμοποιείται όσο το δυνατό μικρότερο μήκος στοιχείου. Το ίδιο ισχύει και για τον ακριβή υπολογισμό του μήκους της αποκόλλησης καθώς όσο μικρότερο είναι το μήκος στοιχείου τόσο καλύτερη διακριτική ικανότητα εφόσον η το μήκος αποκόλλησης ισούται με διακριτό αριθμό μηκών στοιχείου.
3. Σε όλες τις αναλύσεις κόπωσης όπου χρησιμοποιούνται κοχλίες, παρουσιάστηκε καθυστέρηση της αποκόλλησης σε σχέση με τις αναλύσεις που δεν υπάρχει κοχλίας. Αυτό υποδεικνύει ότι η χρήση κοχλιών ως μηχανισμούς επιβράδυνσης της αποκόλλησης σε συνδέσεις με κόλλα μονής επικάλυψης μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία.
4. Η παράμετρος του ενεργού μήκους στοιχείου L_{el} του κώδικα υποβάθμισης λόγω κόπωσης ορίζεται ως η ρίζα της επιφάνειας του στοιχείου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το σχήμα των στοιχείων και επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Παρατηρήθηκε ότι όταν το σχήμα των στοιχείων δεν ήταν τετραγωνικό λόγω της παρουσίας του κοχλία υπήρξε μία καθυστέρηση της αποκόλλησης σε σχέση με όταν τα στοιχεία είχαν τετραγωνικό σχήμα. Όμως από τη σύγκριση μοντέλων με παρόμοιο σχήμα

στοιχείων με και χωρίς κοχλία παρατηρήθηκε ότι οι τα μοντέλα που περιείχαν κοχλία παρουσίαζαν καθυστέρηση της αποκόλλησης.

5. Η παράμετρος Gthresh που αποτελεί έλεγχο για το αν το στοιχείο βρίσκεται στην κορυφή της ρωγμής αποκόλλησης και δηλαδή αν θα πρέπει να εισέλθει στην υποβάθμιση λόγω κόπωσης υπολογίζεται από τα στοιχεία της κόλλας που βρίσκονται στην πρώτη γραμμή του overlap στα άκρα της επικάλυψης των πλακών από σύνθετο υλικό. Η παράμετρος αυτή εξαρτάται από τον ρυθμό απελευθέρωσης ενέργειας G που αποθηκεύουν τα στοιχεία αυτά και άρα από τις τάσεις που αναπτύσσονται στην κόλλα. Έτσι όταν η αποκόλληση έχει προχωρήσει αρκετά, αν το G του στοιχείου που πρόκειται να εισέλθει στον κώδικα υποβάθμισης είναι μικρότερο από το Gthresh, τότε το στοιχείο δεν εισέρχεται στην περιοχή υποβάθμισης του κώδικα. Αυτός είναι ο λόγος που στο μοντέλο με κοχλία διαμέτρου 4.8mm με πυκνότητα πλέγματος 26x26 η αποκόλληση διακόπηκε και το μοντέλο έφτασε σε ενεργειακή ισορροπία. Αυτό δεν συνέβη στο αντίστοιχο μοντέλο με πλέγμα 13x12 καθώς λόγω του μεγαλύτερου μεγέθους στοιχείων, τα στοιχεία της πρώτης γραμμής αποθήκευαν μικρότερο G πριν την εφαρμογή της υποβάθμισης και η τιμή του Gthresh που ορίστηκε ήταν μικρότερη. Αυτό φανερώνει εξάρτηση της παραμέτρου Gthresh από το μέγεθος των στοιχείων και ενδεχομένως να επηρεάζει τα αποτελέσματα.
6. Ο κώδικας κόπωσης είναι σε θέση να λάβει υπόψη το ότι μία μικρότερη φόρτιση της σύνδεσης θα οδηγήσει σε μεγαλύτερο αριθμό κύκλων για αστοχία της κόλλας τόσο στην περίπτωση απουσίας κοχλία όσο και στην περίπτωση ύπαρξης κοχλία. Ξανά, στην περίπτωση μικρότερης φόρτισης η ύπαρξη κοχλία οδήγησε σε καθυστέρηση της αποκόλλησης.
7. Από τα σχήματα 5.27 έως 5.30 φαίνεται πως ο κώδικας μπορεί να μοντελοποιήσει σωστά την φόρτιση μικτού τύπου I+II της κόλλας σε σύγκριση με το μοντέλο υλικού MAT_138 του LS DYNA για αυτού του είδους την φόρτιση.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Για μελλοντική εργασία προτείνονται τα εξής:

1. Εφαρμογή του κώδικα υποβάθμισης λόγω κόπωσης σε συνδυασμό με τη διεξαγωγή πειραμάτων για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων που δίνει.
2. Χρήση διαφορετικού ορισμού της παραμέτρου L_{el} ώστε να είναι ίση με το μήκος στοιχείου στην διεύθυνση της σύνδεσης ως προσπάθεια εξάλειψης της επίδρασης της παραμέτρου στα αποτελέσματα του κώδικα.
3. Τροποποίηση του κώδικα ώστε η παράμετρος Gthresh να υπολογίζεται αυτόματα για κάθε σειρά στοιχείων της κόλλας.
4. Εφαρμογή του κώδικα σε διαφορετικού τύπου συνδέσεις με κόλλα υπό φόρτιση κόπωσης με και χωρίς την παρουσία κοχλία ως μηχανισμό επιβράδυνσης της αποκόλλησης.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – ΚΩΔΙΚΑΣ ΚΟΠΩΣΗΣ ΣΤΟ LS DYNA

Ο κώδικας κόπωσης στο LS DYNA που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία:

```
include 'nlqparm'
      real L,jump_u,En,Et,T,S,Gic,Giic,XMU,g,UTD,UND,
     . d_i,d_ii,b,d_i0,d_ii0,d_0,d_f,Gc,F,sigma_mmax,sigma_m,
     . Gtot,sigbyl,currentstrs1,currentstrs2,currentstrs3,dNda,
     . DS,Lfat,Dtot,Lczf,M,C,R,Gthres,Gmc,dDFdN,sint,fre,
     . deltaG,u_t1,u_t2,u_n,DF,dNe,ascii_time,L_elem
      logical ifail,maketan,reject
      dimension params(*),fTraction(*),jump_u(*),
     &  dxdt(*),aux(*),crv(lq1,2,*),nhxbwp(*),cma(*),dsave(6,*),
     &  ctmp(*),elsiz(*)
      integer nnpcrv(*),counter,steps
      INTEGER8 idpart
c
      En=params(3)
      Et=params(4)
      Gic=params(5)
      Giic=params(6)
      XMU=params(7)
```

```
      T=params(8)
      S=params(9)
      UND=params(10)
      UTD=params(11)
      g=params(12)
c
      ascii_time=params(13)
      steps=params(14)
      Gthres=params(15)
      fre=params(16)
      R=params(17)
      dNda=params(18)
      L_elem=elsiz(1)
c
      aux(1)=1.
      aux(2)=aux(2)+1./(ascii_time/dt1siz)
      counter=aux(2)+1.
      aux(3)=counter
c
      u_t1 = jump_u(1)
      u_t2 = jump_u(2)
      u_n = jump_u(3)
```

```
      d_i=u_n
      d_ii=sqrt(u_t1*u_t1+u_t2*u_t2)
      d_i0=T/En
      d_ii0=S/Et
c
      if (d_i .le. 0.0) then
        L=d_ii
      else
        L= sqrt(d_i*d_i+d_ii*d_ii)
      endif
c
      if (d_i .le. 0.0 .and. d_ii .gt. 0.0) then
        d_0=d_ii0
        d_f=2./S*Giic
        sigma_mmax=S
      else if (d_i .gt. 0.0 .and. d_ii .le. 0.0) then
        d_0=d_i0
        d_f=2./T*Gic
        sigma_mmax=T
      else if (d_i .eq. 0.0 .and. d_ii .eq. 0.0) then
        d_0=max(d_i0,d_ii0)
        d_f=max(2./T*Gic,2./S*Giic)
```

```
      sigma_mmax=max(2.0*Gic/d_f,2.0*Giic/d_f)
    else
      b=d_ii/d_i
      d_0=sqrt((1.+b*b)/(d_ii0*d_ii0+b*b*d_i0*d_i0))*d_i0*d_ii0
      if (XMU .le. 0.0) then
        Gc=Gic+(Giic-Gic)*(b*b*Et/(En+b*b*Et))**abs(XMU)
        F=2./d_0/(En**g/(1.+b*b)+b*b*Et**g/(1.+b*b))**(1./g)
        d_f=F*Gc
      else if (XMU .gt. 0.0) then
        Gc=((En/Gic)**(XMU)+(Et*b*b/Giic)**(XMU))**(-1./XMU)
        F=2./d_0*(1.+b*b)
        d_f=F*Gc
      endif
        sigma_mmax=S*T*sqrt((En*En+b*b*Et*Et)/(S*S*En*En
     .    +b*b*Et*Et*T*T))
    endif
c
    if (L .ge. d_f) then
      ifail=.true.
    endif
c
    C=0.0101
```

```
      M=7.2892
      Lczf=1.2
      Gmc=0.5*sigma_mmax*d_f
c
      if (counter.le.steps .and. L.lt.d_0 .and. aux(6) .le. 0.0) then
        sint=0.5
        sigbyL=sigma_mmax/d_0
        sigma_m=L*sigbyL
        Gtot=0.5*T*d_i+0.5*S*d_ii
        aux(5)=Gtot
        ek=max(En,Et)
      else if (counter.le.steps.and.(L.gt.d_0 .or. aux(6).gt.0.0)) then
        sint=12.
        DS=(L-d_0)/(d_f-d_0)
        aux(6)=DS
        sigma_m=(1.-aux(6))*sigma_mmax
        Gtot=0.5*sigma_mmax*d_0+sigma_m*(L-d_0)
     .  +0.5*(sigma_mmax-sigma_m)*(L-d_0)
        aux(5)=Gtot
        ek=max(En*(1-aux(6)),Et*(1-aux(6)))
      else if (counter.le.steps .and. L.ge.d_f) then
        sint=89.
```

```
      sigbyL = 0.0
      sigma_m= sigbyL*L
      aux(6)=1.0
      Gtot=0.5*sigma_mmax*d_f
      aux(5)=Gtot
      ifail=.true.
      aux(8)=1.0
    else if (counter.gt.steps .and. aux(5).le.Gthres) then
      if (L.lt.d_0 .and. aux(6) .le. 0.0) then
        sint=64.
        sigbyL=sigma_mmax/d_0
        sigma_m=L*sigbyL
        Gtot=0.5*T*d_i+0.5*S*d_ii
        aux(5)=Gtot
        ek=max(En,Et)
      else if (L.lt. d_f .or. aux(6) .gt.0.0) then
        sint=56.
        DS=(L-d_0)/(d_f-d_0)
        aux(6)=DS
        sigma_m=(1.-aux(6))*sigma_mmax
        Gtot=0.5*sigma_mmax*d_0+sigma_m*(L-d_0)
     .  +0.5*(sigma_mmax-sigma_m)*(L-d_0)
```

```
        aux(5)=Gtot
        ek=max(En*(1-aux(6)),Et*(1-aux(6)))
      else if (L.ge.d_f) then
        sint=224.
        sigbyL = 0.0
        sigma_m= sigbyL*L
        aux(6)=1.0
        Gtot=0.5*sigma_mmax*d_f
        aux(5)=Gtot
        ifail=.true.
        aux(8)=1.0
      endif
      deltaG=Gtot*(1.-R*R)
      dNe=L_elem*dNda
      Lfat=0.5*(Gtot/Gmc)*Lczf
      dDFdN=(1.-aux(6))/dNe
    else if (counter.gt.steps .and. aux(5).gt.Gthres) then
      sint=48.
      DS=aux(6)
      sigma_m=(1.-DS)*sigma_mmax
      Gtot=0.5*sigma_mmax*d_0+sigma_m*(L-d_0)
     . +0.5*(sigma_mmax-sigma_m)*(L-d_0)
```

```
      aux(5)=Gtot
      deltaG=Gtot*(1.-R*R)
      dNe=L_elem*dNda
      Lfat=0.5*(Gtot/Gmc)*Lczf
      dDFdN=(1.-DS)/dNe
      aux(4)=aux(4)+fre*dt1siz*dDFdN
      DF=aux(4)
      Dtot=DS+DF
      sigma_m=sigma_mmax*(1.-Dtot)
      ek=max(En*(1-aux(6)),Et*(1-aux(6)))
      if (Dtot .ge. 1.0) then
        sint=996.
        sigma_m=0.0
        ifail=.true.
        aux(8)=1.0
      endif
    endif
    if (aux(8) .eq. 1.0 .or. L .eq. 0.0) then
      fTraction(1) = 0.
      fTraction(2)= 0.
      fTraction(3) = 0.
    else
```

```
      fTraction(1) = sigma_m*u_t1/L
      fTraction(2)= sigma_m*u_t2/L
      fTraction(3) = sigma_m*u_n/L
    endif
    if (u_n .lt. 0.0) then
          fTraction(3)=fTraction(3)+En*u_n
    endif
c
    currentstrs1 = fTraction(1)
    currentstrs2 = fTraction(2)
    currentstrs3 = fTraction(3)
c
    aux(7)=DF
    aux(9)=u_t1
    aux(10)=u_t2
    aux(11)=u_n
    aux(12)=d_i
    aux(13)=d_ii
    aux(14)=d_i0
    aux(15)=d_ii0
    aux(16)=d_0
    aux(17)=d_f
```

aux(18)=Gc

aux(19)=F

aux(20)=b

aux(21)=sigma_mmax

aux(22)=sint

aux(23)=Gmc

aux(24)=sigma_m

aux(25)=steps

aux(26)=counter

aux(27)=DS

aux(28)=Dtot

aux(29)=Gtot

aux(30)=deltaG

aux(31)=Lfat

aux(32)=dNda

aux(33)=dDFdN

aux(34)=currentstrs1

aux(35)=currentstrs2

aux(36)=currentstrs3

aux(37)=L

aux(38)=fre

aux(39)=En

```
      aux(40)=R
      aux(41)=elsiz(1)
      aux(42)=elsiz(2)
      aux(43)=elsiz(3)
c
      return
      end
```

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] R.D. Adams, Robert D. Adams, J. Comyn, William Charles Wake, W.C. Wake, 'Structural Adhesive Joints in Engineering'.

[2] Sina Ebnesajjad, ''Surface Treatment of Materials for Adhesion Bonding''.

[3] MD Banea,,LFMda Silva, " Adhesively bonded joints in composite materials: an overview ", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications 2009 223: 1

[4] Ιωάννης Σ. Φλώρος, 'Αριθμητική και πειραματική διερεύνηση της αστοχίας συνδέσεων με κόλλα συνθέτων υλικών με μηχανισμούς διακοπής της αποκόλλησης, με έμφαση στην προσομοίωση της εξέλιξης της αποκόλλησης σε κόπωση'.

[5] Μαρίνα Χ. Τσαλούφη, 'ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΜΕ ΚΟΛΛΑ ΠΟΛΥΣΤΡΩΤΩΝ ΠΛΑΚΩΝ'.

[6] G. R. Irwin. Fracture. Encyclopedia of Physics (Handbuch der Physic)", Vol VI, Flugge (Ed.), Springer Verlag, Berlin 551-590, 1958.

[7] Chaves FJP, da Silva LFM, de Moura MFSF, Dillard DA, Esteves VHC. Fracture Mechanics Tests in Adhesively Bonded Joints: A Literature Review. J Adhes 2014;90:955–92. doi:10.1080/00218464.2013.859075.

[8] ASTM. D5528-01: Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites 1. Am Stand Test Methods 2014;03:1–12. doi:10.1520/D5528-13.2.

[9] AITM1.00053. Airbus test method: Carbon Fibre Reinforced Plastics - Determination of fracture toughness energy of bonded joints - mode I 2006.

[10] Standard I. ISO-25217 Determination of the mode 1 adhesive fracture energy of structural adhesive joints using double cantilever beam and tapered double cantilever beam specimens. Adhesives 2009.

[11] I.S. Floros a, K.I. Tserpes a, T. Loebel. Mode-I, mode-II and mixed-mode I &I fracture behavior of composite bonded joints: Experimental characterization and numerical simulation. Composites Part B 78 (2015) 459e468.

[12] ASTM. Standard Test Method for Determination of the Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites. ASTM B Stand 2014;15.03:1–18. doi:10.1520/D7905.

[13] ASTM. Standard Test Method for Mixed Mode I-Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites. ASTM Int 2006:15. doi:10.1520/D6671.

[14] Ashcroft IA, Shaw SJ. Mode I fracture of epoxy bonded composite joints 2. Fatigue loading. Int J Adhes 2002;22:151–67. doi:10.1016/S0143-7496(01)00050-1.

[15] Fernández M V., De Moura MFSF, Da Silva LFM, Marques AT. Composite bonded joints under mode i fatigue loading. Int J Adhes 2011;31:280–5. doi:10.1016/j.ijadhadh.2010.10.003.

[16] de Moura MFSF, Gonçalves JPM, Fernandez M V. Fatigue/fracture characterization of composite bonded joints under mode I, mode II and mixed-mode I+II. Compos Struct 2016;139:62–7. doi:10.1016/j.compstruct.2015.11.073.

[17] Volkersen: Volkersen, O., Luftfahrtforschung, (15),41–47 (1938).

[18] Goland, M. andReissner, E., "The Stresses in Cemented Joints,"J. of Appl. Mech.,11 (1),A17-A27 (Mar. 1944).

[19] Hart-Smith 1973a, Hart-Smith, L.J., "Analysis and Design of Advanced Composite Bonded Joints," Final Report, NASA Contract NAS1-11234 (Jan. 1973).

[20] E.F Rybicki, M.F Kanninen, A finite element calculation of stress intensity factors by a modified crack closure integral. Engineering Fracture MechanicsVolume 9, Issue 4, 1977, Pages 931-938

[21] Donald S. Dugdale (1960). "Yielding of steel sheets containing slits". Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 8 (2): 100–104.

[22] G.I. Barenblatt (1962). The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture. Advances in Applied Mechanics. 7. pp. 55–129.

[23] Ungsuwarungsri,T. and Knauss,W. G. Role of damage softened material behavior in the fracture of composites and adhesives. Int. J. Fract., 1987, 35, 221–241.

[24] Tvergaard, V. and Hutchinson, J.W. On the toughness of ductile adhesive joints. J. Mech. Phys. Solids, 1996, 44(5), 789–800.

[25] Sorensen, B. F. and Jacobsen, T. K. Determination of cohesive laws by the J-integral approach. Eng. Fract. Mech., 2003, 70, 1841–1858.

[26] Li, S.,Thouless, M. D.,Waas, A. M., Schroeder, J. A., and Zavattieri,P.D. Use of mode-I cohesive-zone models to describe the fracture of an adhesively-bonded polymer matrix composite. Compos. Sci. Technol., 2005, 65(2), 281–293.

[27] Li, S., Thouless, M. D., Waas, A. M., Schroeder, J. A., and Zavattieri, P. D. Use of a cohesive-zone model to analyze the fracture of a fiber-reinforced polymer matrix composite. Compos. Sci. Technol., 2005, 65(3–4), 537–549.

[28] Li, S., Thoules, M. D., Waas, A. M., Schroeder, J. A., and Zavattieri, P. D. Competing failure mechanisms in mixed-mode fracture of an adhesively bonded polymer matrix composite. Int. J. Adhesion Adhes., 2006, 26(8), 609–616.

[29] Li, S., Thouless, M. D., Waas, A. M., Schroeder, J. A., and Zavattieri, P. D. Mixed-mode cohesive-zone models for fracture of an adhesively bonded polymer matrix composite. Eng. Fract. Mech., 2006, 73(1), 64–78.

[30] Liljedahl, C. D. M., Crocombe, A. D.,Wahab, M. A., and Ashcroft, I. A. Damage modelling of adhesively bonded joints. Int. J. Fract., 2006, 141(1–2), 147–161.

[31] Blackman, B. R. K., Hadavinia, H., Kinloch, A. J., and Williams,J. G.The use of a cohesive zone model to study the fracture of fibre composites and adhesively-bonded joints. Int. J. Fract., 2003, 119(1), 25–46.

[32] Turon et.al.: Turon A, Costa J, Camanho PP, Davila CG. Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue. Compos Part A: Appl Sci Manufact 2007; 38:2270–82.

[33] Ha r p e r, P W., & Hallett, SR. (2010). A fatigue degradation law for cohesive interface elements - Development and application to composite materials. International Journal of Fatigue, 32(11), 1774-1787.

[34] Tserpes K, Floros I. Fatigue crack growth simulation in adhesively bonded composite joints. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*. 2018;1–11.

[35] K.I. Tserpes, G. Peikert, I.S. Floros. The Effectiveness of Corrugation as a Crack Stopper in Composite Bonded Joints. 4th International Conference of Engineering Against Failure (ICEAF IV),Skiathos Isl.,24-26 June 2015, Greece

[36] LSTC, LS Dyna Keyword User's Manual II R10.0, vol. II

[37] Camanho PP, D'avila CG. Mixed-mode decohesion finite elements for the simulation of delamination in composite materials. NASA-Technical paper. 2002. 211737:1.

[38] M. L. Benzeggagh & M. Kenane, MEASUREMENT OF MIXED-MODE DELAMINATION FRACTURE TOUGHNESS OF UNIDIRECTIONAL GLASS/EPOXY COMPOSITES WITH MIXED-MODE BENDING APPARATUS, Composites Science and Technology 56 (1996) 439-449.

[39] Hashin Z. Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites. J Appl Mech 1980;47:329. doi:10.1115/1.3153664.

[40] Matzenmiller A, Lubliner J, Taylor RL. A constitutive model for anisotropic damage in fiber-composites. Mech Mater 1995;20:125–52. doi:10.1016/0167-6636(94)00053-0.