ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΑΣΤΡΑΣ ΣΕ ΑΚΡΑΙΕΣ ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΥΡΣΙΝΗ ΠΑΠΑΪΩΑΝΝΟΥ

Επιτροπή Διπλωματικής

Επιβλέπων	:	Σαμουηλίδης Μ. Σ.,	Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Μέλη Επιτροπής	:	Ανυφαντής Κ.,	Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
		Παπαδάκης Γ.,	Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2022

Περίληψη

Το ευρύτερο ερευνητικό πεδίο στο οποίο υπάγεται η δουλειά που εκπονήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς λεπτότοιχων ενισχυμένων μεταλλικών κατασκευών υπό ακραία φορτία. Στην προκειμένη περίπτωση, ακραία θεωρούνται τα φορτία τα οποία επιφέρουν θραύση του υλικού της κατασκευής. Η συμπεριφορά της κατασκευής συνιστά την προοδευτική αντίσταση που αυτή προβάλλει στην παραμόρφωσή της και τη μορφολογία και έκταση της ρωγμής που δημιουργείται. Η απόκριση αυτή της φυσικής κατασκευής εξαρτάται από το υλικό, τη γεωμετρία, τις οριακές συνθήκες, τη φόρτιση και το ρυθμό αυτής.

Στην αριθμητική μοντελοποίηση, η οποία αποσκοπεί στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς της κατασκευής, το αποτέλεσμα εξαρτάται όχι μόνο από τα δεδομένα του προβλήματος, αλλά και από τις παραδοχές και ρυθμίσεις των παραμέτρων της προσομοίωσης. Το αντικείμενο της εργασίας είναι η εύρεση μίας αποτελεσματικής διαδικασίας για τη ρεαλιστική μοντελοποίηση συμβάντων ακραίας εγκάρσιας φόρτισης ενισχυμένων ελασμάτων. Η μεθοδολογία ευρίσκεται μέσω της αριθμητικής αναπαράστασης τριών πειραμάτων κρούσης μεταξύ ενισχυμένων ελασμάτων και ενός κωνοειδούς άκαμπτου διεισδυτή, που εκτελέστηκαν το 2009 από τους Alsos και Amdahl [7].

Για την ανάλυση χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και το λογισμικό ABAQUS. Τα αριθμητικά μοντέλα διακριτοποιούνται με πεπερασμένα στοιχεία κελύφους (shell elements). Κύριοι άξονες διερεύνησης αποτελούν: η μέθοδος προσδιορισμού του μοντέλου του υλικού, η επιλογή και ρύθμιση του κριτηρίου αστοχίας, η εισαγωγή γεωμετρικών ατελειών στο μοντέλο, η μοντελοποίηση των συγκολλήσεων, κ.α. Η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του μοντέλου του υλικού καθορίζεται μέσω της προσομοίωσης του πειράματος εφελκυσμού και της εφαρμογής μίας διαδικασίας αντίστροφης μηχανικής. Το κριτήριο αστοχίας διατυπώνει τις προϋποθέσεις υπό τις οποίες εμφανίζεται ρηγμάτωση στη διατομή του στοιχείου. Στην παρούσα δουλειά, οι παράγοντες που επηρεάζουν την εμφάνιση της θραύσης είναι η χρονική ιστορία της τριαξονικότητας των αναπτυσσόμενων τάσεων και της παραμόρφωσης.

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων πραγματοποιείται με τη σύγκρισή τους με τις πειραματικές παρατηρήσεις και μετρήσεις. Γίνεται, ακόμη, αντιπαραβολή τους με αποτελέσματα προσομοιώσεων των ίδιων πειραμάτων, από ερευνητές της βιβλιογραφίας [8], [23]. Αποτελεσματικά κρίνονται τα αριθμητικά μοντέλα, τα οποία καταφέρνουν να προβλέψουν με ακρίβεια τόσο τη μέγιστη δύναμη αντίστασης, που προβάλλει η κατασκευή, αλλά και την τελική μορφή και έκταση της ρωγμής. Οι γνώσεις που αποκομίζονται από τη διαδικασία και την εξέταση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής αναπαράστασης των πειραμάτων αξιοποιούνται για τη διατύπωση υποδείξεων, σχετικά με τη μεθοδολογία μοντελοποίησης λεπτότοιχων κατασκευών που υποβάλλονται σε ακραία φορτία.

Ευχαριστίες

Πρώτο και κυριότερο, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου και επιβλέποντα της διπλωματικής αυτής, Καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Μανόλη Σαμουηλίδη, για την αδιάλειπτη παρουσία του σε όλα τα στάδια της διαδικασίας και τη στενή της παρακολούθηση, την ανεκτίμητη επιστημονική και συμβουλευτική καθοδήγησή του. Τον εκτιμώ βαθιά για τη διάθεση και συγκατάθεσή του να συνδιαμορφώνουμε το θέμα και την κατεύθυνση της εργασίας, από την πρώτη έως την τελευταία μέρα αυτής της πορείας και την ενδελεχή διερεύνηση και στήριξη κάθε μου πρωτοβουλίας. Η σύμπνοια της αναλυτικής του ματιάς και της εστίασής του στην λεπτομέρεια με την αντίστοιχη δικιά μου επιθυμία, ταυτόχρονα με την άμεση ανταπόκρισή του και επίλυση κάθε μου απορίας, οδήγησαν σε ένα τελικό αποτέλεσμα για το οποίο είμαι περήφανη.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Δρ. Γιάννη Μαρινάτο, Διδάκτορα της Σχολής στον Τομέα των Θαλασσίων Κατασκευών, για τις χρήσιμες συμβουλές του κατά τα πρώτα μου βήματα μου στη μοντελοποίηση προβλημάτων κρούσης με πεπερασμένα στοιχεία στο πρόγραμμα ABAQUS.

Τέλος, δεν μπορώ να παραλείψω να εκφράσω την αμέριστη εκτίμηση μου στο Δρ. Σταύρο Χιονόπουλο, διδάσκοντά μου τόσο εκτάκτως στα μαθήματα της Σχολής «Υλικά Ι» και «Επιστήμη και Τεχνολογία των Συγκολλήσεων», όσο και στο πρόγραμμα εξειδίκευσης Διεθνούς Μηχανικού Συγκολλήσεων, για το χρόνο που αφιέρωσε στη συζήτηση των επιστημονικών μου ανησυχιών και την προσφορά βοήθειας σε θέματα υλικών και συγκολλήσεων. Η οπτική του, ως ακαδημαϊκός και ειδικός της βιομηχανίας και η διορατική του ματιά μου έδωσαν πολύτιμα εφόδια. Η απόφασή μου να εστιάσω, μέσω της διπλωματικής μου, αλλά και να ασχοληθώ μελλοντικά με τις Θαλάσσιες Κατασκευές είναι αποτέλεσμα της έμπνευσής μου από τη δουλειά και το χαρακτήρα του.

Περιεχόμενα

Περίληψη i

Ευχαριστίες.....ii

Περιεχόμενα.....iii

Πίνακας Σχημάτων v

Πίνακας Πινάκων xiv

Πίνακας Συμβόλων.....xv

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή..... 1

1.1 Αντικείμενο και στόχος διπλωματικής εργασίας 1

1.2 Υπόβαθρο..... 1

1.3 Επισκόπηση διπλωματικής εργασίας 3

Κεφάλαιο 2 : Θεωρητικό Υπόβαθρο 7

2.1 Μηχανική παραμορφώσιμου σώματος..... 7

2.1.1 Εισαγωγή..... 7

2.1.2 Ελαστικότητα - Ο νόμος του Hooke 10

2.1.3 Πλαστικότητα 11

2.2 Δοκιμή εφελκυσμού 13

2.2.1 Περιγραφή δοκιμής 13

2.2.2 Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης όλκιμου μεταλλικού υλικού σε μονοαξονικό εφελκυσμό.....14

2.2.3 Πραγματική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης σε μονοαξονικό εφελκυσμό 17

2.3 Θραυστομηχανική.....22

2.3.1 Εισαγωγή – Θεωρίες Μηχανικής των Θραύσεων 22

2.3.2 Είδη θραύσης υπό στατικό φορτίο 24

2.3.3 Ο μηχανισμός της όλκιμης θραύσης.....26

2.3.4 Η επίδραση της τριαξονικότητας στην παραμόρφωση θραύσης 28

Κεφάλαιο 3 : Μοντέλο Υλικού 33

3.1 Παράμετροι μοντελοποίησης 34

3.2 Καμπύλη υλικού 39

3.2.1 Βιβλιογραφικές μέθοδοι εύρεσης της καμπύλης υλικού.....42

3.2.2 Μέθοδος παρούσας εργασίας για την εύρεση της καμπύλης υλικού .48

3.3 Κριτήριο αστοχίας.....50
3.3.1 Παρουσίαση δημοφιλών κριτηρίων αστοχίας.....51
3.3.2 Χρήση κριτηρίων αστοχίας από τους ερευνητές της βιβλιογραφίας...66
3.3.3 Κριτήρια αστοχίας ABAQUS 70
3.3.4 Κριτήριο αστοχίας στην παρούσα εργασία.....72
3.4 Προσομοίωση πειράματος εφελκυσμού στο ABAQUS.....75
3.4.1 Παράμετροι προσομοίωσης πειράματος εφελκυσμού 75
3.4.2 Αποτελέσματα διαδικασίας αντίστροφης μηχανικής 79
3.4.3 Σχόλια επί των προσομοιώσεων πειράματος εφελκυσμού.....89
Κεφάλαιο 4 : Προσομοίωση Πειραμάτων Κρούσης 95
4.1 Περιγραφή και αποτελέσματα των πειραμάτων κρούσης.....96
4.1.1 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας 97
4.1.2 Αποτελέσματα πειραμάτων 99
4.2 Μοντελοποίηση των πειραμάτων από ερευνητές της βιβλιογραφίας.....104
4.2.1 Παράμετροι μοντελοποίησης.....104
4.2.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων 107
4.3 Μοντελοποίηση των πειραμάτων κρούσης στην παρούσα μελέτη 116
4.3.1 Παράμετροι μοντελοποίησης.....116
4.3.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων και σχολιασμός 127
4.4 Συζήτηση 156
Κεφάλαιο 5 : Επισκόπηση, συμπεράσματα, προτάσεις 175
5.1 Επισκόπηση 175
5.2 Συμπεράσματα 178
5.3 Προτάσεις για μελλοντική δουλειά 181
Βιβλιογραφία..... a

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 2-1: Τρισδιάστατη ενταντική κατάσταση στερεού σώματος

Σχήμα 2-2 : Σύγκριση ενέργειας παραμόρφωσης ως τη θραύση όλκιμου και ψαθυρού υλικού

Σχήμα 2-3 : Σχεδιαστική απεικόνιση βασικών τμημάτων της μηχανής εφελκυσμού

Σχήμα 2-4 : Δοκίμιο εφελκυσμού

Σχήμα 2-5 : Καμπύλη εφελκυσμού για διάφορα είδη υλικών

Σχήμα 2-6 : Μορφή καμπύλης τάσης παραμόρφωσης όλκιμου μεταλλικού υλικού

Σχήμα 2-7 : Φόρτιση και αποφόρτιση μετά το όριο διαρροής

Σχήμα 2-8 : Χαρακτηριστική μορφή επιφανειών όλκιμης θραύσης cup and cone

Σχήμα 2-9 : Εμφάνιση δοκιμίου εφελκυσμού κατά τη σταδιακή επιμήκυνσή του

Σχήμα 2-10 : Πειραματική (Α) και πραγματική (Β) καμπύλη μονοαξονικού εφελκυσμού

Σχήμα 2-11 : Χαρακτηριστικές επιφάνειες θραύσης α) ψαθυρή θραύση, β) όλκιμη θραύση, γ) θραύση από κόπωση, δ) θραύση από ερπυσμό

Σχήμα 2-12 : Άνοιγμα στο άκρο της ρωγμής (CTOD)

Σχήμα 2-13 : Σύγκριση πλαστικής ζώνης στο άκρο της ρωγμής κατά την Γραμμική-Ελαστική και την Ελαστοπλαστική Θεωρίας

Σχήμα 2-14 : Εξάρτηση δυσθραυστότητας από το πάχος του κατασκευαστικού στοιχείου

Σχήμα 2-15 : Εξάρτηση δυσθραυστότητας από τη θερμοκρασία

Σχήμα 2-16 : Μηχανισμός πυρήνωσης και ανάπτυξης μικροκενών

Σχήμα 2-17 : Μακροσκοπική εξέλιξη της ρωγμής υπό εφελκυστικό φορτίου

Σχήμα 2-18 : Χαρακτηριστική μορφή όλκιμης θραύσης στο μικροσκόπιο

Σχήμα 2-19 : Σχέση τριαξονικότητας και παραμόρφωσης θραύσης για εφελκυστικές φορτίσεις

Σχήμα 2-20 : Σχέση παραμόρφωσης θραύσης και τριαξονικότητας. Πειραματικά αποτελέσματα Wierzbicki και Bao για Al 2024-T351 [16]

Σχήμα 2-21 : Δύο μηχανισμοί θραύσης σε διαφορετικές περιοχές της διατομής εξαιτίας της επικράτησης διαφορετικών επιπέδων τριαξονικότητα

Σχήμα 3-1: Τα στοιχεία κελύφους είναι μία υπέρθεση στοιχείων πλάκας και στοιχείων μεμβράνης.

Σχήμα 3-2: Τετρακομβικό στοιχείο μειωμένης ολοκλήρωσης με πέντε επίπεδα κατά το πάχος (τύπου Belytschko-Lin-Tsay)

Σχήμα 3-3 : Όταν ένα στοιχείο κελύφους μειωμένης ολοκλήρωσης (b) υποστεί επίπεδη παραμόρφωση, το σημείο ολοκλήρωσης του δεν αλλάζει θέση (c) και συνεπώς δεν αντιστέκεται στην παραμόρφωση αυτή, σε αντίθεση με ένα στοιχείο πλήρους ολοκλήρωσης (a). Στη δεξιά εικόνα, φαίνεται το φαινόμενο κλεψύδρα στην μη ρεαλιστική αριθμητική λύση μίας προσομοίωσής πεπερασμένων στοιχείων.

Σχήμα 3-4 : Επίδραση Damage Evolution στην καμπύλη υλικού [20]

Σχήμα 3-5: Μοντέλο διάδοσης ρωγμής Ελαστοπλαστικής Θεωρίας (α) και θεωρίας Hillerborg et al. (β). [19]

Σχήμα 3-6: Εξέλιξη τιμής της τάσης, με την αύξηση του ανοίγματος της ρωγμής [19]

Σχήμα 3-7: Μοντέλο διάδοσης ρωγμής κατά μήκους ενός επιπέδου του πεπερασμένου στοιχείου κελύφους με την ρύθμιση Damage Evolution.

Σχήμα 3-8: Αντιστοιχία παραμέτρου απώλειας στιβαρότητας, Damage Degradation, του ABAQUS με το μοντέλο έναρξης/διάδοσης ρωγμής των Hillerborg et. al.

Σχήμα 3-9 : Επίδραση μεγέθους πεπερασμένου στοιχείου στο ύψος της παραμόρφωσης που υφίσταται αυτό, για μία τιμή επιμήκυνσης των πλευρών του [14]

Σχήμα 3-10 : Ορισμός Damage Evolution από τους Hogström και Ringsberg [22] με γραμμική ή δι-γραμμική σχέση (b) και οι αντίστοιχες καμπύλες που παράγονται (a)

Σχήμα 3-11: Μοντέλο πραγματικής καμπύλη τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης μετά το όριο αντοχής, εφαπτομενικού (tangent, w=1) και εκθετικού (power-law, w=0) τύπου [23]

Σχήμα 3-12 : Οριακό Διάγραμμα. Καμπύλη Αστάθειας (FLCN) και καμπύλη θραύσης (FLCF)

Σχήμα 3-13 : Πειραματικά αποτελέσματα που συλλέχθηκαν από τον Lee και αφορούν στο σημείο της θραύσης [4].

Σχήμα 3-14 : Σύνθεση μεταξύ κριτηρίου FFLD και κριτηρίου Ισοδύναμης Πλαστικής Παραμόρφωσης με επίδραση της τριαξονικότητας [4].

Σχήμα 3-15 : Κριτήριο Tresca

Σχήμα 3-16 : Αστάθεια σε επίπεδο λοξό κατά το πάχος, που σχηματίζει γωνία θ με την διεύθυνση της μέγιστης τάσης [26]

Σχήμα 3-17: Συλλογή πειραματικών αποτελεσμάτων για τις κρίσιμες παραμορφώσεις θραύσης, σε αρνητικές τριαξονικότητες, από τους Bao και Wierzbicki [4].

Σχήμα 3-18: Γεωμετρία δοκιμίου εφελκυσμού

Σχήμα 3-19: Διακριτοποίηση δοκιμίου εφελκυσμού με στοιχεία χαρακτηριστικού μήκους 6.25, 10, 12.5, 15 mm (από πάνω προς τα κάτω) στην περιοχή του επιμηκυνσιομέτρου (gauge length)

Σχήμα 3-20: Μέση πειραματική καμπύλη υλικού ελάσματος 1

Σχήμα 3-21: Damage Evolution για το μοντέλο υλικού του ελάσματος 1

Σχήμα 3-22: Σύγκριση πειραματικών καμπυλών υλικού 1 από πραγματική δοκιμή εφελκυσμού και από την μοντελοποίηση της στο ABAQUS μετά τη διαδικασία αντίστροφης μηχανικής με le=6.25mm

Σχήμα 3-23: Σύγκριση πειραματικών καμπυλών υλικού 1 από πραγματική δοκιμή εφελκυσμού και από την μοντελοποίηση της στο ABAQUS μετά τη διαδικασία αντίστροφης μηχανικής με le=10mm

Σχήμα 3-24: Σύγκριση πειραματικών καμπυλών υλικού 1 από πραγματική δοκιμή εφελκυσμού και από την μοντελοποίηση της στο ABAQUS μετά τη διαδικασία αντίστροφης μηχανικής με le=12.5mm

Σχήμα 3-25: Σύγκριση πειραματικών καμπυλών υλικού 1 από πραγματική δοκιμή εφελκυσμού και από την μοντελοποίηση της στο ABAQUS μετά τη διαδικασία αντίστροφης μηχανικής με le=15mm

Σχήμα 3-26: Επίδραση της απουσίας Damage Evolution στο μοντέλο υλικού: αδυναμία σύλληψης πτωτικής τάσης πραγματικής πειραματικής καμπύλης και αριθμητικές αστάθειες

Σχήμα 3-27: Μέση πειραματική καμπύλη υλικού ελάσματος 2

Σχήμα 3-28: Damage Evolution για το μοντέλο υλικού του ελάσματος 2

Σχήμα 3-29: Σύγκριση πειραματικών καμπυλών υλικού 2 από πραγματική δοκιμή εφελκυσμού και από την μοντελοποίηση της στο ABAQUS μετά τη διαδικασία αντίστροφης μηχανικής με le=6.25mm

Σχήμα 3-30 Σύγκριση πειραματικών καμπυλών υλικού 2 από πραγματική δοκιμή εφελκυσμού και από την μοντελοποίηση της στο ABAQUS μετά τη διαδικασία αντίστροφης μηχανικής με le=10mm

Σχήμα 3-31: Σύγκριση πειραματικών καμπυλών υλικού 2 από πραγματική δοκιμή εφελκυσμού και από την μοντελοποίηση της στο ABAQUS μετά τη διαδικασία αντίστροφης μηχανικής με le=12.5mm

Σχήμα 3-32: Σύγκριση πειραματικών καμπυλών υλικού 2 από πραγματική δοκιμή εφελκυσμού και από την μοντελοποίηση της στο ABAQUS μετά τη διαδικασία αντίστροφης μηχανικής με le=15mm

Σχήμα 3-33: Χρονική ιστορία εσωτερικής ενέργειας και κινητικής ενέργειας στην προσομοίωση πειράματος εφελκυσμού, για το υλικό 2, με le=15mm

Σχήμα 3-34: Χρονική μεταβολή της τριαξονικότητας στην προσομοίωση του πειράματος εφελκυσμού

Σχήμα 3-35: Ρύθμιση της παραμέτρου παρεμβολής, w, ανάλογα με το χαρακτηριστικό μήκος του πεπερασμένου στοιχείου

Σχήμα 3-36: Ρύθμιση της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης στο Damage Initiation, ανάλογα με το χαρακτηριστικό μήκος του πεπερασμένου στοιχείου

Σχήμα 3-37: Υπολογιστικός Χρόνος ανάλογα με την πυκνότητα πλέγματος για την προσομοίωση του πειράματος εφελκυσμού στο Υλικό 1

Σχήμα 3-38: Υπολογιστικός Χρόνος ανάλογα με την πυκνότητα πλέγματος για την προσομοίωση του πειράματος εφελκυσμού στο Υλικό 2

Σχήμα 4-1: Κάθετη διάτρηση εξωτερικού πυθμένα πλοίου σε υποθαλάσσιο βράχο

Σχήμα 4-2: Πειραματική διάταξη Alsos και Amdahl [7] α)πλατφόρμα στήριξης και υδραυλικός γρύλος, β)διάταξη διεισδυτή-ελάσματος κατά την φόρτιση.

Σχήμα 4-3: Γεωμετρία ενισχυμένου ελάσματος και διεισδυτή. Εγκάρσια τομή (αριστερά) και διαμήκης τομή (δεξιά) [7]

Σχήμα 4-4: Καμπύλη απόκρισης της πλάκας χωρίς ενισχυτικά [7]

Σχήμα 4-5: Παραμόρφωση της πλάκας χωρίς ενισχυτικά πριν (α) και μετά (β) τη θραύση [7]

Σχήμα 4-6: Καμπύλη απόκρισης της πλάκας με ένα επίπεδο ενισχυτικό [7].

Σχήμα 4-7: Παραμόρφωση της πλάκας με ένα επίπεδο ενισχυτικό πριν (α) και μετά (β) τη θραύση [7].

Σχήμα 4-8: Καμπύλη απόκρισης της πλάκας με δύο επίπεδα ενισχυτικά. Τα σημεία (1) και (2) αναφέρονται στην εμφάνιση λυγισμού κολώνας και στρεπτικού λυγισμού αντίστοιχα, στα ενισχυτικά [7].

Σχήμα 4-9: Παραμόρφωση της πλάκας με δύο επίπεδα ενισχυτικά πριν (α) και μετά (β) τη θραύση [7].

Σχήμα 4-10: Διατομή ελάσματος στην περιοχή της θραύσης στην διαμόρφωση α) US, β) 1FB

Σχήμα 4-11: Εγκάρσια τομή του δοκιμίου 1FB στην περιοχή της συγκόλλησης [7] και ορισμός πόδα συγκόλλησης. Η περιοχή της ραφής συγκόλλησης περιγράφεται με κόκκινο χρώμα και το ισοσκελές εγγεγραμμένο τρίγωνο φαίνεται με πράσινο. Z1 και Z2 είναι ο πόδας της αριστερής και δεξιάς συγκόλλησης αντίστοιχα. Η διαφορά του κόκκινου με το πράσινο τρίγωνο φανερώνει το πλεονάζον μέταλλο συγκόλλησης στη διατομή της ραφής.

Σχήμα 4-12: Μοντελοποίηση συγκόλλησης μεταξύ πλάκας και ενισχυτικού, με την αύξηση του πάχους των γειτονικών, στη συμβολή των ελασμάτων, πεπερασμένων στοιχείων [8].

Σχήμα 4-13: Μορφή αστοχίας αριθμητικού μοντέλου US των Alsos-Amdahl [8] α) κατανομή ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης στη διατομή του ελάσματος, β) κατανομή ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης στην επιφάνεια του ελάσματος, γ) κατανομή λόγου παραμορφώσεων στην επιφάνεια του ελάσματος

Σχήμα 4-14: Καμπύλη απόκρισης αριθμητικού μοντέλου US των Alsos-Amdahl [8]

Σχήμα 4-15: Μορφή αστοχίας αριθμητικού μοντέλου US του Μαρινάτου [23]

Σχήμα 4-16: Καμπύλη απόκρισης αριθμητικού μοντέλου US του Μαρινάτου [23]

Σχήμα 4-17: Μορφή αστοχίας αριθμητικού μοντέλου 1FB των Alsos-Amdahl [8] α) κατανομή ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης στη διατομή του ενισχυμένου ελάσματος, β) κατανομή ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης στην επιφάνεια του ελάσματος για πυκνό πλέγμα, β) κατανομή ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης στην επιφάνεια του ελάσματος για αραιό πλέγμα

Σχήμα 4-18: Καμπύλη απόκρισης αριθμητικού μοντέλου 1FB των Alsos-Amdahl [8]

Σχήμα 4-19: Μορφή αστοχίας αριθμητικού μοντέλου 1FB του Μαρινάτου [23]

Σχήμα 4-20: Καμπύλη απόκρισης αριθμητικού μοντέλου 1FB του Μαρινάτου [23]

Σχήμα 4-21: Μορφή αστοχίας αριθμητικού μοντέλου 2FB των Alsos-Amdahl [8] και κατανομή ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης στην επιφάνεια του ελάσματος

Σχήμα 4-22: Καμπύλη απόκρισης αριθμητικού μοντέλου 2FB των Alsos-Amdahl [8]

Σχήμα 4-23: Μορφή αστοχίας αριθμητικού μοντέλου 2FB του Μαρινάτου [23]

Σχήμα 4-24: Καμπύλη απόκρισης αριθμητικού μοντέλου 2FB του Μαρινάτου [8]

Σχήμα 4-25: Απλοποιημένη αναπαράσταση της διαδικασίας για την παραγωγή της κρίσιμης ισοδύναμης παραμόρφωσης του στοιχείου κελύφους [8]

Σχήμα 4-26: Προσομοίωση της ραφής συγκόλλησης, στην παρούσα εργασία. Τα γειτονικά, στην ένωση, στοιχεία έχουν αυξημένο πάχος (t+ σε σχέση με το αντίστοιχο t)

Σχήμα 4-27: Μέτρηση διαστάσεων ραφής γωνιακής συγκόλλησης από εγκάρσια τομή του πειραματικού δοκιμίου 1FB στην περιοχή της συγκόλλησης

Σχήμα 4-28: (α) Κατανομή Gauss παραμενουσών τάσεων [Rad]. (β) Αδιάστατη κατανομή παραμενουσών τάσεων που εισήχθησε στα πεπερασμένα στοιχεία. Η τετμημένη Lαδ είναι η εκάστοτε διάσταση μήκους αδιαστατοποιημένη με το μισό της μέγιστης τιμής της.

Σχήμα 4-29: Παραμένουσες τάσεις. α) διατμητική συνιστώσα, β)εγκάρσια συνιστώσα, γ)ισοδύναμη τάση κατά Mises

Σχήμα 4-30: Δύο περιπτώσεις φόρτισης του μοντέλου 1FB, ανάλογα με τη σχετική θέση των ατελειών

Σχήμα 4-31: Μορφή έναρξης ρωγμής στις περισσότερες προσομοιώσεις κρούσης της διαμόρφωσης US. Με χρώματα φαίνονται οι ισοϋψείς πλαστικής παραμόρφωσης. Η μαύρη γραμμή αντιπροσωπεύει τον διαμήκη άξονα συμμετρίας του ελάσματος και το κόκκινο σημάδι τη θέση πρόσπτωσης του διεισδυτή.

Σχήμα 4-32: Δημιουργία δεύτερης ρωγμής κάθετης στην πρώτη, σε πολλές προσομοιώσεις εξαιτίας διαμήκων μεμβρανικών τάσεων

Σχήμα 4-33: Κατανομές τάσεων στο αριθμητικό μοντέλο US πριν και μετά την έναρξη των δύο ρωγμών. α, β) κατανομή εγκάρσιων τάσεων πριν και μετά την έναρξη της πρώτης ρωγμής, αντίστοιχα. γ, δ, ε) κατανομή διαμήκων τάσεων πριν τη ρηγμάτωση, μετά την έναρξη της πρώτης ρωγμής και μετά την έναρξη της δεύτερης ρωγμής, αντίστοιχα.

Σχήμα 4-34: Μορφή αστοχίας μοντέλου US με le=6.25mm και chm=0

Σχήμα 4-35: Καμπύλη απόκρισης αριθμητικού μοντέλου US, με το μοντέλο υλικού του εδαφίου 3.4.2, για τέσσερα χαρακτηριστικά μεγέθη στοιχείου και δύο τιμές παραμέτρου chm

Σχήμα 4-36: Καμπύλη απόκρισης αριθμητικού μοντέλου US, με τα μοντέλα υλικών των εδαφίων και 3.4.2, για τέσσερα χαρακτηριστικά μεγέθη στοιχείου

Σχήμα 4-37: Σύγκλιση για τα αριθμητικά μοντέλα US

Σχήμα 4-38: Δύο περιοχές αυξημένων τάσεων/παραμορφώσεων στη λύση του αριθμητικού μοντέλου 1FB: α) περιοχή ομοιόμορφα κατανεμημένων αυξημένων παραμορφώσεων, β) περιοχή συγκέντρωσης τάσης δίπλα στη συγκόλληση.

Σχήμα 4-39: Μορφή αστοχίας αριθμητικού μοντέλου 1FB με le=6.25mm, chm=1.5 και offset=+5 mm (πλευρά B)

Σχήμα 4-40: Μορφή αστοχίας αριθμητικού μοντέλου 1FB με le=6.25mm, chm=1.5 και offset=-5 mm (πλευρά A)

Σχήμα 4-41: Μορφή αστοχίας αριθμητικού μοντέλου 1FB με le=6.25mm, chm=1.5 και offset=+35mm

Σχήμα 4-42: Μορφή αστοχίας αριθμητικού μοντέλου 1FB με le=6.25mm, chm=1.5 και

Σχήμα 4-43: Μορφή αστοχίας αριθμητικού μοντέλου 1FB με le=10mm, chm=1.5 και offset=+5 mm, με και χωρίς παραμένουσες τάσεις.

Σχήμα 4-44: Επιρροή συντελεστή chm στην παραμόρφωση αστοχίας, εfr, για κάθε τιμή τριαξονικότητας, η. Η τιμή της παραμόρφωσης αστοχίας σε συνθήκες μονοαξονικού εφελκυσμού, η=1/3, χρησιμοποιείται για το καλιμπράρισμα και δεν εξαρτάται από το συντελεστή chm. Για η≤1.3 η κρίσιμη παραμόρφωση λαμβάνεται σταθερή.

Σχήμα 4-45: Μορφή αστοχίας αριθμητικού μοντέλου 1FB με le=6.25mm, chm=2 και offset=+35mm

Σχήμα 4-46: Καμπύλη απόκρισης αριθμητικού μοντέλου 1FB, με το μοντέλο υλικού του εδαφίου 3.4.2, για χαρακτηριστικό μέγεθος στοιχείου ίσο με 6.25mm, για δύο τιμές του συντελεστή chm και τέσσερις τιμές της απόκλισης της θέσης πρόπτωσης του διεισδυτή από το κέντρο του ελάσματος της πλάκας.

Σχήμα 4-47: Καμπύλη απόκρισης αριθμητικού μοντέλου 1FB, με τα μοντέλα υλικών των εδαφίων 3.4.2 και [8], για τρεις συνδυασμούς chm και offset.

Σχήμα 4-48: Οι περιοχές ομοιόμορφα αυξημένης τάσης/παραμόρφωσης και συγκέντρωσης τάσεων ταυτίζονται στο μοντέλο 2FB. α)Κατανομή ισοδύναμης τάσης κατά Mises β) Κατανομή ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης. Το σημείο έναρξης της αστοχίας είναι αυτό που φαίνεται να έχει τη μεγαλύτερη παραμόρφωση

Σχήμα 4-49: Έναρξη και διάδοση της ρωγμής στα περισσότερα αριθμητικά μοντέλα. Η θραύση ξεκινά ακριβώς δίπλα στην ραφή συγκόλλησης και διαδίδεται λοξά προς το απέναντι ενισχυτικό. Το στιγμιότυπο έχει ληφθεί από την προσομοίωση με le=10mm, chm=0

Σχήμα 4-50: Μορφή αστοχίας σε όλα τα αριθμητικά μοντέλα της διαμόρφωσης 2FB. Το στιγμιότυπο έχει ληφθεί από την προσομοίωση με le=6.25mm, chm=1.5

Σχήμα 4-51: Καμπύλη απόκρισης αριθμητικών μοντέλων 2FB, των ομάδων I και II

Σχήμα 4-52: Καμπύλη απόκρισης αριθμητικών μοντέλων 2FB, των ομάδων I και III

Σχήμα 4-53: Καμπύλες απόκρισης αριθμητικών μοντέλων 2FB των ομάδων I, II, III με le=10mm

Σχήμα 4-54: Σύγκλιση για τα αριθμητικά μοντέλα 2FB, των ομάδων I, II, III

Σχήμα 4-55: Σύγκριση καμπυλών απόκρισης αριθμητικών μοντέλων 2FB με le=6.25mm και chm=0, όταν το πρόσθετο πάχος των στοιχείων της πλάκας που αναπαριστούν τη ραφή συγκόλλησης τοποθετείται μόνο από τη μία πλευρά (πράσινη καμπύλη), ισομοιράζεται στις δύο πλευρές (κόκκινη καμπύλη)

Σχήμα 4-56: Μορφή αστοχίας αριθμητικού μοντέλου 2FB με le=10mm, chm=0, όταν το πρόσθετο πάχος των στοιχείων της πλάκας που αναπαριστούν τη ραφή συγκόλλησης

α)τοποθετείται μόνο από τη μία πλευρά, β)ισομοιράζεται στις δύο πλευρές (κρίθηκε μη ρεαλιστικό στην προκειμένη μελέτη).

Σχήμα 4-57: Παραμόρφωση πυκνού και αραιού πλέγματος στην περίπτωση των ομοιόμορφα κατανεμημένων παραμορφώσεων και στην περίπτωση της τοπικά συγκεντρωμένης παραμόρφωσης. Το μαύρο πλέγμα αντιπροσωπεύει τις θέσεις και το μέγεθος των απαραμόρφωτων στοιχείων και το πράσινο πλέγμα αντιπροσωπεύει τη μορφή του πλέγματος κατά τη φόρτιση. Θεωρείται, ότι όλα τα πλέγματα καλύπτουν την ίδια επιφάνεια του ελάσματος. Στην περίπτωση της ομοιόμορφα κατανεμημένης παραμόρφωσης, όλα τα γειτονικά πεπερασμένα στοιχεία παραμορφώνονται περίπου το ίδιο, ενώ στην περίπτωση που δημιουργείται τοπικός λαιμός, κάποια στοιχεία παραμορφώνονται αισθητά περισσότερο. Επίσης, η παραμόρφωση των μικρότερων στοιχείων είναι μεγαλύτερη από την παραμόρφωση του στοιχείου του αραιού πλέγματος, για ίδιο πλάτος λαιμού και ίδια επιμήκυνση της επιφάνειας.

Σχήμα 4-58: Καμπύλη απόκρισης αριθμητικών μοντέλων US με chm=0, με και χωρίς προσαρμογή της κρίσιμης παραμόρφωσης αστοχίας.

Σχήμα 4-59: Μορφή αστοχίας αριθμητικών μοντέλων US με χαρακτηριστικό μέγεθος στοιχείων le= 6.25, 10, 12.5, 15 mm (από αριστερά προς τα δεξιά). Σε όλα τα μοντέλα, μετά το όριο αντοχής, έχει χρησιμοποιηθεί το μοντέλο υλικού που προσδιορίστηκε με αντίστροφη μηχανική, βάσει του στοιχείου le=6.25mm.

Σχήμα 4-60: Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση, τριαξονικότητα των τάσεων, κρίσιμη παράμετρος αστοχίας (Damage Criterion) και Damage Degradation συναρτήσει της κατακόρυφης μετατόπισης του διεισδυτή (Indenter Displacement), στην εφελκυστική (α) και θλιπτική (β) ίνα του πεπερασμένου στοιχείου που ξεκινά η θραύση, στο αριθμητικό μοντέλο 1FB, le=6.25mm, chm=2, offset=+35mm. Εκκίνηση αστοχίας, όταν το Damage Degradation αρχίζει να λαμβάνει θετικές τιμές.

Σχήμα 4-61: Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση, τριαξονικότητα των τάσεων, κρίσιμη παράμετρος αστοχίας (Damage Criterion) και Damage Degradation συναρτήσει της κατακόρυφης μετατόπισης του διεισδυτή (Displacement), στην εφελκυστική (α) και θλιπτική (β) ίνα του πεπερασμένου στοιχείου που ξεκινά η θραύση, στο αριθμητικό μοντέλο 1FB, le=6.25mm, chm=2, offset=+35mm με εισαγωγή της τιμής αποκοπής στο κριτήριο αστοχίας.

Σχήμα 4-62: Επίδραση εισαγωγής της τιμής αποκοπής, στο κριτήριο αστοχίας, στα αποτελέσματα της προσομοίωσης 1FB, le=6.25mm, chm=2, offset=+35mm και le=6.25mm, chm=1.5, offset=+35mm

Σχήμα 4-63: Επίδραση εισαγωγής της τιμής αποκοπής, στο κριτήριο αστοχίας, στα αποτελέσματα της προσομοίωσης 2FB, le=10mm, chm=0, offset=+5mm και le=15mm, chm=0, offset=+5mm

Σχήμα 4-64: Επίδραση εισαγωγής της τιμής αποκοπής, στο κριτήριο αστοχίας, στα αποτελέσματα της προσομοίωσης US, le=6.25mm, chm=0, offset=+5mm και le=12.5mm, με μοντέλο υλικού για 6.25mm, chm=0, offset=+5mm

Σχήμα 4-65: Πειραματικά αποτελέσματα κρίσιμης παραμόρφωσης – τριαξονικότητας για Al 2024-T351 των Lou και Huh [33]

Σχήμα 4-66: Κινητική ενέργεια μοντέλου ως ποσοστό της εσωτερικής ενέργειας, κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, ως συνάρτηση της μετατόπισης του διεισδυτή. Το διάγραμμα παράχθηκε για το αριθμητικό μοντέλο 2FB, le=10mm, chm=1.5.

Σχήμα 4-67: Μεταβολή της προβλεπόμενης απόκρισης του αριθμητικού μοντέλου του ενισχυμένου ελάσματος στην εγκάρσια φόρτιση, για διαφορετικές ταχύτητες διεισδυτή. Αποτελέσματα για το μοντέλο 2FB, le=15mm, chm=1.5

Σχήμα 4-68: Υπολογιστικός χρόνος ανάλογα με την πυκνότητα πλέγματος για την προσομοίωση του πειράματος 2FB.

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 3-1: Χαρακτηριστικά μήκη πεπερασμένων στοιχείων προσομοιώσεων

Πίνακας 3-2: Παράμετροι ορισμού καμπύλης υλικού ελάσματος 1 για την περιοχή από το όριο αντοχής έως την έναρξη της αστοχίας

Πίνακας 3-3: Παράμετροι ορισμού καμπύλης υλικού ελάσματος 2 για την περιοχή από το όριο αντοχής έως την έναρξη της αστοχίας

Πίνακας 3-4: Υπολογιστικό κόστος προσομοίωσης πειράματος εφελκυσμού ανάλογα με το χαρακτηριστικό μέγεθος στοιχείου που χρησιμοποιείται στην περιοχή του επιμηκυνσιομέτρου

Πίνακας 4-1: Ισοδύναμη παραμόρφωση Damage Initiation του μοντέλου υλικού, για κάθε έλασμα και μέγεθος πεπερασμένου στοιχείου, συναρτήσει της τριαξονικότητας, με βάση τη σχέση Rice-Tracey και με c_{hm}=2

Πίνακας 4-2: Ισοδύναμη παραμόρφωση Damage Initiation του μοντέλου υλικού, για κάθε έλασμα και μέγεθος πεπερασμένου στοιχείου, συναρτήσει της τριαξονικότητας, με βάση τη σχέση Rice-Tracey και με c_{hm}=1.5

Πίνακας 4-3: Ισοδύναμη παραμόρφωση Damage Initiation του μοντέλου υλικού του Alsos, για κάθε έλασμα και μέγεθος πεπερασμένου στοιχείου, συναρτήσει της τριαξονικότητας, με βάση τη σχέση Rice-Tracey και με cRT=1.5

Πίνακας 4-4: Συγκεντρωτικός πίνακας των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων για το πείραμα κρούσης της πλάκας χωρίς ενισχυτικά, US

Πίνακας 4-5: Συγκεντρωτικός πίνακας των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων για το πείραμα κρούσης της πλάκας με ένα επίπεδο ενισχυτικό, 1FB

Πίνακας 4-6: Συγκεντρωτικός πίνακας των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων για το πείραμα κρούσης της πλάκας με δύο επίπεδα ενισχυτικά, 2FB

Πίνακας 4-7: Προσθήκη τιμής αποκοπής στο κριτήριο αστοχίας, μέσω της υπερβολικής αύξησης της κρίσιμης πλαστικής παραμόρφωσης αστοχίας, στην περιοχή της μονοαξονικής θλίψης. Ενδεικτικά, ο πίνακας που εισάγεται στο Ductile Damage του ABAQUS, για το μοντέλο υλικού που αντιστοιχεί σε le=6.25mm

Πίνακας 4-8: Υπολογιστικό κόστος προσομοίωσης πειράματος 2FB, ανάλογα με το χαρακτηριστικό μέγεθος στοιχείου που χρησιμοποιείται στο αριθμητικό μοντέλο του ενισχυμένου ελάσματος

Πίνακας Συμβόλων

σ	MPa	Τάση
F	N	Δύναμη
A	m^2	Εμβαδόν διατομής
$\sigma_{eq-von\ Mises}$, σ_{eq}	MPa	Ισοδύναμη τάση κατά von Mises
$\sigma_{x,y,z}$	MPa	Ορθές τάσεις κατά τους τρεις άξονες του συστήματος αναφοράς
$\tau_{xy,yz,zx}$	MPa	Διατμητικές τάσεις επί των τριών επιπέδων του συστήματος αναφοράς
σ_h	MPa	Υδροστατική τάση, υπεύθυνη για την μεταβολή του όγκου ενός στοιχείου
η	-	Τριαξονικότητα των τάσεων
ε	-	Γραμμική παραμόρφωση
ε_{eq}	-	Ισοδύναμη παραμόρφωση κατά von Mises
$\varepsilon_{x,y,z}$	-	Αξονικές παραμορφώσεις κατά τους τρεις άξονες του συστήματος αναφοράς
$\gamma_{xy,yz,zx}$	-	Γωνιακές παραμορφώσεις επί των τριών επιπέδων του συστήματος αναφοράς
E_{int}	kJ	Εσωτερική ενέργεια παραμόρφωσης που αποθηκεύει ένας όγκος του υλικού
V	m^3	Όγκος
u	kJ/m^3	Πυκνότητα ενέργειας παραμόρφωσης
E	GPa	Μέτρο ελαστικότητας υλικού
G	GPa	Μέτρο διάτμησης υλικού
v	-	Λόγος Poisson
A_0	m^2	Αρχικό εμβαδόν διατομής δοκιμίου εφελκυσμού

σ_{eng}	MPa	Πειραματική τάση
σ_{true}	MPa	Πραγματική τάση
ε_{eng}	-	Πειραματική παραμόρφωση
ε_{true}	-	Πραγματική παραμόρφωση
K	MPa	Σταθερά ενδοτράχυνσης
n	-	Συντελεστής ενδοτράχυνσης
$\varepsilon_{true,plastic}$, $\varepsilon_{true,pl}$, $\bar{\varepsilon}$, ε_{eq}, ε_{eq}^{pl}	-	Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση
$\sigma_{y,eng}$	MPa	Πειραματική τάση στο όριο διαρροής
$\sigma_{y,true}$	MPa	Πραγματική τάση στο όριο διαρροής
$\varepsilon_{y,eng}$	-	Πειραματική παραμόρφωση (ελαστική) στο όριο διαρροής
$\varepsilon_{initiation}$	-	Πλαστική παραμόρφωση στο σημείο έναρξης της αστοχίας
D	-	Παράμετρος Damage Degradation
le	mm	Χαρακτηριστικό μέγεθος πεπερασμένου στοιχείου
$\overline{u_{pl}}, u_{pl}$	mm	Ισοδύναμη πλαστική επιμήκυνση πεπερασμένου στοιχείου
$\sigma_{ult,true}$	MPa	Ισοδύναμη πραγματική τάση στο όριο αντοχής
$\varepsilon_{ult,true,pl}$	-	Ισοδύναμη πραγματική παραμόρφωση στο όριο αντοχής
w	-	Παράγοντας παρεμβολής μεταξύ των σχέσεων που αφορούν την καμπύλη ισοδύναμης πραγματική τάσης-παραμόρφωσης μετά το όριο αντοχής
$\varepsilon_{1,2,3}$	-	Αξονικές παραμορφώσεις κατά τους τρεις κύριους άξονες
$\varepsilon_{1f,2f,3f}$	-	Πλαστικές παραμορφώσεις θραύσης κατά τους τρεις κύριους άξονες
$\varepsilon_{ps,f}$	-	Πλαστική παραμόρφωση θραύσης σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης

$\varepsilon_{plain-strain}$	-	Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση θραύσης σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης
$\sigma_{1,2,3}$	MPa	Τάση κατά τους τρεις κύριους άξονες
β	-	Λόγος μέγιστης και ελάχιστης κύριας παραμόρφωσης
D_{cr}	-	Κρίσιμη τιμή παραμέτρου αστοχίας
$\varepsilon_{eq,ut,f}$	-	Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση θραύσης σε συνθήκες μονοαξονικού εφελκυσμού
a_{RT}	-	Παράμετρος ρύθμισης του κριτηρίου θραύσης Rice-Tracey που εξαρτάται από το υλικό
c_{hm}	-	Σταθερά στον εκθέτη της σχέσης Rice-Tracey
$\varepsilon_{eq,fr}^{pl}$	-	Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση θραύσης
ε_{cr}	-	Κρίσιμη πλαστική παραμόρφωση αστοχίας

Κεφάλαιο 1ο

Εισαγωγή

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο και στόχος διπλωματικής εργασίας

Το αντικείμενο που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία είναι η εύρεση μίας αποτελεσματικής διαδικασίας για τη ρεαλιστική μοντελοποίηση της διάτρησης ενός ενισχυμένου ελάσματος από ένα άκαμπτο στερεό, με τη χρήση ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Το ενισχυμένο έλασμα είναι το «κύτταρο» της μεταλλικής κατασκευής της γάστρας ενός πλοίου και το άκαμπτο στερεό αντιπροσωπεύει ένα ξένο αντικείμενο που προσκρούει σε αυτήν, όπως είναι ένας υποθαλάσσιος βράχος κατά μία προσάραξη ή ο βολβός ενός άλλου πλοίου κατά μία πλαγιομετωπική σύγκρουση μεταξύ των δύο. Η σωστή μοντελοποίηση του προβλήματος, αποσκοπεί στην ακριβή πρόβλεψη της συμπεριφοράς απόκρισης του ελάσματος και της μορφής αστοχίας, δηλαδή της θέσης, του σχήματος και της έκτασης της ρωγμής.

Η εύρεση μίας αξιόπιστης μεθοδολογίας αριθμητικής μοντελοποίησης πειραμάτων ή και πραγματικών ατυχημάτων έχει δύο κύριους απώτερους στόχους. Πρώτων, η μελέτη τετελεσμένων ατυχημάτων, μέσω της αριθμητικής προσομοίωσής τους, μπορεί να αποκαλύψει σημαντικές πληροφορίες για τις συνθήκες σύγκρουσης, οι οποίες προκάλεσαν τη δεδομένη βλάβη της κατασκευής. Δεύτερων, η βελτιστοποίηση της κατασκευής στη φάση του σχεδιασμού, ώστε να περιορίζεται η δριμύτητα των συνεπειών τυχόν ατυχημάτων. Επεξηγηματικά, ο σχεδιασμός της μεταλλικής κατασκευής της γάστρας γίνεται με σκοπό:

1. τη μεγιστοποίηση της ενέργειας παραμόρφωσης που μπορεί να απορροφήσει πριν τη θραύση, και
2. την ελαχιστοποίηση του μεγέθους της διαμπερούς ρηγμάτωσης που δημιουργείται από μία σύγκρουση, ή/και τη δημιουργία τέτοιων ρηγματώσεων ώστε να ελαχιστοποιείται η εκροή φορτίου και να μεγιστοποιείται η εναπομείνουσα αντοχή και ευστάθεια.

1.2 Υπόβαθρο

Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία του Διεθνή Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO) οι προσαράξεις δεν είναι σπάνιο φαινόμενο, καθώς αποτελούν το 1/4 των συνολικών ατυχημάτων που συμβαίνουν σε φορτηγά πλοία[1] [1]. Συνήθως λαμβάνουν μέρος σε παράκτιες περιοχές ή στενά περάσματα με μικρό βάθος, όπως λιμάνια, διώρυγες και ποτάμια και ευνοούνται από θαλάσσια ρεύματα, παλίρροιες ή δυνατό αέρα, ιδίως όταν η ορατότητα είναι χαμηλή. Μπορεί να οφείλονται σε ανθρώπινο λάθος, όπως λανθασμένη πηδαλιούχηση του πλοίου, σε μηχανικό σφάλμα του ίδιου συστήματος ή διέλευση πάνω

[1] Μεταξύ ατυχημάτων σύγκρουσης, προσάραξης, πυρκαγιάς, ανατροπής και άλλων

από κάποια αχαρτογράφητη διαμόρφωση του πυθμένα της θάλασσας. Συνέπειες τέτοιων ατυχημάτων αποτελούν η απώλεια της δομικής ακεραιότητας της γάστρας, η απώλεια φορτίου, η θαλάσσια ρύπανση, η παρεμπόδιση θαλάσσιων οδών, η βύθιση του πλοίου και, το χειρότερο, η απώλεια ανθρώπινης ζωής. Ένα σχετικά πρόσφατο περιστατικό προσάραξης πλοίου με δραματικές συνέπειες στην παγκόσμια ναυτιλία ήταν η απόφραξη της διώρυγας του Σουέζ από το πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, Ever Given.

Πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με την μοντελοποίηση συγκρούσεων και προσαράξεων πλοίων, τη μελέτη των μηχανισμών θραύσης του υλικού και τα κριτήρια που μπορούν να την περιγράψουν καλύτερα.

- Ο Σαμουηλίδης [2] συνοψίζει τα συνήθη εργαλεία που χρησιμοποιούνται στην μοντελοποίηση των συγκρούσεων μεταξύ πλοίων και αναφέρει σχεδιαστικές λύσεις που έχουν προταθεί για την μετρίαση των συνεπειών τους.
- Η μοντελοποίηση του υλικού και η διασπορά που παρουσιάζουν οι τιμές των ιδιοτήτων του απασχολούν τους Hogstrom και Ringsberg [3], οι οποίοι εξετάζουν μία μελέτη περίπτωσης για μία σύγκρουση μεταξύ ενός τμήματος πλώρης και ενός τμήματος πλευρικού τοιχώματος και ελέγχουν την ευαισθησία του αποτελέσματος σε αβεβαιότητες που αφορούν τα δεδομένα εισόδου.
- Οι Wierzbicki και Bao [4] παρουσιάζουν και αποτιμούν επτά κριτήρια θραύσης, απασχολούμενοι με την ρύθμισή τους μέσω εργαστηριακών δοκιμών υλικού και σχολιάζουν το εύρος καταλληλότητας του κάθε ενός σε εφαρμογές με διαφορετικές συνθήκες φόρτισης.
- Ο Törnqvist [5] υπογραμμίζει τη σημασία του κριτηρίου αστοχίας στην πρόβλεψη της έναρξης της ρωγμής και επομένως στην διάδοσή της και στην διαμόρφωση της τελικής μορφής αστοχίας. Συνεπώς, προσβλέπει στην εύρεση ενός ρεαλιστικού κριτηρίου και στην επικύρωσή του μέσω των προσομοιώσεων των πειραμάτων σύγκρουσης μεγάλης κλίμακας που εκτέλεσε.
- Με μοντελοποιήσεις πειραμάτων επίσης μεγάλης κλίμακας ελέγχουν οι Ehlers και Broekhuijsen [6] την απόδοση διαφόρων κριτηρίων θραύσης. Τα πειράματα αφορούν την απόκριση της κατασκευής κάποιων πλευρικών τοιχωμάτων πλοίων σε σύγκρουση με βολβοειδείς πλώρες.
- Τα πειράματα μικρής και μεσαίας κλίμακας απαιτούν οικονομικότερο προϋπολογισμό και κατά συνέπεια μπορούν να γίνουν συχνότερα και από πιο μικρά εργαστήρια, χωρίς ωστόσο να υστερούν ως προς την προσφορά τους στην κατανόηση των φυσικών φαινομένων. Οι Alsos και Amdahl [7], [8] εκτελούν πειράματα, στα οποία ενισχυμένα ελάσματα συγκρούονται κάθετα με έναν άκαμπτο διεισδυτή. Έπειτα, τα μοντελοποιούν αριθμητικά για να μελετήσουν την αποδοτικότητα των κριτηρίων θραύσης RTCL και BWH στην αποτύπωση της παρατηρούμενης μορφής αστοχίας και στην πρόβλεψη της αντίστασης του ελάσματος στην παραμόρφωση και να εκτιμήσουν την επίδραση του μεγέθους των πεπερασμένων στοιχείων στην έναρξη της ρωγμής.

- Οι Μαρινάτος και Σαμουηλίδης [9] μοντελοποιούν δεκαοκτώ διαφορετικά πειράματα εκτελεσμένα υπό στατικό και δυναμικό καθεστώς και σε διαφορετικές συνθήκες φόρτισης, ώστε να μελετηθεί η επίδραση που έχει το μοντέλο του υλικού (καμπύλη υλικού και κριτήριο αστοχίας), η πυκνότητα του πλέγματος και ο ρυθμός παραμόρφωσης στο αποτέλεσμα. Στόχος τους ήταν η σύσταση μίας καθολικής μεθοδολογίας κατάλληλης για το σύνολο των εφαρμογών.

Το σύνολο των ερευνητών αναφέρεται στις αβεβαιότητες που ενέχουν οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι μοντελοποίησης της κατασκευής και στις ανακρίβειες της μοντελοποίησης του υλικού, οι οποίες εμποδίζουν τη διατύπωση μίας καθολικής μεθοδολογίας που θα επιτυγχάνει να προβλέψει τη μορφή αστοχίας σε όλες τις εφαρμογές της. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει την αναγκαιότητα, παρά την πλούσια βιβλιογραφία επί του θέματος, της περαιτέρω ενασχόλησης με το συγκεκριμένο πρόβλημα, καθώς παραμένει ανεξάντλητο.

1.3 Επισκόπηση διπλωματικής εργασίας

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, γίνεται η αριθμητική προσομοίωση τριών πειραμάτων μεσαίας κλίμακας που εκτελέστηκαν και μελετήθηκαν, επίσης αριθμητικά, από τους Alsos και Amdahl [7], [8]. Περιλαμβάνουν τρεις διατάξεις ενισχυμένου ελάσματος στις οποίες προσκρούει κάθετα ένας άκαμπτος διεισδυτής. Το στερεό σώμα έχει σχετική ταχύτητα με διεύθυνση κάθετη ως προς το ενισχυμένο έλασμα και μέτρο τέτοιο, ώστε το πείραμα να μπορεί να θεωρηθεί ως ημι-στατικό ή ψευδο-στατικό (quasi-static). Το φυσικό ανάλογο της συγκεκριμένης μοντελοποίησης είναι μια προσάραξη στην οποία το πλοίο «κάθεται» κατακόρυφα σε βράχο. Θεωρείται, επίσης, ότι η επαφή του ξένου σώματος με την γάστρα περιορίζεται μόνο μεταξύ δύο εδρών και σταθμίδων της τοπικής ενίσχυσης. Το σημείο στο οποίο επικεντρώνεται η ακόλουθη ανάλυση είναι η μοντελοποίηση του υλικού και, ειδικότερα, η εκτίμηση της πραγματικής καμπύλης τάσης-παραμόρφωσής του και η επιλογή/κατασκευή ενός κατάλληλου για την περίπτωση κριτηρίου θραύσης. Ακόμη, διερευνάται η επιρροή στα αποτελέσματα του χαρακτηριστικού μεγέθους του στοιχείου, των ατελειών που εισάγονται στο αριθμητικό μοντέλο και του τρόπου μοντελοποίησης των συγκολλήσεων. Η μοντελοποίηση γίνεται στο περιβάλλον ABAQUS CAE με χρήση στοιχείων κελύφους (shell elements). Η ανάλυση αφορά ισότροπα και ομοιογενή υλικά -στη συγκεκριμένη εφαρμογή, ελάσματα απλού κατασκευαστικού χάλυβα- τα οποία συμπεριφέρονται όλκιμα έως τη θραύση.

Στο 2ο Κεφάλαιο, παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο της διπλωματικής, που σχετίζεται με τη συμπεριφορά των υλικών υπό μηχανική φόρτιση και, ιδιαιτέρως, υπό στατικό φορτίο. Αρχικά, στο υποκεφάλαιο 2.1 γίνεται μία εισαγωγή σε έννοιες της μηχανικής παραμορφώσιμου σώματος και στην ελαστική και πλαστική συμπεριφορά των υλικών. Κατόπιν, στο υποκεφάλαιο 2.2, περιγράφεται η διαδικασία της δοκιμής μονοαξονικού εφελκυσμού, ο τρόπος απόκρισης ενός όλκιμου υλικού, σε αυτό το είδος της φόρτισης και η καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης, που την περιγράφει. Το επίκεντρο του ενδιαφέροντος είναι η σχέση μεταξύ της πειραματικής και πραγματικής καμπύλης του

υλικού. Τέλος, το υποκεφάλαιο 2.3 αναφέρεται στη θραυστομηχανική. Στην αρχή, παρουσιάζονται οι δύο βασικές θεωρίες της μηχανικής των θραύσεων και τα είδη θραύσης υπό στατικό φορτίο: ψαθυρή και όλκιμη. Η βαρύτητα δίνεται στον μηχανισμό εξέλιξης της όλκιμης θραύσης και στην επίδραση που έχει η τριαξονικότητα των τάσεων στην ολκιμότητα του υλικού.

Το 3ο Κεφάλαιο, αφορά το μοντέλο του υλικού, όπως αυτό εισάγεται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων και περιλαμβάνει την πραγματική καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης και το κριτήριο αστοχίας. Αρχικά, στο υποκεφάλαιο 3.1, αναφέρονται κάποιες παράμετροι της μοντελοποίησης και ο τρόπος που ρυθμίζονται στη παρούσα εργασία. Στο υποκεφάλαιο 3.2, εξηγείται η μέθοδος με την οποία προσδιορίζεται και εισάγεται στο λογισμικό η καμπύλη του υλικού, από τους ερευνητές της βιβλιογραφίας και έπειτα από την συγγραφέα. Το υποκεφάλαιο 3.3, αφορά το κριτήριο αστοχίας που τίθεται, με σκοπό να προσομοιωθεί η συμπεριφορά του υλικού στη θραύση, για διάφορες συνθήκες εντατικής κατάστασης. Παρουσιάζονται κάποια δημοφιλή κριτήρια αστοχίας, ο τρόπος που χρησιμοποιούνται από τους ερευνητές και, κατόπιν, αναλύεται το κριτήριο που εφαρμόστηκε στην διπλωματική αυτή. Το τελευταίο υποκεφάλαιο (3.4) αφιερώνεται στην περιγραφή της διαδικασίας και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης του πειράματος εφελκυσμού, στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Η προσομοίωση αποσκοπεί στον προσδιορισμό των πραγματικών καμπυλών υλικού, σε μονοαξονικό εφελκυσμό, που αργότερα θα αποτελέσουν είσοδο στις μοντελοποιήσεις των πειραμάτων των Alsos και Amdahl [7].

Το 4ο Κεφάλαιο, αφορά τα πειράματα κρούσης ενισχυμένων ελασμάτων με κωνοειδή διεισδυτή, των Alsos και Amdahl [7] και την μοντελοποίησή τους με πεπερασμένα στοιχεία. Καταρχήν, στο υποκεφάλαιο 4.1, γίνεται η περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας και των αποτελεσμάτων της, όπως αναφέρεται από τους πειραματιστές [7]. Ύστερα, στο υποκεφάλαιο 4.2, σκιαγραφείται, για λόγους σύγκρισης με την παρούσα δουλειά, η μέθοδος και τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης των πειραμάτων αυτών, με πεπερασμένα στοιχεία, από το Μαρινάτο [23] και τους Alsos και Amdahl [8]. Τελικά, στο υποκεφάλαιο 4.3, αναλύεται η διαδικασία μοντελοποίησης των πειραμάτων, που ακολουθήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, και τα αποτελέσματα αυτής, που συνιστούν την καμπύλη απόκρισης της κατασκευής και τη μορφή αστοχίας που προβλέπεται. Στο υποκεφάλαιο 4.4, γίνεται μία αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από τη συγγραφέα και συζητείται ο τρόπος με τον οποίον η μεταβολή κάποιων παραμέτρων μοντελοποίησης, που αφορούν τη γεωμετρία και το υλικό, τα επηρέασαν. Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που περιέχονται στη βιβλιογραφία [8], [23] και εντοπίζονται τα σημεία στα οποία υπερέχουν και υστερούν.

Στο 5ο Κεφάλαιο, η συγγραφέας καταλήγει σε συμπεράσματα, που εξήχθησαν από τη μελέτη, και συστάσεις, που αφορούν τη μοντελοποίηση του υλικού σε παρόμοιες εφαρμογές. Εκτιμάται η προστιθέμενη αξία της διπλωματικής, ανάμεσα στις ερευνητικές δουλειές της βιβλιογραφίας, και γίνονται κάποιες προτάσεις για πιθανές κατευθύνσεις μελλοντικής δουλειάς, πάνω στο αντικείμενο.

Αυτή η σελίδα αφέθηκε σκοπίμως κενή

Κεφάλαιο 2ο

Θεωρητικό Υπόβαθρο

Κεφάλαιο 2 : Θεωρητικό Υπόβαθρο

Σε αυτό το κεφάλαιο επιδεικνύονται, εν συντομία, οι θεωρητικές βάσεις οι οποίες ήταν απαραίτητες για τη συγγραφή της παρούσας διπλωματικής, αλλά και για την παρακολούθηση της από τον αναγνώστη. Γίνεται εισαγωγή στα μεγέθη των τάσεων και παραμορφώσεων της Μηχανικής Παραμορφώσιμου Σώματος αλλά και στις έννοιες της Ελαστικότητας και Πλαστικότητας που αφορούν στην συμπεριφορά των δομικών στοιχείων. Κατόπιν, περιγράφεται το πείραμα εφελκυσμού και απαριθμούνται οι χαρακτηριστικές περιοχές που εντοπίζονται στο διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης, το οποίο αποτελεί προϊόν της δοκιμής αυτής. Αναλύεται το είδος της σχέσης μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης σε κάθε μία περιοχή και εξηγούνται οι μηχανισμοί που καθορίζουν τη σχέση αυτή. Το τελευταίο υποκεφάλαιο αφορά στη Μηχανική των Θραύσεων και αναφέρεται στους διαφορετικούς τύπους θραύσης που συναντώνται ανάλογα με το είδος του φορτίου, τους παράγοντες που ευνοούν την εμφάνιση ψαθυρής έναντι όλκιμης θραύσης υπό στατικό φορτίο και τις δύο βασικές Θεωρίες που διατυπώνονται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της εντατικής κατάστασης στο άκρο της ρωγμής. Η εστίαση γίνεται, τέλος, στην περιγραφή του μηχανισμού ανάπτυξης της όλκιμης θραύσης και της επίδρασης της τριαξονικότητας των τάσεων στην έναρξη της ρωγμής. Για την παρουσίαση του θεωρητικού υποβάθρου αυτού, η συγγραφέας ανέτρεξε στα βιβλία των Χρυσουλάκη και Παντελή [10], Παπάζογλου και Τσούβαλη [11], Pineau και Pardoen [12].

2.1 Μηχανική παραμορφώσιμου σώματος

2.1.1 Εισαγωγή

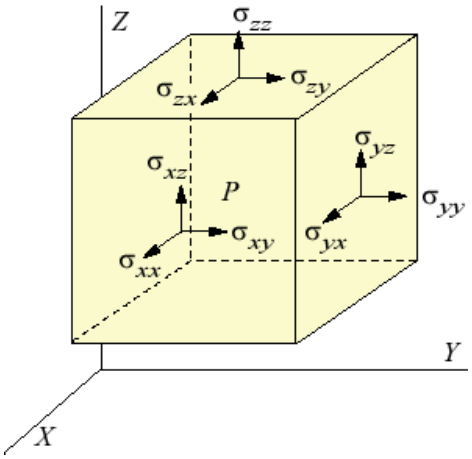
Όταν εξωτερικά φορτία ενεργούν επί ενός στερεού σώματος, τότε εσωτερικές δυνάμεις αναπτύσσονται για να τα αντισταθμίσουν, επιφέροντας μια κατάσταση (στατικής) ισορροπίας. Ως «τάση» ορίζεται το πηλίκο των εσωτερικών δυνάμεων, F, με την θεωρητική στοιχειώδη επιφάνεια τομής, A, πάνω στην οποία ενεργούν αυτές.

$$\sigma\,[Pa] = \frac{F\,[N]}{A\,[m^2]} \qquad \text{Εξ. 2-1}$$

Λαμβάνοντας υπόψη ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, του οποίου οι δύο άξονες βρίσκονται επί του επιπέδου μίας εσωτερικής διατομής του σώματος και ο τρίτος είναι κάθετος σε αυτήν (Σχήμα 2-1), τότε η τάση που αναπτύσσεται στη διατομή αυτή μπορεί να αναλυθεί σε τρεις συνιστώσες, συνευθειακές με τους άξονες αυτούς. Οι τάσεις των οποίων το διάνυσμα είναι συνεπίπεδο με την διατομή ονομάζονται διατμητικές, τ και η τάση που είναι κάθετη στη διατομή ονομάζεται ορθή, σ. Συνεπάγεται, ότι η εντατική κατάσταση κάθε κυβικού στοιχείου εντός ενός σώματος μπορεί να περιγραφεί με εννέα συνιστώσες τάσεων, μία ορθή και δύο διατμητικές σε κάθε επίπεδο (βλ. Σχήμα 2-1).

Χρήσιμο είναι, κατά την μελέτη προβλημάτων πολυαξονικής εντατικής καταπόνησης, το μέγεθος της ισοδύναμης τάσης η οποία γράφεται σύμφωνα με τον von Mises, ως εξής (Εξ. 2-2).

$$\sigma_{eq-von\,Mises} = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix}(\sigma_x-\sigma_y)^2+(\sigma_y-\sigma_z)^2+(\sigma_z-\sigma_x)^2 \\ +6*(\tau_{xy}+\tau_{yz}+\tau_{zx})^2\end{bmatrix}^{\frac{1}{2}} \qquad \text{Εξ. 2-2}$$



Σχήμα 2-1: Τρισδιάστατη ενταντική κατάσταση στερεού σώματος

Άξια αναφοράς είναι, επίσης, η έννοια της υδροστατικής τάσης. Αν γραφτεί ο τανυστής των τάσεων σε μορφή πίνακα 3x3, για τρισδιάστατη εντατική κατάσταση, τότε μπορούν να διακριθούν δύο συνιστώσες: η υδροστατική συνιστώσα, η οποία είναι υπεύθυνη για την μεταβολή του όγκου του στοιχείου (hydrostatic stress component) και η συνιστώσα εκτροπής (deviatoric stress component) η οποία τείνει να το παραμορφώσει αλλάζοντας το σχήμα του (Εξ. 2-3). Αποδεικνύεται ότι η υδροστατική τάση ισούται με τη μέση ορθή τάση.

$$\bar{\bar{\sigma}} = \overline{\overline{\sigma_h}} + \overline{\overline{\sigma_{dev}}} \Rightarrow$$

$$\begin{bmatrix}\sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz}\\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz}\\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\sigma_h & 0 & 0\\ 0 & \sigma_h & 0\\ 0 & 0 & \sigma_h\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\sigma_x-\sigma_h & \tau_{xy} & \tau_{xz}\\ \tau_{yx} & \sigma_y-\sigma_h & \tau_{yz}\\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z-\sigma_h\end{bmatrix} \qquad \text{Εξ. 2-3}$$

$$\sigma_h = \frac{\sigma_x+\sigma_y+\sigma_z}{3}$$

Το σχετικό μέγεθος της υδροστατικής τάσης, σε μία δεδομένη εντατική κατάσταση, εκφράζεται μέσω ενός άλλου μεγέθους που ονομάζεται τριαξονικότητα των τάσεων. Με άλλα λόγια, η τριαξονικότητα εκφράζει το κατά πόσο η εντατική κατάσταση

τείνει να μεταβάλλει τον όγκο του στοιχείου και όχι να το στρεβλώσει και υπολογίζεται ως ο λόγος της υδροστατικής προς την ισοδύναμη τάση (Εξ. 2-4).

$$\eta = \frac{\sigma_h}{\sigma_{eq}} \qquad \text{Εξ. 2-4}$$

Για παράδειγμα, η τριαξονικότητα των τάσεων ισούται με 0 στην περίπτωση της καθαρής διάτμησης, 1/3 στην περίπτωση του μονοαξονικού εφελκυσμού και 2/3 στην περίπτωση του διαξονικού εφελκυσμού.

Όταν εξωτερικά φορτία ενεργούν επί ενός παραμορφώσιμου στερεού σώματος, τότε το μέγεθος ή/και το σχήμα του μεταβάλλονται ως αποτέλεσμα της φόρτισής του. Η μηχανική του παραμορφώσιμου σώματος είναι μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση σε σχέση με τη μηχανική του στερεού σώματος, η οποία βασίζεται στην παραδοχή του απόλυτου, μη παραμορφώσιμου στερεού. Θεωρώντας ένα μονοδιάστατο στοιχείο εντός του στερεού σώματος υπό φόρτιση, ως «αξονική παραμόρφωση», ε, ορίζεται το ορισμένο ολοκλήρωμα του πηλίκου της στοιχειώδους μεταβολής του μήκους του, dl, προς το μήκος του στοιχείου αυτού, l, με άκρα l_0 και l. Σε ένα τρισδιάστατο στοιχείο, ορίζονται έξι συνιστώσες παραμόρφωσης: τρεις γραμμικές παραμορφώσεις, κάθετες σε κάθε επίπεδο που προκαλούν επιμήκυνση ή συρρίκνωση, $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ και τρείς γωνιακές/διατμητικές παραμορφώσεις παράλληλες με κάθε επίπεδο που προκαλούν στρέβλωση, δηλαδή αλλαγή των γωνιών μεταξύ των επιπέδων του στοιχείου, $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$. Οι γωνιακές παραμορφώσεις ορίζονται ως η αρνητική μεταβολή μίας γωνίας, α, μεταξύ ακμών του στοιχείου.

$$\varepsilon = \int_{l_0}^{l} \frac{dl}{l} \qquad \gamma = -\Delta\alpha = \alpha_0 - \alpha \qquad \text{Εξ. 2-5}$$

Κατά την μελέτη προβλημάτων πολυαξονικής εντατικής κατάστασης, η ισοδύναμη παραμόρφωση υπολογίζεται ως εξής (Εξ. 2-6):

$$\varepsilon_{eq} = \frac{2}{3} * \left[\frac{3}{2} * \left(\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_z^2\right) + \frac{3}{4} * \left(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2\right)\right]^{\frac{1}{2}} \qquad \text{Εξ. 2-6}$$

Οι τάσεις και οι παραμορφώσεις είναι αλληλένδετες. Με την επιβολή εξωτερικού φορτίου οι εσωτερικές τάσεις που αναπτύσσονται στο σώμα επάγουν την παραμόρφωσή του. Οι διατμητικές τάσεις προκαλούν γωνιακές παραμορφώσεις ενώ οι ορθές τάσεις προκαλούν αξονικές παραμορφώσεις. Με τη βοήθεια της Μηχανικής του Παραμορφώσιμου Σώματος, η μέτρηση ενός από τα δύο μεγέθη οδηγεί στον υπολογισμό του δεύτερου. Η ενέργεια παραμόρφωσης μπορεί να υπολογιστεί ως το διπλό ολοκλήρωμα της τάσης συναρτήσει της παραμόρφωσης και του όγκου του σώματος,

όπως φαίνεται στην Εξ. 2-7. Η ολοκλήρωση της τάσης ως προς την παραμόρφωση ονομάζεται πυκνότητα ενέργειας παραμόρφωσης, u, Εξ. 2-7.

$$E_{int} = \int \left(\int \sigma \, d\varepsilon \right) dV = \int u \, dV \qquad \text{Εξ. 2-7}$$

2.1.2 Ελαστικότητα - Ο νόμος του Hooke

Ένα (ομογενές και ισότροπο) υλικό συμπεριφέρεται «ελαστικά», όταν η ενέργεια που συσσωρεύεται σε αυτό με την παραμόρφωσή του είναι πλήρως ανακτήσιμη -αν θεωρηθεί ότι δεν υπάρχουν απώλειες λόγω τριβής- μετά την αποφόρτιση. Ισχύει, τότε, ότι οι τάσεις που αναπτύσσει και οι παραμορφώσεις που υφίσταται συνδέονται με μία σχέση απλής αναλογίας, όπως η σχέση μεταξύ της δύναμης που ενεργεί σε ένα ιδανικό ελατήριο και της επιμήκυνσής του σε σχέση με το φυσικό του μήκος (νόμος του Hooke) [Εξ. 2-8, Εξ. 2-9]. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι, σε συνθήκες γραμμικής ελαστικότητας, η παραμόρφωση του σώματος είναι ομοιόμορφη. Η σταθερά αναλογίας μεταξύ ορθών τάσεων και γραμμικών παραμορφώσεων καλείται «μέτρο ελαστικότητας», E και η σταθερά αναλογίας μεταξύ διατμητικών τάσεων και παραμορφώσεων καλείται «μέτρο διάτμησης», G.

$$\sigma \, [Pa] = E \, [Pa] * \varepsilon \, [ul] \qquad \text{Εξ. 2-8}$$

$$\tau \, [Pa] = G \, [Pa] * \gamma \, [ul] \qquad \text{Εξ. 2-9}$$

Έχει παρατηρηθεί ότι, με την ανάπτυξη ορθής τάσης, ένα τρισδιάστατο σώμα δεν παραμορφώνεται αποκλειστικά στη διεύθυνση της τάσης αυτής, αλλά και στις δύο άλλες διευθύνσεις και μάλιστα οι επαγόμενες παραμορφώσεις έχουν αντίθετο πρόσημο από την πρωτεύουσα. Ο απόλυτος λόγος μεταξύ κάθε μίας από τις δευτερεύουσες, επαγόμενες πλευρικές παραμορφώσεις προς την αξονική παραμόρφωση, υπό μονοαξονική τασική κατάσταση, είναι μηχανική ιδιότητα του υλικού και ονομάζεται λόγος Poisson, ν. Ο λόγος Poisson είναι θετικός αριθμός μικρότερος του ½ και συνδέεται με το μέτρο ελαστικότητας και το μέτρο διάτμησης μέσω της σχέσης Εξ. 2-10.

$$G = \frac{E}{2 * (1 + \nu)} \qquad \text{Εξ. 2-10}$$

Συνεπώς, οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι δύο και οι καταστατικές εξισώσεις μπορούν να γραφτούν συναρτήσει οποιουδήποτε ζεύγους φυσικών ιδιοτήτων. Συνήθως, επιλέγεται το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson.

Σε ένα τρισδιάστατο σώμα με τρισδιάστατη εντατική κατάσταση οι δομικές εξισώσεις μπορούν να γραφτούν σε μορφή πίνακα ως εξής (γενικευμένος νόμος του Hooke):

$$\begin{bmatrix}\sigma_x\\ \sigma_y\\ \sigma_z\end{bmatrix} = E * \begin{bmatrix}1 & -v & -v\\ -v & 1 & -v\\ -v & -v & 1\end{bmatrix} \times \begin{bmatrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \varepsilon_z\end{bmatrix} \qquad \text{Εξ. 2-11}$$

$$\begin{bmatrix}\tau_{xy}\\ \tau_{yz}\\ \tau_{zx}\end{bmatrix} = G * \begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \times \begin{bmatrix}\gamma_{xy}\\ \gamma_{yz}\\ \gamma_{zx}\end{bmatrix}$$

$$=> \begin{bmatrix}\tau_{xy}\\ \tau_{yz}\\ \tau_{zx}\end{bmatrix} = E * \begin{bmatrix}\frac{1}{2(1+v)} & 0 & 0\\ 0 & \frac{1}{2(1+v)} & 0\\ 0 & 0 & \frac{1}{2(1+v)}\end{bmatrix} \times \begin{bmatrix}\gamma_{xy}\\ \gamma_{yz}\\ \gamma_{zx}\end{bmatrix} \qquad \text{Εξ. 2-12}$$

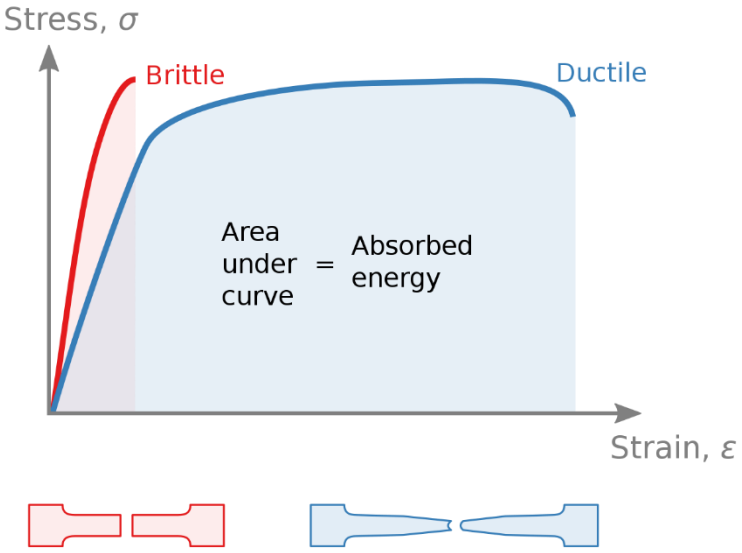
Συνδυαστικά, οι εξισώσεις Εξ. 2-11 και Εξ. 2-12 συνθέτουν το πλήρες μητρώο που αφορά την συνθήκη γραμμικής ελαστικότητας:

$$\begin{bmatrix}\sigma_x\\ \sigma_y\\ \sigma_z\\ \tau_{xy}\\ \tau_{yz}\\ \tau_{zx}\end{bmatrix} = E * \begin{bmatrix}1 & -v & -v & 0 & 0 & 0\\ -v & 1 & -v & 0 & 0 & 0\\ -v & -v & 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2(1+v)} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2(1+v)} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2(1+v)}\end{bmatrix} \times \begin{bmatrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \varepsilon_z\\ \gamma_{xy}\\ \gamma_{yz}\\ \gamma_{zx}\end{bmatrix} \qquad \text{Εξ. 2-13}$$

2.1.3 Πλαστικότητα

Ένα υλικό συμπεριφέρεται «πλαστικά», όταν η ενέργεια παραμόρφωσης που έχει απορροφήσει δεν είναι ανακτήσιμη. Η μόνιμη παραμόρφωση που αποκτά το σώμα, η οποία διατηρείται ακόμη και μετά την αποφόρτισή του, καλείται «πλαστική παραμόρφωση». Η πλαστική παραμόρφωση των κρυσταλλικών υλικών, όπως είναι τα μέταλλα, πραγματοποιείται μέσω της ολίσθησης τμημάτων του κρυσταλλικού πλέγματος, κατά μήκος ορισμένων κρυσταλλογραφικών επιπέδων και είναι αποτέλεσμα διατμητικών τάσεων, ανεξάρτητα από το είδος της καταπόνησης.

Υλικά τα οποία έχουν την ικανότητα να αναπτύξουν μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις πριν την θραύση τους, θεωρούνται «όλκιμα» υλικά. Η σημαντική πλαστική παραμόρφωση ως τη θραύση μεταφράζεται, επίσης, σε μεγάλη απορροφούμενη ενέργεια παραμόρφωσης (Εξ. 2-7). Αντίθετη περίπτωση αποτελούν τα «ψαθυρά» υλικά, τα οποία απορροφούν μικρή ενέργεια παραμόρφωσης ως την θραύση (βλ. *Σχήμα 2-2*).



Σχήμα 2-2 : Σύγκριση ενέργειας παραμόρφωσης ως τη θραύση όλκιμου και ψαθυρού υλικού

Η ολκιμότητα είναι χαρακτηριστικό του υλικού (χημική σύσταση και κρυσταλλογραφική δομή), όμως εξαρτάται επιπλέον από τη θερμοκρασία, το είδος της φόρτισης (π.χ. δυναμικά φορτία), το ρυθμό επιβολής του φορτίου και τα χαρακτηριστικά της εντατικής κατάστασης (ιδίως την τριαξονικότητα των τάσεων – περισσότερα γι' αυτό σε επόμενο κεφάλαιο). Η εντατική κατάσταση που επικρατεί στο υλικό εξαρτάται ιδιαιτέρως, πέρα από τη φόρτιση, από το πάχος του στοιχείου και την παρουσία ή όχι ελαττωμάτων στο εσωτερικό του. Η αύξηση του πάχους και της πυκνότητας των εσωτερικών ελαττωμάτων ευνοεί την επίδειξη ψαθυρής συμπεριφοράς δομικών στοιχείων των οποίων το υλικό χαρακτηρίζεται, κατά τα άλλα, όλκιμο. Επιπλέον, η αύξηση του ρυθμού επιβολής του φορτίου μειώνει την ολκιμότητα του στοιχείου.

Έχει παρατηρηθεί, ότι κατά τον εφελκυσμό (άσκηση αξονικών φορτίων που τείνουν να το επιμηκύνουν) ενός δομικού στοιχείου από όλκιμο υλικό, αυτό αρχικά επιμηκύνεται ισόογκα, έως ότου μία διατομή του, κάθετη στο επιβαλλόμενο φορτίο, αρχίσει να μικραίνει εστιασμένα και αισθητά, δημιουργώντας τον αποκαλούμενο «λαιμό» μέχρι να δημιουργηθεί ρωγμή και τελικά αποχωρισμός υλικού τοπικά.

Όταν το υλικό συμπεριφέρεται πλαστικά, η σχέση αναλογίας μεταξύ τάσεων και παραμορφώσεων δεν ισχύει. Ο γενικός κανόνας είναι μάλιστα ότι ο ρυθμός αύξησης της πλαστικής παραμόρφωσης με την τάση μεγαλώνει (βλ. Σχήμα 2-2 μπλε καμπύλη). Ο προσδιορισμός του είδους της σχέσης μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης ενός υλικού στην πλαστική περιοχή, αλλά και ο υπολογισμός των μηχανικών ιδιοτήτων που είναι απαραίτητες για την επίλυση της εξίσωσης τάσης-παραμόρφωσης στην ελαστική περιοχή

λειτουργίας μπορεί να βρεθεί με την εκτέλεση μίας δοκιμής εφελκυσμού. Περισσότερα για τη δοκιμή εφελκυσμού αναλύονται στο επόμενο εδάφιο.

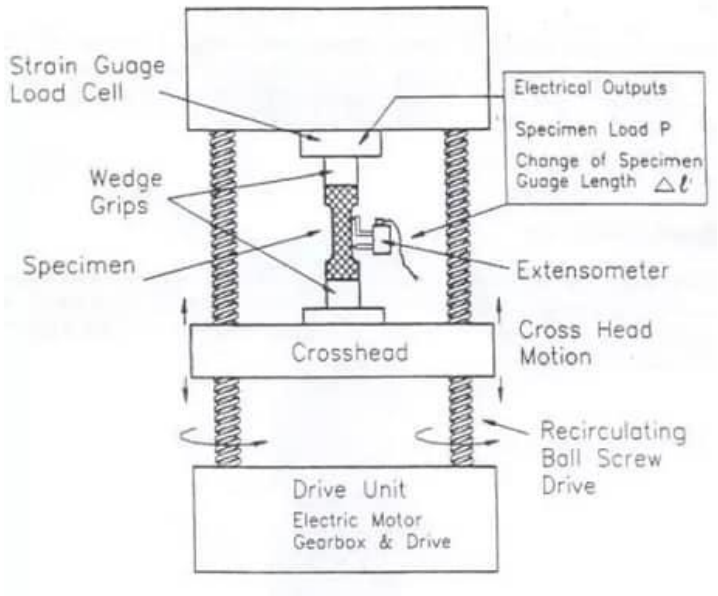
2.2 Δοκιμή εφελκυσμού

2.2.1 Περιγραφή δοκιμής

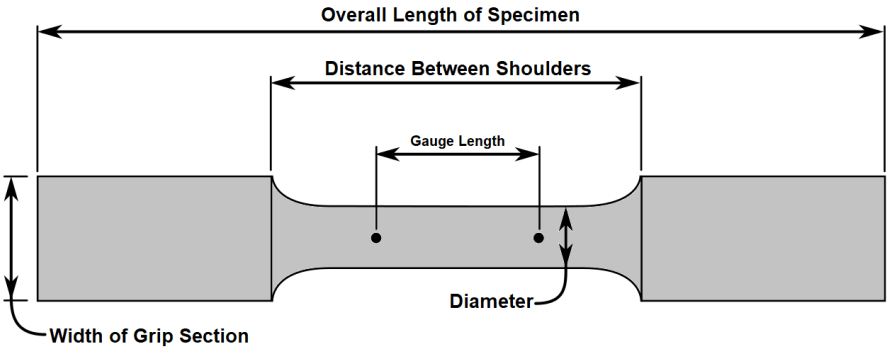
Η δοκιμή εφελκυσμού είναι μία καταστρεπτική δοκιμή, δηλαδή επιφέρει αστοχία, η οποία χρησιμοποιείται για την αναγνώριση ενός υλικού αλλά και τον προσδιορισμό κάποιων σημαντικών μηχανικών του ιδιοτήτων [13]. Στην πιο απλή μορφή του, το τεστ διεξάγεται με την αρπαγή των δύο άκρων ενός κατάλληλα σχεδιασμένου δοκιμίου και επιβολή σταθερού ρυθμού δύναμης ή μετατόπισης στο ένα άκρο του. Το δοκίμιο του υλικού που εξετάζεται έχει τη διαμόρφωση που φαίνεται στο Σχήμα 2-4.

Ένα δυναμόμετρο καταγράφει την τιμή της δύναμης που ασκείται στα άκρα του δοκιμίου κατά την διάρκεια του τεστ και ένα επιμηκυνσιόμετρο (gauge), εφαρμοσμένο στη μέση του δοκιμίου, καταγράφει την προοδευτική επιμήκυνση. Το πρωτογενές αποτέλεσμα του πειράματος είναι, δηλαδή, μία καμπύλη δύναμης-επιμήκυνσης. Οι χρήσιμες πληροφορίες, όμως, για τη συμπεριφορά του υλικού υπό εφελκυστικό φορτίο αποκαλύπτονται μετά την μετατροπή της καμπύλης δύναμης-επιμήκυνσης σε καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης. Η «πειραματική τάση» υπολογίζεται ως λόγος της δύναμης με την αρχική επιφάνεια διατομής του δοκιμίου και η «πειραματική παραμόρφωση» ως λόγος της μεταβολής του μήκους του επιταχυνσιομέτρου προς το αρχικό του μήκος (gauge length, βλ. Σχήμα 2-4).

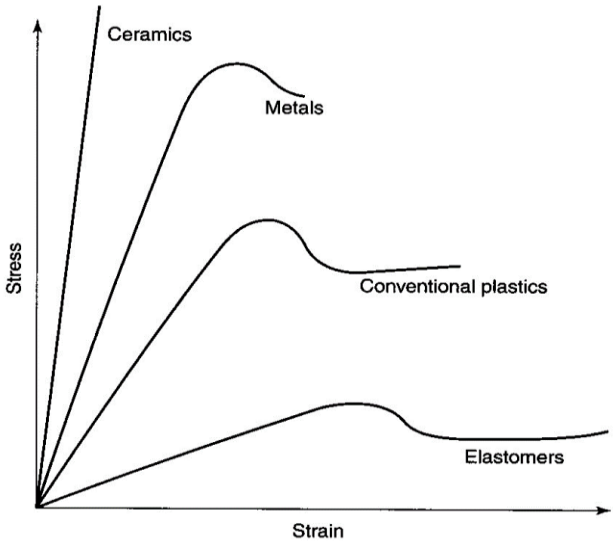
Η μορφή της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης που παράγεται από την δοκιμή εφελκυσμού εξαρτάται κυρίως από το είδος του υλικού (Σχήμα 2-5), γι' αυτό το λόγο αποτελεί και έναν από τους τρόπους αναγνώρισής του.



Σχήμα 2-3 : Σχεδιαστική απεικόνιση βασικών τμημάτων της μηχανής εφελκυσμού



Σχήμα 2-4 : Δοκίμιο εφελκυσμού



Σχήμα 2-5 : Καμπύλη εφελκυσμού για διάφορα είδη υλικών

2.2.2 Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης όλκιμου μεταλλικού υλικού σε μονοαξονικό εφελκυσμό

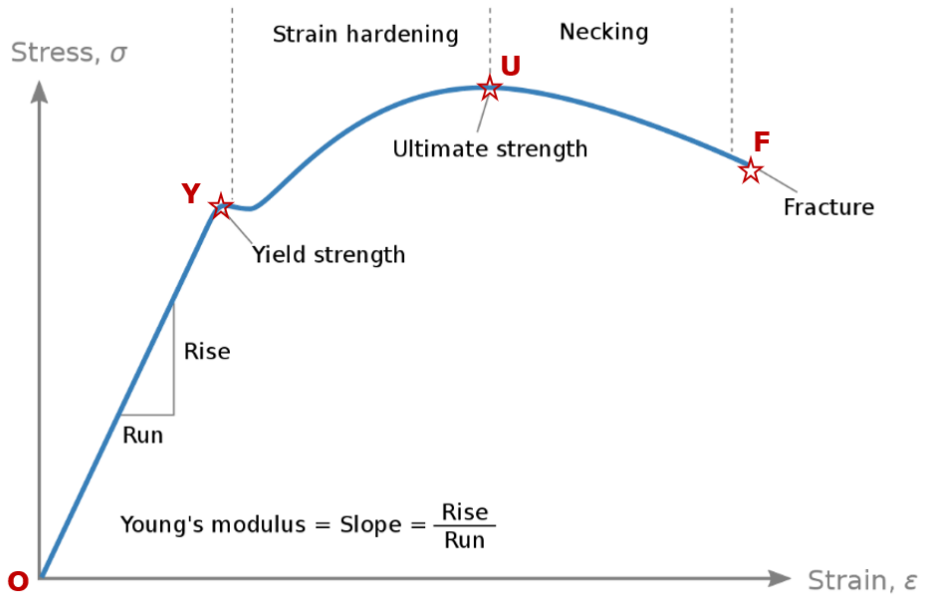
Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η εστίαση γίνεται στην συμπεριφορά των μεταλλικών υλικών και ιδίως αυτών που παρουσιάζουν αρκετή ολκιμότητα, όπως ο απλός ναυπηγικός χάλυβας θερμής έλασης (hot rolled structural steel, Grade A) σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Τα υλικά αυτού του είδους χαρακτηρίζονται από μία παραγόμενη καμπύλη τάσης παραμόρφωσης της μορφής του Σχήμα 2-6.

Παρατηρείται, ότι κατά την φόρτισή του το υλικό διανύει πρώτα μια γραμμικά ελαστική και έπειτα μία πλαστική περιοχή (O->Y και Y->F στο Σχήμα 2-6, αντίστοιχα). Η κλίση της καμπύλης στην ελαστική περιοχή είναι εξ' ορισμού το μέτρο ελαστικότητας του υλικού, E. Ο λόγος Poisson είναι σταθερός αριθμός εντός της ελαστικής περιοχής και για τέλειο ισοτροπικό υλικό λαμβάνει την τιμή 0.25. Ωστόσο μία μέση τιμή του λόγου Poisson για τους χάλυβες είναι 0.3. Το σημείο μετάβασης από την ελαστική στην πλαστική

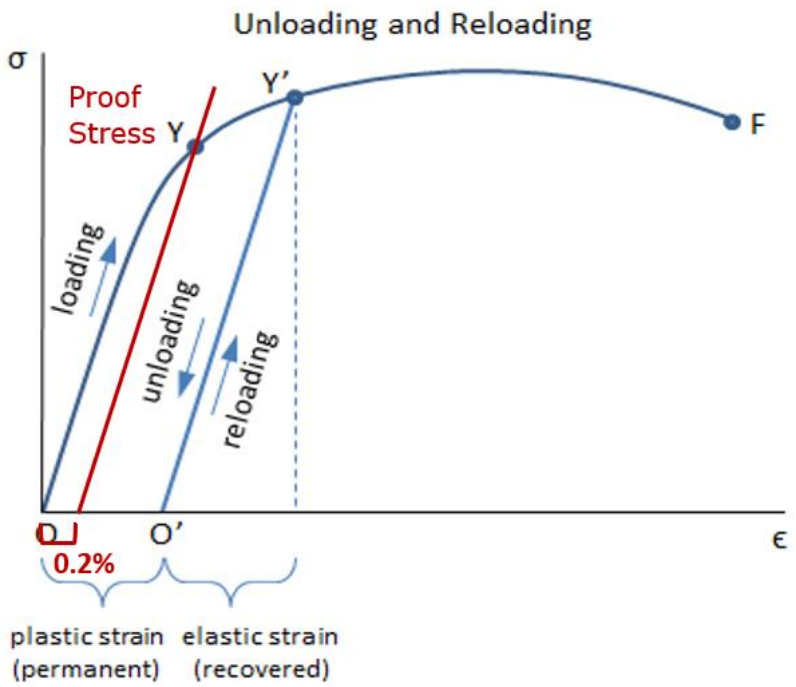
περιοχή ονομάζεται «όριο διαρροής» και είναι το σημείο μετά από το οποίο το δοκίμιο αποκτά μόνιμη, μη αντιστρεπτή, παραμόρφωση.

Η μόνιμη παραμόρφωση είναι η διαφορά της συνολικής παραμόρφωσης με την παραμόρφωση στο σημείο διαρροής (μέγιστη ελαστική παραμόρφωση). Επειδή στα περισσότερα υλικά το σημείο μετάβασης από την ελαστική στην πλαστική περιοχή είναι δυσδιάκριτο από το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης, όπως για παράδειγμα στο Σχήμα 2-7 έναντι του Σχήμα 2-6, ορίζεται ένα συμβατικό όριο διαρροής που αντιστοιχεί σε 0.2% μόνιμη πλαστική παραμόρφωση. Η μόνιμη παραμόρφωση βρίσκεται με την χάραξη ευθείας που διέρχεται από το υπό εξέταση σημείο της καμπύλης και έχει κλίση όση το μέτρο ελαστικότητας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-7. Η ευθεία αυτή είναι και η καμπύλη που ακολουθεί το υλικό κατά την φόρτιση και αποφόρτισή του μετά την ελαστική περιοχή. Παρατηρείται από το Σχήμα 2-7, ότι μετά την αποφόρτιση αυτή, το όριο διαρροής κατά την επαναφόρτιση, Y', εμφανίζεται σε μεγαλύτερη τάση από την αρχική, σ_Y, φαινόμενο οφείλεται στην ενδοτράχυνση (strain hardening).

Η διαρροή θεωρείται αστοχία, σε πολλές μελέτες σχεδίασης, όταν η μόνιμη παραμόρφωση των κατασκευαστικών στοιχείων δεν είναι αποδεκτή. Γι' αυτό το λόγο, πολλές σχεδιάσεις πραγματοποιούνται στην ελαστική ή, οριακά, ελαστοπλαστική περιοχή (ως το όριο αντοχής, που θα αναφερθεί σε επόμενη παράγραφο). Μία τέτοια περίπτωση αποτελεί ο σχεδιασμός της ενισχυμένης κατασκευής της γάστρας του πλοίου, όταν μελετάται σε άθικτη κατάσταση. Ωστόσο, στην παρούσα διπλωματική εργασία, η οποία πραγματεύεται την μελέτη απόκρισης ενισχυμένων πλακών σε ακραίες φορτίσεις, ενδιαφέρει η πλήρης έκταση της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης των μεταλλικών υλικών, έως τη θραύση.



Σχήμα 2-6 : Μορφή καμπύλης τάσης παραμόρφωσης όλκιμου μεταλλικού υλικού



Σχήμα 2-7 : Φόρτιση και αποφόρτιση μετά το όριο διαρροής

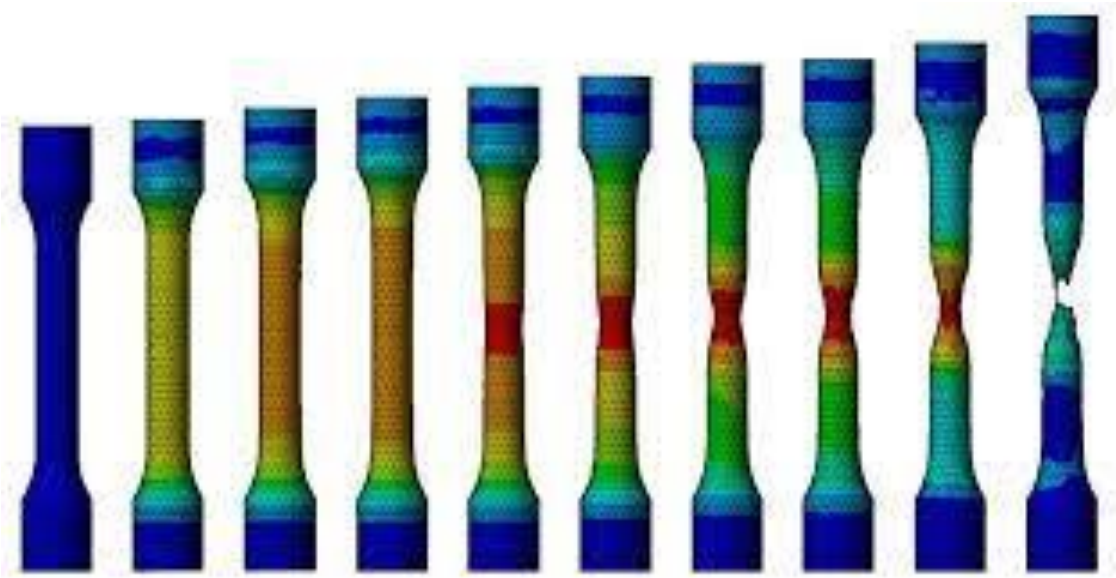
Μετά το σημείο διαρροής, το στοιχείο συνεχίζει να παραμορφώνεται ισόογκα και η διατομή του λεπταίνει καθ' όλο το μήκος του ομοιόμορφα («Distance between shoulders» στο Σχήμα 2-4). Η περιοχή αυτή του διαγράμματος ονομάζεται περιοχή κράτυνσης ή ελαστοπλαστική περιοχή (Y->U στο Σχήμα 2-6). Ο λόγος Poisson στην πλαστική περιοχή λαμβάνει την τιμή 0.5. Η συνθήκη ομοιόμορφης παραμόρφωσης που αφορά την περιοχή O->U γράφεται ως εξής:

$$V_0 = V => A_0 * l_0 = A * l \qquad \text{Εξ. 2-14}$$

Κάποια στιγμή, παρατηρείται ότι η δύναμη που καταγράφεται από το δυναμόμετρο, και επομένως η τάση που υπολογίζεται από την μηχανή, αρχίζει να μειώνεται συναρτήσει της παραμόρφωσης. Το σημείο, στο οποίο η τιμή της τάσης που υπολογίζεται μέσω της δύναμης γίνεται μέγιστη, καλείται «όριο αντοχής» του υλικού (σημείο U στο Σχήμα 2-6). Μετά από αυτό το σημείο η παραμόρφωση συγκεντρώνεται σε μία περιορισμένη ζώνη που καλείται «λαιμός», καθώς η διατομή λεπταίνει πλέον εντοπισμένα εκεί. Περισσότερη ανάλυση σχετικά με τους μηχανισμούς που οδηγούν στην δημιουργία τοπικής αστάθειας στο στοιχείο γίνεται στο τέλος του υποεδαφίου 2.2.3. Στην περιοχή αυτή παραμορφώσεων δεν ισχύει πλέον η συνθήκη ομοιόμορφης παραμόρφωσης. Η υπερβολική τοπική παραμόρφωση του δοκιμίου στο σημείο του λαιμού οδηγεί σε δημιουργία και συγκέντρωση κενών στη δομή του υλικού και τελικά αποχωρισμό του (σημείο F στο Σχήμα 2-6). Η μορφή των επιφανειών θραύσης έχει το χαρακτηριστικό σχήμα κυπέλου και κώνου («cup and cone»), σε κάθε αποχωριζόμενο τμήμα αντίστοιχα (Σχήμα 2-8).

Περισσότερα για τα χαρακτηριστικά και τους μηχανισμούς της όλκιμης θραύσης θα συζητηθούν στο εδάφιο 2.3. Στο *Σχήμα 2-9* απεικονίζεται η αλλαγή της εμφάνισης του δοκιμίου κατά την σταδιακή του επιμήκυνση, με την αρχική ομοιόμορφή εκλέπτυνση της διατομής του και την μετέπειτα συγκέντρωση των αυξημένων τάσεων και παραμορφώσεων στην περιοχή του λαιμού έως την τελική θραύση.

Σχήμα 2-8 : Χαρακτηριστική μορφή επιφανειών όλκιμης θραύσης cup and cone



Σχήμα 2-9 : Εμφάνιση δοκιμίου εφελκυσμού κατά τη σταδιακή επιμήκυνσή του

2.2.3 Πραγματική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης σε μονοαξονικό εφελκυσμό

Όπως αναφέρθηκε στο υποεδάφιο 2.2.1, η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης που παράγεται από το πείραμα εφελκυσμού ονομάζεται «πειραματική καμπύλη». Στην πραγματικότητα, οι εσωτερικές τάσεις συναρτήσει των παραμορφώσεων σε ένα σημείο εντός του δοκιμίου δεν δίνονται από αυτήν την καμπύλη. Αυτή η ανισότητα οφείλεται στον τρόπο παραγωγής της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης από την καμπύλη δύναμης-επιμήκυνσης κατά τη διεξαγωγή του πειράματος εφελκυσμού.

Η πραγματική τάση που αναπτύσσεται σε μία διατομή του δοκιμίου, κατά το μονοαξονικό εφελκυσμό, σύμφωνα με τον ορισμό της στο εδάφιο 2.1.1, υπολογίζεται ως ο λόγος της τιμής της δύναμης προς το εμβαδό διατομής τη στιγμή που καταγράφεται η εν λόγω τιμή της δύναμης. Κατά το πείραμα εφελκυσμού, δεν γίνεται συνεχής καταγραφή του εμβαδού διατομής του δοκιμίου, A, επομένως η τάση υπολογίζεται ως προς το αρχικό εμβαδό διατομής, A_0, που προφανώς είναι μεγαλύτερο από το A, αφού η διατομή λεπταίνει λόγω των δευτερευουσών πλευρικών παραμορφώσεων (βλ. Σχήμα 2-9). Ισχύει, γι' αυτόν τον λόγο ότι η πραγματική τιμή της τάσης που αναπτύσσεται για μία δεδομένη παραμόρφωση είναι μεγαλύτερη από αυτήν που αντιστοιχεί στην ίδια παραμόρφωση και βρίσκεται από την πειραματική καμπύλη (Εξ. 2-15).

$$A_0(\varepsilon) > A(\varepsilon) => \frac{1}{A_0}(\varepsilon) < \frac{1}{A}(\varepsilon)$$
$$=> \frac{F}{A_0}(\varepsilon) < \frac{F}{A}(\varepsilon) \;\; => \sigma_{eng}(\varepsilon) < \sigma_{true}(\varepsilon) \qquad \text{Εξ. 2-15}$$

Η πραγματική αξονική παραμόρφωση μίας διατομής του δοκιμίου, επίσης, δεν ισούται με την τιμή της παραμόρφωσης που υπολογίζεται από το πείραμα εφελκυσμού. Όπως αναφέρθηκε στο εδάφιο 2.2.1, η πειραματική παραμόρφωση υπολογίζεται ως ο λόγος της διαφοράς στο μήκος του επιμηκυνσιομέτρου, Δl, προς το αρχικό του μήκος, ενώ η πραγματική παραμόρφωση είναι το ολοκλήρωμα της στοιχειώδους μεταβολής του μήκους προς το εκάστοτε μήκος τη στιγμή της μέτρησης (2.1.1). Ισχύει, δηλαδή η σχέση Εξ. 2-16.

$$\varepsilon_{true} = \int_{l_0}^{l} \frac{dl}{l} = ln(l) - ln(l_0)$$
$$=> \varepsilon_{true} = ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \qquad \text{Εξ. 2-16}$$

Με χρήση της Εξ. 2-16 και του ορισμού της πειραματικής παραμόρφωσης μπορεί να βρεθεί η μεταξύ τους σχέση (Εξ. 2-17).

$$\varepsilon_{eng} = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1$$
$$=> \frac{l}{l_0} = \varepsilon_{eng} + 1 => ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = ln\,(\varepsilon_{eng} + 1) \qquad \text{Εξ. 2-17}$$
$$=> \varepsilon_{true} = ln\,(\varepsilon_{eng} + 1)$$

Κατά συνέπεια, η τιμή της πραγματικής παραμόρφωσης μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια της πειραματικής καμπύλης, με χρήση της Εξ. 2-17.

Επιχειρείται, επίσης, να συνδεθεί η πραγματική και πειραματική τιμή της τάσης με μία ευθεία σχέση. Εφόσον ισχύει η συνθήκη της ομοιόμορφης παραμόρφωσης, ισχύει και η παρακάτω σχέση για το εμβαδόν διατομής του δοκιμίου.

$$V_0 = V => A_0 * l_0 = A * l => A = A_0 * \frac{l_0}{l} \qquad \text{Εξ. 2-18}$$

Γράφοντας τον ορισμό της πραγματικής τάσης και ενσωματώνοντας τις Εξ. 2-17 και Εξ. 2-18, βρίσκεται η σύνδεση με τα πειραματικά αποτελέσματα (Εξ. 2-19).

$$\sigma_{true} = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0 * \frac{l_0}{l}} = \frac{F}{A_0} * \frac{l}{l_0}$$

$$=> \sigma_{true} = \sigma_{eng} * (\varepsilon_{eng} + 1) \qquad \text{Εξ. 2-19}$$

Επισημαίνεται και πάλι, ότι οι παραπάνω σχέσεις σύνδεσης των πραγματικών και πειραματικών τάσεων και παραμορφώσεων ισχύουν υπό την προϋπόθεση της ομοιόμορφης παραμόρφωσης του στοιχείου, η οποία, όπως παρατηρήθηκε στο εδάφιο 2.2.2, αφορά μόνο την περιοχή έως το όριο αντοχής του υλικού.

Τα πραγματικά μεγέθη τάσης και παραμόρφωσης στην ελαστοπλαστική περιοχή για πολλά μέταλλα, μεταξύ των οποίων και οι χάλυβες, συνδέονται μέσω της εκθετικής σχέσης Εξ. 2-20 (Power-law).

$$\sigma_{true} = K * \varepsilon_{true_plastic}^{n} \qquad \text{Εξ. 2-20}$$

Τα K και n είναι σταθερές που συσχετίζονται με το υλικό και καλούνται σταθερά ενδοτράχυνσης και συντελεστής ενδοτράχυνσης, αντίστοιχα. Μάλιστα, ο συντελεστής ενδοτράχυνσης ισούται με την τιμή της πραγματικής παραμόρφωσης στο όριο αντοχής. Ακολουθεί η απόδειξη αυτού του ισχυρισμού.

Όπως αναφέρθηκε, το όριο αντοχής είναι το ακρότατο της καμπύλης δύναμης-μετατόπισης του πειράματος εφελκυσμού. Συνεπώς, στιγμιαία, ισχύει η Εξ. 2-21.

$$dF = 0 => d(\sigma_{true} * A) = 0$$

$$=> d\sigma_{true} * A + \sigma_{true} * dA = 0 => \frac{d\sigma_{true}}{\sigma_{true}} = -\frac{dA}{A} \qquad \text{Εξ. 2-21}$$

Ακόμη, ισχύει, οριακά, η συνθήκη της ισόογκης και ομοιόμορφης μεταβολής, που γράφεται τώρα σύμφωνα με την Εξ. 2-22.

$$dV = 0 => d(A * l) = 0$$

$$=> dA * l + A * dl = 0 => \frac{dA}{A} = -\frac{dl}{l}$$ Εξ. 2-22

Η σύνθεση των εξισώσεων Εξ. 2-21, Εξ. 2-22 και Εξ. 2-16 αποκαλύπτει τη σχέση μεταξύ πραγματικής τάσης και παραμόρφωσης στο όριο αντοχής (Εξ. 2-23).

$$\frac{d\sigma_{true}}{\sigma_{true}} = \frac{dl}{l} => \frac{d\sigma_{true}}{\sigma_{true}} = d\varepsilon_{true}$$

$$=> \frac{d\sigma_{true}}{d\varepsilon_{true}} = \sigma_{true}$$ Εξ. 2-23

Η τιμή της πραγματικής παραμόρφωσης στο όριο αντοχής υπολογίζεται με τον συνδυασμό τω σχέσεων Εξ. 2-20 και Εξ. 2-23, ως εξής (Εξ. 2-24).

$$\frac{d\sigma_{true}}{d\varepsilon_{true}} = K * n * \varepsilon_{true}^{n-1} = \sigma_{true}$$

$$=> n * \frac{(K * \varepsilon_{true}^{n})}{\varepsilon_{true}} = \sigma_{true} => n * \frac{\sigma_{true}}{\varepsilon_{true}} = \sigma_{true}$$ Εξ. 2-24

$$=> \varepsilon_{true} = n$$

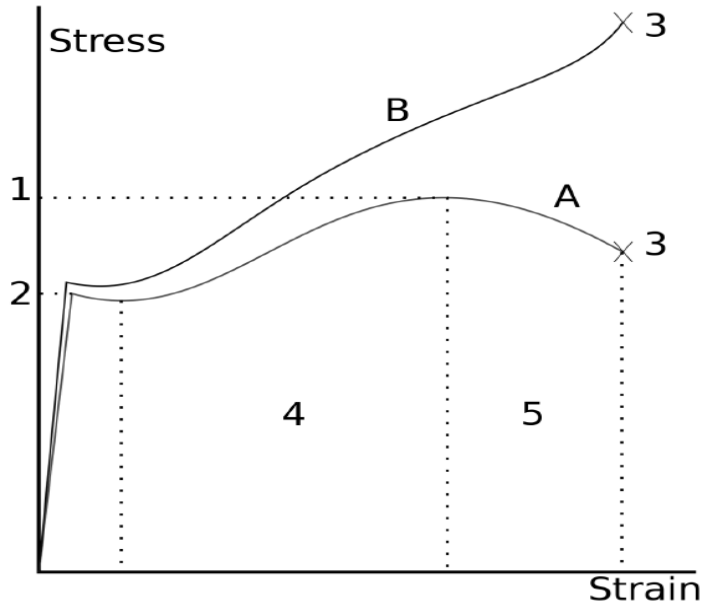
Στην περιοχή δημιουργίας λαιμού, οι παραμορφώσεις συγκεντρώνονται σε μία περιορισμένη ζώνη και η πραγματική παραμόρφωση δεν μπορεί να υπολογιστεί μόνο με τη βοήθεια των μετρήσεων του επιμηκυνσιομέτρου. Σε αυτήν την περιοχή ο συνολικός όγκος θα μπορούσε να γραφτεί σύμφωνα με την σχέση Εξ. 2-25.

$$V = V_{neck} + V_{uniform} = A_n * l_n + A * (l - l_n)$$ Εξ. 2-25

Όπως αποδεικνύεται, για τη σύνδεση της πραγματικής και πειραματικής τάσης και παραμόρφωσης, χρειάζονται περισσότερα δεδομένα για τη γεωμετρία του λαιμού κατά την διάρκεια της δοκιμής, τα οποία δεν καταγράφονται σε μία συνήθη δοκιμή εφελκυσμού [13]. Σε κάθε περίπτωση, η πραγματική τάση στην περιοχή δημιουργίας λαιμού είναι μεγαλύτερη από την πειραματική, όπως προκύπτει από την διαίρεση της τιμής της δύναμης με μικρότερη τιμή εμβαδού.

Αποδεικνύεται, ότι η πραγματική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του υλικού είναι μία αύξουσα καμπύλη (Καμπύλη Β στο Σχήμα 2-10) σε όλο το εύρος των παραμορφώσεων ως τη θραύση, σε αντίθεση με την πειραματική καμπύλη που αποκτά

αρνητική κλήση μετά το όριο αντοχής. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο φαινόμενο της ενδοτράχυνσης, δηλαδή της αύξησης της τάσης που μπορεί να παραλάβει το υλικό με την αύξηση της φόρτισης. Η αύξηση της παραμόρφωσης συντελεί στην πύκνωση των γραμμοαταξιών (είδους ατελειών) στο κρυσταλλικό πλέγμα του υλικού, με αποτέλεσμα να παρεμποδίζεται η κίνηση και συνένωση άλλων διαταραχών και το υλικό να σκληρύνεται.



Σχήμα 2-10 : Πειραματική (A) και πραγματική (B) καμπύλη μονοαξονικού εφελκυσμού

Κατέχοντας αυτό, μπορεί να αιτιολογηθεί η αλλαγή της κλήσης της πειραματικής καμπύλης μετά το όριο αντοχής. Διευκρινίστηκε, ότι ασκώντας μία δύναμη στο άκρο του δοκιμίου εφελκυσμού, η πραγματική τάση που αναπτύσσεται σε κάθε διατομή είναι μεγαλύτερη της πειραματικής, που υπολογίζεται ως προϊόν της δοκιμής, εξαιτίας της μείωσης του εμβαδού διατομής που προκαλεί η πλευρική συστολή. Καθ' όλη την πορεία του πειράματος, τα δύο φαινόμενα – ενδοτράχυνση και πλευρική συστολή – λειτουργούν ανταγωνιστικά. Στην ελαστοπλαστική περιοχή, υπερέχει η επίδραση της ενδοτράχυνσης, που αυξάνει την αντίσταση του υλικού στην περαιτέρω παραμόρφωσή του. Το μέγιστο σημείο της πειραματικής καμπύλης ονομάζεται όριο αντοχής, γιατί, με στοιχειώδη αύξηση του φορτίου, η πραγματική τάση που αναπτύσσεται τοπικά στις διατομές γίνεται μεγαλύτερη από αυτήν που μπορεί να αντέξει το υλικό, χάρη στην ενδοτράχυνση. Η φόρτιση του στοιχείου με δύναμη που αντιστοιχεί σε πειραματική τάση μεγαλύτερη του ορίου αντοχής οδηγεί στην τοπική κατάρρευσή του («λαιμός») και τελικά στη θραύση του.

Ο μηχανισμός της όλκιμης θραύσης αναλύεται διεξοδικότερα στο επόμενο εδάφιο.

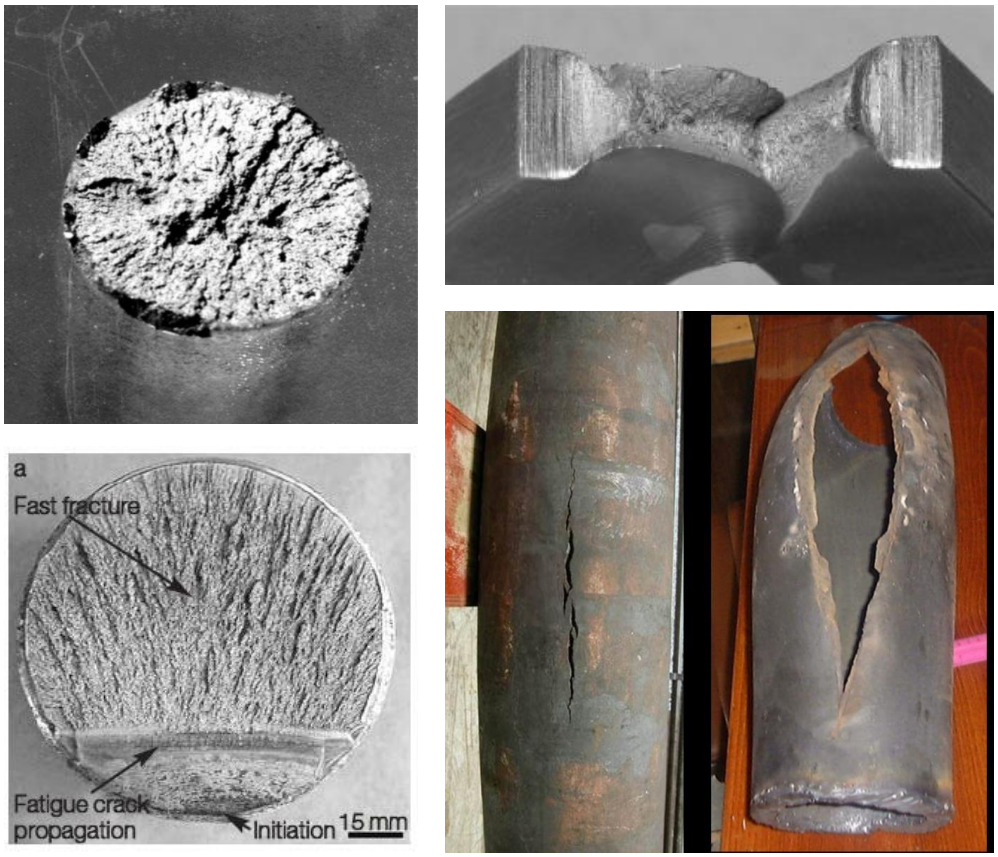
2.3 Θραυστομηχανική

2.3.1 Εισαγωγή – Θεωρίες Μηχανικής των Θραύσεων

Η θραύση αντιπροσωπεύει την έσχατη αστοχία του υλικού, κατά την οποία αποχωρίζονται ατομικοί δεσμοί και επίπεδα με αποτέλεσμα τη ρήξη της συνέχειάς του. Η ανεπιθύμητη ασυνέχεια στο υλικό, που δεν προϋπήρχε στην αρχική γεωμετρία του στοιχείου και προκλήθηκε από θραύση, ονομάζεται ρωγμή. Η επιστήμη της Μηχανικής των Θραύσεων ασχολείται με τις συνθήκες έναρξης και διάδοσης ρηγματώσεων και τη συμπεριφορά υλικών και κατασκευών υπό θραύση και βασίζεται στην ανάλυση της εντατικής κατάστασης στην αιχμή μίας ρωγμής.

Η φύση της θραύσης εξαρτάται από τη σύσταση και την κρυστάλλωση του υλικού, το είδος της επιβαλλόμενης τάσης, τη γεωμετρία της κατασκευής, τη θερμοκρασία και το ρυθμό μεταβολής της εντατικής κατάστασης. Διακρίνονται τρία βασικά είδη φόρτισης σε αναλογία με τον τύπο της θραύσης που προκαλούν:

- στατική φόρτιση, που συσχετίζεται με ψαθυρή ή όλκιμη θραύση,
- δυναμική φόρτιση, που μπορεί να οδηγήσει σε θραύση από κόπωση, και
- φόρτιση με ταυτόχρονη έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες που μπορεί να προκαλέσει ρωγμές λόγω ερπυσμού.



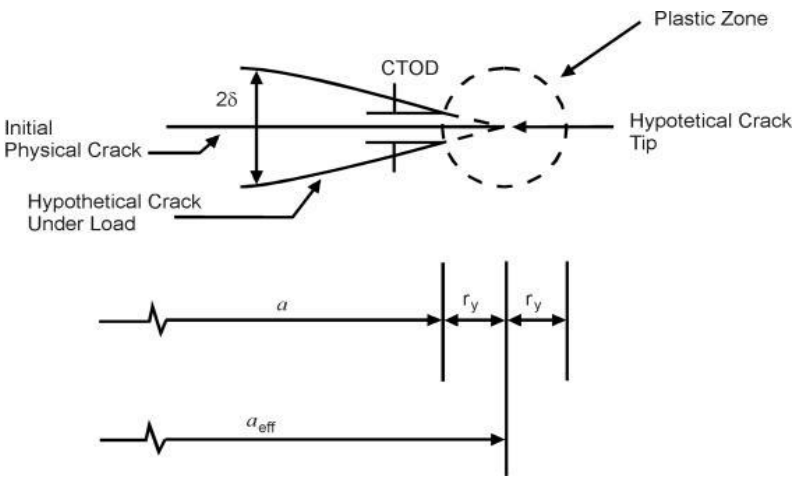
Σχήμα 2-11 : Χαρακτηριστικές επιφάνειες θραύσης α) ψαθυρή θραύση, β) όλκιμη θραύση, γ) θραύση από κόπωση, δ) θραύση από ερπυσμό

Χαρακτηριστικές όψεις επιφανειών θραύσης για κάθε ένα από τα παραπάνω είδη φόρτισης φαίνονται στο Σχήμα 2-11. Η παρούσα μελέτη ασχολείται με ακραίες φορτίσεις που αναπτύσσονται σε θαλάσσια ατυχήματα, επομένως ενδιαφέρει ο μηχανισμός της θραύσης υπό στατικό φορτίο.

Δύο είναι οι βασικές θεωρίες της Μηχανικής των Θραύσεων που επιχειρούν να περιγράψουν την έναρξη και διάδοση μίας ρωγμής.

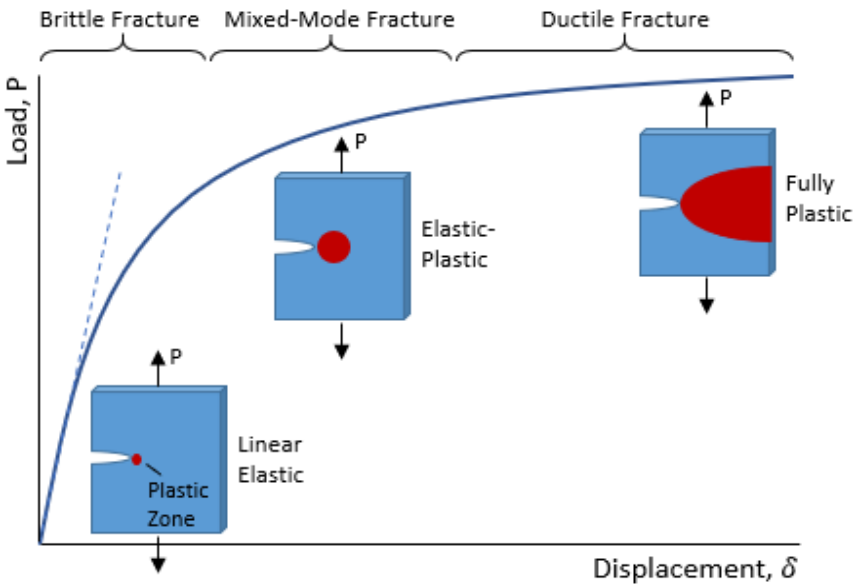
Στη Γραμμική Ελαστική Θεωρία της Μηχανικής των Θραύσεων (Linear Elastic Fracture Mechanics) γίνεται η υπόθεση ότι μία και μόνο παράμετρος, ο συντελεστής έντασης τάσης, KI, μπορεί να περιγράψει το πεδίο που αναπτύσσεται στο άκρο της ρωγμής, συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου που καταπονεί την κατασκευή και του μήκους της. Το κριτήριο διάδοσης της ρωγμής παίρνει την μορφή σύγκρισης του συντελεστή έντασης τάσης στο άκρο της ρωγμής με τον Κρίσιμο Συντελεστή Έντασης Τάσης, που αποτελεί ιδιότητα του υλικού και προσδιορίζεται με κατάλληλη μηχανική δοκιμή (ASTM E 399). Προϋπόθεση για την ισχύ της Γραμμικής Ελαστικής Θεωρίας είναι η επικράτηση συνθηκών επίπεδης παραμόρφωσης στο άκρο της ρωγμής (plain strain condition) που συνεπάγεται αμελητέα έκταση της πλαστικής ζώνης, σε σύγκριση με τις υπόλοιπες διαστάσεις του στοιχείου. Η συνθήκη μικρής πλαστικής παραμόρφωσης και μεγάλου πάχους κατασκευαστικού στοιχείου παραπέμπουν σε σχεδιασμό κατά της ψαθυρής θραύσης.

Η Ελαστοπλαστική Θεωρία της Μηχανικής των Θραύσεων (Elastic-Plastic Fracture Mechanics) βρίσκει εφαρμογή σε περιπτώσεις όπου η έκταση της πλαστικής ζώνης γύρω από το άκρο της ρωγμής είναι σημαντική και δεν πληρούνται οι προϋποθέσεις της Γραμμικής-Ελαστικής Θεωρίας. Καθώς η έκταση της πλαστικής ζώνης δεν μπορεί να αμεληθεί, λαμβάνεται υπόψη ένα ενεργό μήκος ρωγμής (effective crack length), μεγαλύτερο από το πραγματικό και εισάγεται το μέγεθος του ανοίγματος στο άκρο της ρωγμής (Crack Tip Opening Displacement, Σχήμα 2-12), που χρησιμεύει ως ένα μέτρο της δυσθραυστότητας και προσδιορίζεται από κατάλληλη δοκιμή. Η Ελαστοπλαστική Θεωρία της Μηχανικής των Θραύσεων, με τις τεχνικές CTOD και J-ολοκληρώματος εφαρμόζεται ευρέως σε όλκιμα υλικά.



Σχήμα 2-12 : Άνοιγμα στο άκρο της ρωγμής (CTOD)

Στο Σχήμα 2-13 σκιαγραφείται η διαφορά των εφαρμογών της Γραμμικής-Ελαστικής και της Ελαστοπλαστικής Θεωρίας.



Σχήμα 2-13 : Σύγκριση πλαστικής ζώνης στο άκρο της ρωγμής κατά την Γραμμική-Ελαστική και την Ελαστοπλαστική Θεωρίας

2.3.2 Είδη θραύσης υπό στατικό φορτίο

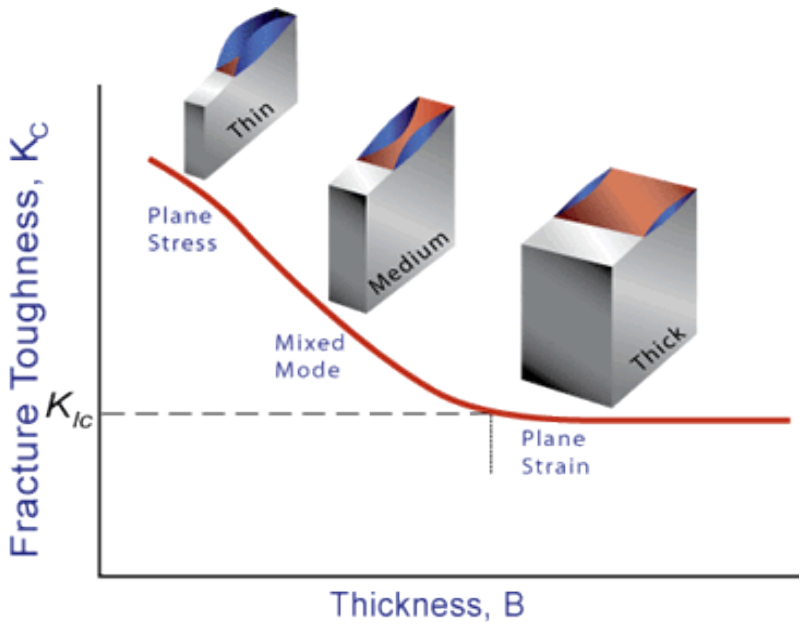
Η εμφάνιση όλκιμης ή ψαθυρής θραύσης εξαρτάται πρωτίστως από τη μικροδομή του υλικού.

Υλικά που κρυσταλλώνονται στο εδροκεντρωμένο κρυσταλλογραφικό σύστημα (FCC), όπως το αλουμίνιο και ο ωστενιτικός ανοξείδωτος χάλυβας, θραύονται μόνο όλκιμα. Αυτό οφείλεται στον μεγάλο αριθμό επιπέδων μέγιστης πυκνότητας ατόμων που χαρακτηρίζει τη δομή FCC και διευκολύνει την ολίσθηση μεταξύ τους, που συνεπάγεται την πλαστική παραμόρφωση του στοιχείου, όπως αναφέρθηκε στο υποεδάφιο 2.1.3.

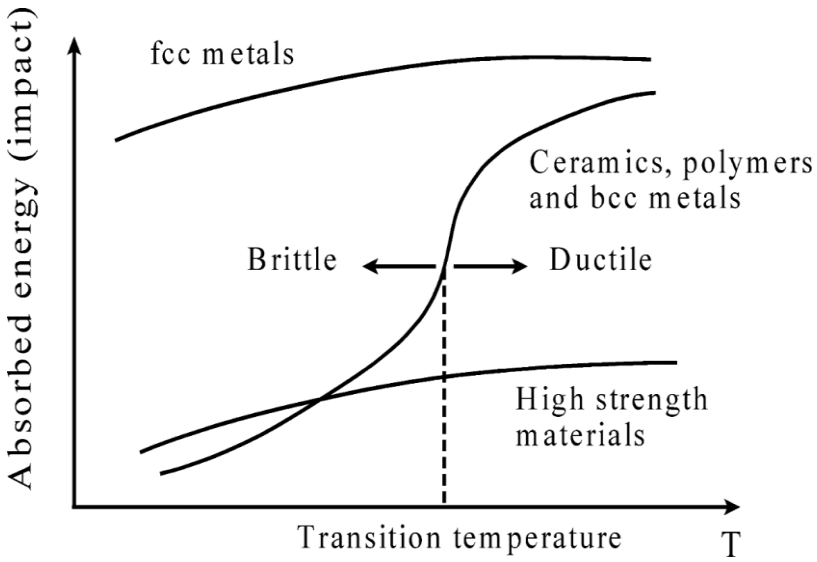
Υλικά που κρυσταλλώνονται στο χωροκεντρωμένο κρυσταλλογραφικό σύστημα (BCC), όπως ο απλός ναυπηγικός χάλυβας, θραύονται είτε όλκιμα είτε ψαθυρά. Η ψαθυρή θραύση πραγματοποιείται με τον αποχωρισμό κατά μήκος των κρυσταλλογραφικών επιπέδων, εξαιτίας απλής θραύσης ατομικών δεσμών υπό ορθές εφελκυστικές τάσεις. Η εμφάνιση ψαθυρής ή όλκιμης θραύσης σε ένα κατασκευαστικό στοιχείο, από υλικό που δομείται κατά BCC, εξαρτάται, επιπροσθέτως, από το πάχος του, τον ρυθμό αλλαγής της εντατικής του κατάστασης και τη θερμοκρασία.

Η αύξηση του πάχους του κατασκευαστικού στοιχείου ευνοεί την επικράτηση συνθηκών επίπεδης παραμόρφωσης στο άκρο της ρωγμής, τη μείωση του μεγέθους της πλαστικής ζώνης και συνεπώς την πτώση της δυσθραυστότητας και την εμφάνιση ψαθυρής συμπεριφοράς στη θραύση (Σχήμα 2-14). Η αύξηση του ρυθμού παραμόρφωσης του στοιχείου, δεν αφήνει το απαραίτητο περιθώριο για την ολίσθηση των κρυσταλλογραφικών επιπέδων, που συντελείται στην όλκιμη θραύση, με αποτέλεσμα

να μειωθεί η πιθανότητα εμφάνισής της. Σε χαμηλές θερμοκρασίες, κάποια από τα δυνατά συστήματα ολίσθησης αδρανοποιούνται, με συνέπεια να δυσχεραίνεται η πλαστική παραμόρφωση και να αυξάνεται η ψαθυρότητα του υλικού. Τα μέταλλα που κρυσταλλώνονται σε σύστημα BCC μεταπίπτουν, μάλιστα, σε μία θερμοκρασιακή περιοχή, από την ολκιμότητα στην ψαθυρότητα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-15. Η θερμοκρασία που αντιστοιχεί στο σημείο καμπής της καμπύλης δυσθραυστότητας ονομάζεται Θερμοκρασία Μετάβασης από την Όλκιμη στην Ψαθυρή Περιοχή (Ductile to Brittle Transition Temperature).



Σχήμα 2-14 : Εξάρτηση δυσθραυστότητας από το πάχος του κατασκευαστικού στοιχείου



Σχήμα 2-15 : Εξάρτηση δυσθραυστότητας από τη θερμοκρασία

2.3.3 Ο μηχανισμός της όλκιμης θραύσης

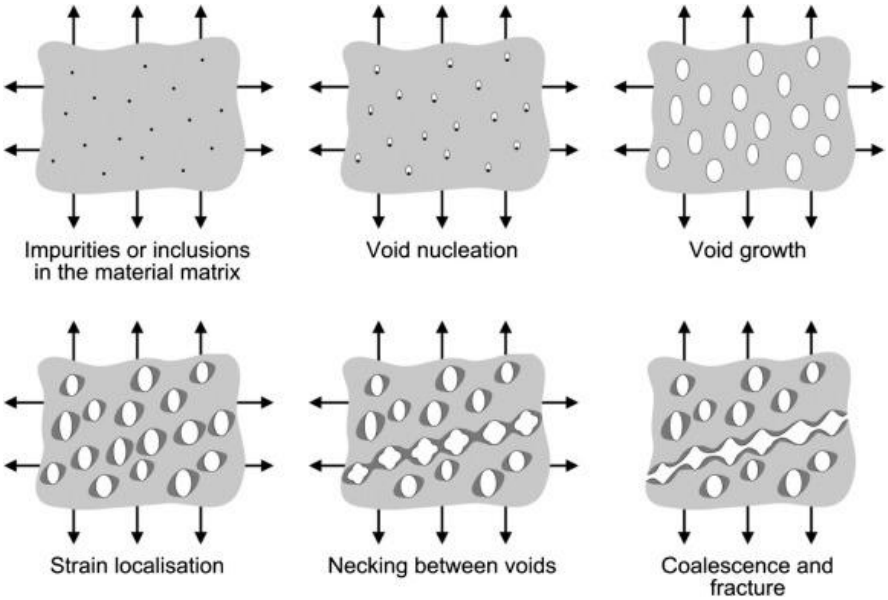
Στην παρούσα μελέτη, διερευνάται η συμπεριφορά σε ακραίες φορτίσεις ναυπηγικών ενισχυμένων ελασμάτων, τα οποία χαρακτηρίζονται από μικρό λόγο μήκους προς πάχος και σε θερμοκρασίες πάνω από την περιοχή μετάβασης. Ενδιαφέρει, λοιπόν, ιδιαιτέρως ο μηχανισμός της όλκιμης θραύσης, καθώς οι συνθήκες που περιγράφηκαν είναι αναγκαίες για την υπερίσχυσή της έναντι της ψαθυρής.

Ο μηχανισμός της όλκιμης θραύσης ξεκινά σε μία αδύναμη περιοχή του κατασκευαστικού στοιχείου στην οποία σταδιακά δημιουργείται ο λαιμός. Η ευαισθησία της περιοχής αυτής συνίσταται σε κάποια τοπική διακύμανση της επιφάνειας διατομής ή σε μεγαλύτερο μίκρο- ή μάκροδιαφορισμό στο υλικό. Όταν η τάση είναι μικρότερη του ορίου αντοχής, ο ρυθμός μείωσης της επιφάνειας διατομής μειώνεται σε εκείνο το σημείο, χάρη στο φαινόμενο της ενδοτράχυνσης, επομένως επέρχεται ισορροπία και η ομοιομορφία της κατανομής παραμόρφωσης αποκαθίσταται. Αφότου, όμως, ολόκληρη η γεωμετρία παραλάβει το μέγιστο δυνατό φορτίο, το φαινόμενο της ενδοτράχυνσης δεν μπορεί πλέον να αντισταθμίσει την επιφόρτιση των αδύναμων ζωνών με μεγαλύτερη τάση και, συνεπώς, η πιο ευαίσθητη από αυτές καταρρέει συγκεντρώνοντας την επιπλέον παραμόρφωση. Μετά τη δημιουργία της τοπικής αστάθειας, το υπόλοιπο στοιχείο αποφορτίζεται ελαστικά, διατηρώντας μόνο την μόνιμη πλαστική παραμόρφωση του ορίου αντοχής και η περαιτέρω παραμόρφωση επιβαρύνει μόνο την περιοχή αστάθειας. Η ελαστική χαλάρωση τάσεων που επέρχεται στο υπόλοιπο στοιχείο μετά το όριο αντοχής διακρίνεται στο Σχήμα 2-9.

Η όλκιμη θραύση εξελίσσεται με την πυρήνωση, ανάπτυξη και συνένωση μικροκενών εντός του υλικού. Τα κενά αυτά δημιουργούνται συνήθως με την θραύση ή αποκόλληση δευτερογενών φάσεων και εγκλεισμάτων που δεν μπορούν να παρακολουθήσουν την πλαστική παραμόρφωση της μεταλλικής μήτρας. Στον χάλυβα, τα εγκλείσματα αποτελούν οξείδια και σουλφίδια, τα οποία δεν έχουν απομακρυνθεί κατά την χύτευση, και δευτερογενείς φάσεις μπορεί να είναι καρβίδια, νιτρίδια και ενδομεταλλικές ενώσεις, που περιέχονται στην χημική σύνθεση για να προσδώσουν τις επιθυμητές ιδιότητες στο υλικό. Η ικανότητα της διεπιφάνειας μεταξύ μήτρας-εγκλείσματος να παραλάβει την συγκέντρωση τάσης, που δημιουργείται εξαιτίας της τοπικής ασυνέχειας παραμόρφωσης, επηρεάζει σημαντικά την παραμόρφωση στην οποία ενεργοποιείται ο μηχανισμός.

Οι οπές εντός του μεταλλικού πλέγματος μεγαλώνουν υπό την επίδραση της αυξανόμενης πραγματικής τάσης και συγκεντρωνόμενης παραμόρφωσης. Η ενεργή διατομή του στοιχείου - που παραλαμβάνει το φορτίο - απαρτίζεται από τα τοιχώματα υλικού μεταξύ των οπών. Τα τοιχώματα αυτά καταρρέουν, τελικά, μέσω μηχανισμών δημιουργίας λαιμού ή ζωνών διάτμησης (στα επίπεδα μέγιστων διατμητικών τάσεων) στη μεταξύ τους περιοχή. Η συνένωση των μικροκενών σχηματίζει εσωτερική ρωγμή η οποία οδηγεί προοδευτικά στη θραύση. Η ρωγμή αυτή, στην περίπτωση του μονοαξονικού εφελκυσμού, συνήθως ξεκινά από το κέντρο της διατομής, όπου η υδροστατική τάση είναι μεγαλύτερη και διαδίδεται προς τα άκρα (περισσότερα γι’ αυτό στο επόμενο υποεδάφιο). Όταν η ρωγμή φτάσει στο κρίσιμο μήκος, το εναπομείναν υλικό θραύεται

επί των επιπέδων μέγιστης διατμητικής τάσης, τα οποία σχηματίζουν γωνία 45 μοιρών με τη διεύθυνση της κύριας τάσης.

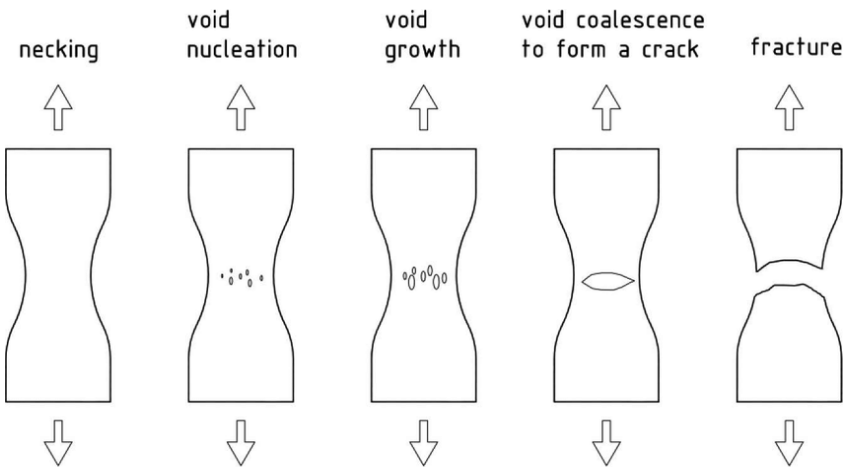


Σχήμα 2-16 : Μηχανισμός πυρήνωσης και ανάπτυξης μικροκενών

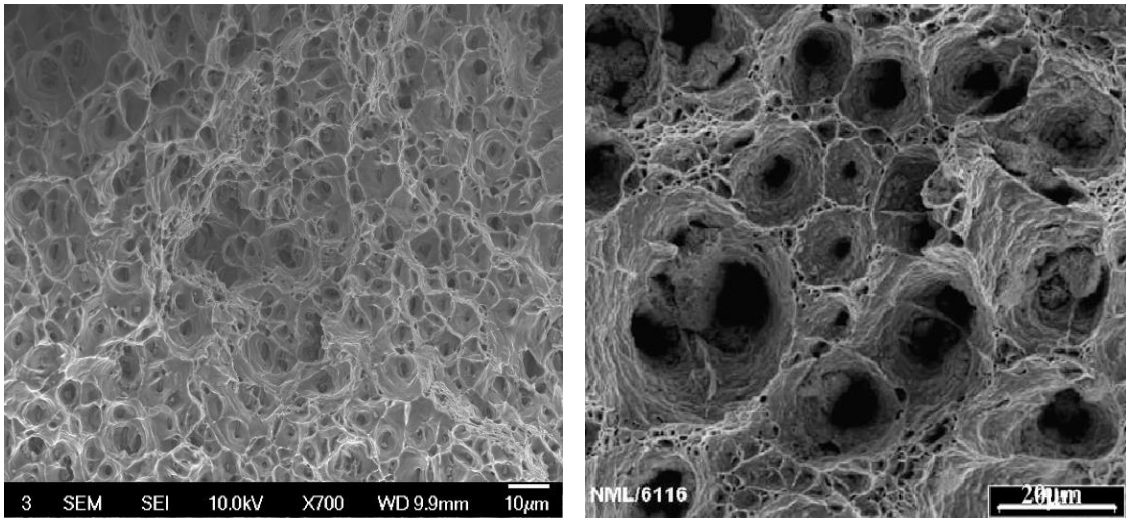
Αξιοσημείωτη είναι, επίσης, η σύνδεση μεταξύ της ισχύος των δεσμών μήτρας και δευτερογενών φάσεων και του εύρους της περιοχής δημιουργίας λαιμού. Σε υλικά όπου οι δεσμοί μεταξύ μήτρας και φάσης είναι ισχυροί, η διαδικασία πυρήνωσης και συνένωσης μικροκενών διαδραματίζεται ταχύτατα και η περιοχή μεταξύ ορίου αντοχής και θραύσης είναι μικρή. Αντιθέτως, σε υλικά στα οποία οι δεσμοί μεταξύ των ατόμων είναι ασθενέστεροι, τα σωματίδια που αποκολλώνται είναι πιο ογκώδη και έχουν μεγαλύτερες αποστάσεις μέσα στο πλέγμα. Έτσι, η πλαστική παραμόρφωση που μεσολαβεί μεταξύ ορίου αντοχής και θραύσης είναι μεγαλύτερη [14]. Ο μηχανισμός πυρήνωσης και ανάπτυξης μικροκενών παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 2-16 και η μακροσκοπική εξέλιξη της ρωγμής κατά τον μονοαξονικό εφελκυσμό φαίνεται στο Σχήμα 2-17.

Η επιφάνεια όλκιμης θραύσης έχει χαρακτηριστική μορφή, παρουσιάζοντας κοιλότητες σε μικροσκοπική κλίμακα, μέσα στις οποίες περιέχονταν τα σωματίδια γύρω από τα οποία πυρηνώθηκαν οι μικροοπές (Σχήμα 2-18). Οι κοιλότητες είναι ισοαξονικές όταν η φόρτιση είναι μονοαξονική και επιμήκεις όταν υπερισχύουν οι διατμητικές τάσεις, όπως για παράδειγμα κοντά στα άκρα της διατομής του δοκιμίου εφελκυσμού. Οι θύλακες σκεδάζουν το φως, δίνοντας μακροσκοπικά θαμπή και ινώδη μορφή στην επιφάνεια θραύσης (Σχήμα 2-8).

Η όλκιμη θραύση ανήκει, στη γενική περίπτωση, στην ευρύτερη κατηγορία των ενδοκρυσταλλικών θραύσεων, δηλαδή όταν η ρωγμή διαδίδεται δια μέσου του κόκκου του υλικού. Ωστόσο, όταν τα εγκλείσματα και οι δευτερογενείς φάσεις εντοπίζονται στα όρια των κόκκων του κρυσταλλικού πλέγματος, η θραύση μπορεί να διαδοθεί περικρυσταλλικά.



Σχήμα 2-17 : Μακροσκοπική εξέλιξη της ρωγμής υπό εφελκυστικό φορτίου

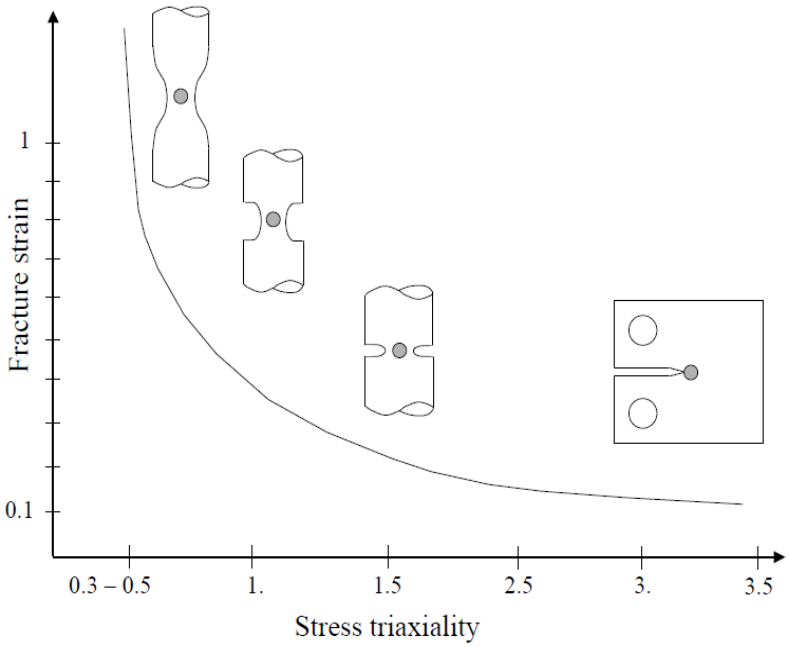


Σχήμα 2-18 : Χαρακτηριστική μορφή όλκιμης θραύσης στο μικροσκόπιο

2.3.4 Η επίδραση της τριαξονικότητας στην παραμόρφωση θραύσης

Σε αυτό το σημείο, πρέπει να τονιστεί η σημασία της επίδρασης της τριαξονικότητας των τάσεων (όπως αυτή ορίστηκε στο Κεφάλαιο 2.1.1) στην παραμόρφωση η οποία προκαλεί θραύση του κατασκευαστικού στοιχείου. Η εξάρτηση αυτή εξηγείται από την επιρροή του μεγέθους της υδροστατικής συνιστώσας των τάσεων στο ρυθμό μεγέθυνσης των μικροκενών, που σχηματίζονται συνήθως μετά την υπέρβαση του ορίου αντοχής του υλικού. Συμπεραίνεται, πως κατά την φόρτιση ενός στοιχείου, η συμπεριφορά του μπορεί να περιγραφεί με βάση την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης σε μονοαξονικό εφελκυσμό μόνο έως την παραμόρφωση στην οποία γίνεται η πυρήνωση των μικροκενών, ενώ η έκταση της περιοχής «δημιουργίας λαιμού» (U->F στο Σχήμα 2 6) έχει ισχυρή συσχέτιση με τη διεύθυνση των αναπτυσσόμενων τάσεων.

Οι Pardoen και Delannoy [15] χρησιμοποίησαν την εξής μέθοδο για τον προσεγγιστικό εντοπισμό της παραμόρφωσης στην οποία δημιουργούνται τα πρώτα κενά στην μικροδομή του υλικού. Παραμόρφωσαν δοκίμια στην πλαστική περιοχή, έως διάφορες τιμές επιμήκυνσης, και έπειτα τα επεξεργάστηκαν θερμικά, ώστε να επανακτήσουν την αντοχή τους. Κατόπιν, τα παραμόρφωσαν και πάλι έως ότου επέλθει θραύση. Η βασική ιδέα πίσω από αυτή τη διαδικασία ήταν ότι η αρχική επιμήκυνση των δοκιμίων δεν πρέπει να επηρεάσει την παραμόρφωση θραύσης, με εξαίρεση την περίπτωση που έχει προκαλέσει τη δημιουργία των μη αναστρέψιμων μικροκενών. Η μέθοδος, όμως, δεν βρίσκει εφαρμογή σε όλα τα υλικά.

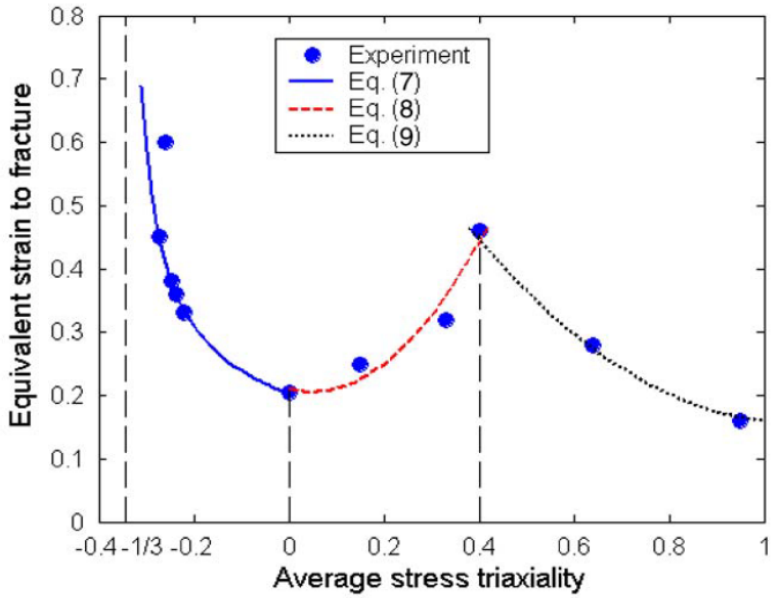


Σχήμα 2-19 : Σχέση τριαξονικότητας και παραμόρφωσης θραύσης για εφελκυστικές φορτίσεις

Η εκτέλεση πειραμάτων κατά τα οποία η τιμή της τριαξονικότητας παραμένει σχεδόν σταθερή, αποκαλύπτει το είδος της σχέσης της με την παραμόρφωση θραύσης. Στο Σχήμα 2-19 διαγράφεται η καμπύλη παραμόρφωσης θραύσης – τριαξονικότητας που έχει προκύψει από πειραματικές παρατηρήσεις για τιμές τριαξονικότητας μεγαλύτερες από εκείνες του μονοαξονικού εφελκυσμού (η=1/3). Σε αυτήν την περιοχή, η αύξηση της τριαξονικότητας συνεπάγεται την αύξηση της υδροστατικής τάσης, που επιταχύνει τη μεγέθυνση των μικροκενών, και μειώνει εκθετικά την παραμόρφωση θραύσης.

Στο Σχήμα 2-20 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα των Wierzbicki και Bao [16] οι οποίοι εκτέλεσαν δοκιμές σε όλο το εύρος τριαξονικότητας, από την μονοαξονική θλίψη έως τον διαξονικό εφελκυσμό, σε δοκίμιο με οπή από υλικό Al 2024-T351 και κατέγραψαν την παραμόρφωση θραύσης επιδιώκοντας να κατασκευάσουν μία εξίσωση που να προβλέπει την τιμή της συναρτήσει της τριαξονικότητας. Εμφανίζονται τρεις διακριτές περιοχές στο εύρος τριαξονικότητας που εξετάζεται από τους μελετητές :

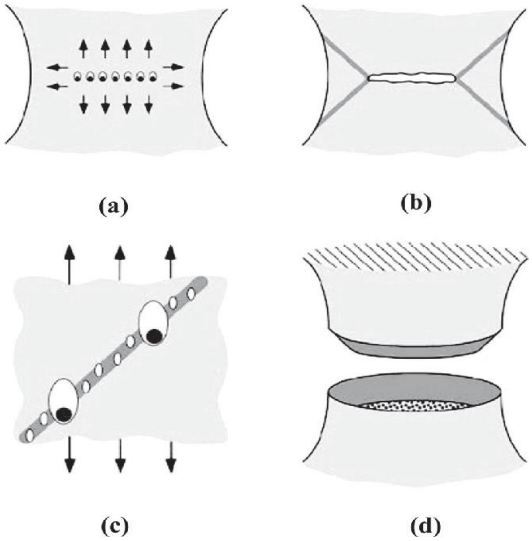
- Μία περιοχή εκθετικής μείωσης της παραμόρφωσης θραύσης με την αύξηση της τριαξονικότητας, για τριαξονικότητες μεγαλύτερες αυτής του μονοαξονικού εφελκυσμού, εξαιτίας της επίδρασης της υδροστατικής τάσης στην ανάπτυξη των μικροκενών
- Μία περιοχή εκθετικής μείωσης της παραμόρφωσης θραύσης με την μείωση της τριαξονικότητας, για τριαξονικότητες μεταξύ αυτής της καθαρής διάτμησης και του μονοαξονικού εφελκυσμού. Ο μηχανισμός της θραύσης διαφέρει σε αυτήν την περιοχή, όπου η υδροστατική πίεση είναι μειωμένη και η αστοχία συμβαίνει εξαιτίας της δημιουργίας ζωνών διάτμησης, έναντι της δημιουργίας λαιμού, μεταξύ των μικροκενών.
- Μία περιοχή εκθετικής αύξησης της παραμόρφωσης θραύσης με την μείωση της τριαξονικότητας για τιμές που αντιστοιχούν σε θλιπτικά φορτία. Ο μηχανισμός θραύσης είναι και σε αυτήν την περιοχή, όπως και στην γειτονική της, η δημιουργία ζωνών διάτμησης. Παρατηρείται ότι για τιμές τριαξονικότητας λίγο μεγαλύτερες του -1/3 η κλίση της καμπύλης αυξάνεται απότομα. Οι μελετητές σημειώνουν ότι η τιμή η=-1/3 αποτελεί τιμή αποκοπής. Επεξηγηματικά, σε εφαρμογές όπου η μέση τριαξονικότητα είναι μικρότερη από -1/3 δεν παρουσιάζεται θραύση του δοκιμίου.



Σχήμα 2-20 : Σχέση παραμόρφωσης θραύσης και τριαξονικότητας. Πειραματικά αποτελέσματα Wierzbicki και Bao για Al 2024-T351 [16]

Στη σχέση μεταξύ παραμόρφωσης θραύσης και τριαξονικότητας οφείλεται η μακροσκοπική μορφολογία των επιφανειών θραύσης του δοκιμίου εφελκυσμού (cup and cone, Σχήμα 2-8). Παρόλο που η ισοδύναμη παραμόρφωση είναι σταθερή σε όλη την επιφάνεια διατομής του δοκιμίου στη ζώνη δημιουργίας λαιμού, οι ακτινικές, περιφερειακές και αξονικές τάσεις διαφέρουν. Έτσι, η τιμή της τριαξονικότητας είναι ελάχιστη στην επιφάνεια (η=1/3) και μέγιστη στο κέντρο του δοκιμίου [17]. Η μεγάλη τιμή τριαξονικότητας στο μέσο της διατομής ευνοεί την αύξηση του όγκου των μικροκενών, έως ότου το υλικό μεταξύ τους να υποχωρήσει. Μετά τη ρήξη της συνέχειας

σε μία ικανή περιοχή κοντά στον άξονα του δοκιμίου, η εναπομείνουσα διατομή, στην οποία η τιμή της τριαξονικότητας είναι μικρότερη, θραύεται με τη δημιουργία ζωνών διάτμησης (Σχήμα 2-21).



Σχήμα 2-21 : Δύο μηχανισμοί θραύσης σε διαφορετικές περιοχές της διατομής εξαιτίας της επικράτησης διαφορετικών επιπέδων τριαξονικότητα

Κεφάλαιο 3ο

Μοντέλο Υλικού

Κεφάλαιο 3 : Μοντέλο Υλικού

Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, προσομοιάζονται τα πειράματα εγκάρσιας φόρτισης ενισχυμένων ελασμάτων έως τη θραύση, που εκτέλεσαν οι Alsos και Amdahl [7]. Το πρώτο βήμα αυτής της διαδικασίας είναι ο προσδιορισμός του μοντέλου των υλικών, από τα οποία κατασκευάστηκε το φυσικό μοντέλο, με τη μεθοδολογία που περιγράφεται στα πλαίσια αυτού του κεφαλαίου. Το μοντέλο του υλικού εισάγεται, αργότερα, στην κύρια προσομοίωση, που διεξάγεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Κεφάλαιο 4).

Σε μία αριθμητική προσομοίωση κατασκευής που υποβάλλεται σε ακραία φορτία, οι είσοδοι που απαιτούνται κατ' ελάχιστον για τον πλήρη καθορισμό της συμπεριφοράς ενός χρησιμοποιούμενου υλικού είναι: η πυκνότητά, η πραγματική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης και το κριτήριο θραύσης. Το μοντέλο του υλικού εξαρτάται, πέρα από την χημική σύσταση του υλικού, από τη σχέση του μεγέθους του πεπερασμένου στοιχείου με το πάχος που του εκχωρείται. Οι βασικές παράμετροι που σχετίζονται με τον ορισμό του μοντέλου του υλικού και είναι ενσωματωμένες στα περισσότερα λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων επεξηγούνται στο υποκεφάλαιο 3.1.

Η συνηθέστερη μεθοδολογία, που περιγράφεται στη βιβλιογραφία, περιλαμβάνει τη μοντελοποίηση της δοκιμής εφελκυσμού για το υλικό ενδιαφέροντος και κατόπιν την εφαρμογή αντίστροφης μηχανικής για την εύρεση της πραγματικής καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης, στις συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης. Η μέθοδος αυτή, θα αναλυθεί στην πορεία του υποκεφαλαίου 3.2. Αναφέρεται ο τρόπος εκμετάλλευσης της μεθόδου από τους ερευνητές της βιβλιογραφίας (3.2.1) και η χρήση της από τη συγγραφέα (3.2.2).

Στο υποκεφάλαιο 3.3, εξετάζεται το υπόβαθρο και ο τρόπος εφαρμογής μερικών από τα πιο εύχρηστα και δημοφιλέστερα κριτήρια θραύσης, που συναντώνται στην βιβλιογραφία (3.3.1) και αναφέρονται οι απόψεις των μελετητών πάνω σε αυτά (3.3.2). Αντίστοιχα με το προηγούμενο υποκεφάλαιο, ακολουθεί η παρουσίαση του κριτηρίου αστοχίας που υιοθετείται σε αυτήν την εργασία (3.3.4), εκ των διαθέσιμων από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται (3.3.3).

Αφού σκιαγραφηθεί η βασική μεθοδολογία προσέγγισης του προβλήματος, περιγράφεται, στο τελευταίο υποκεφάλαιο (3.4), η προσομοίωση του πειράματος εφελκυσμού (3.4.1) και παρατίθενται οι παράμετροι του μοντέλου των υλικών που συμμετέχουν στα πειράματα που μελετώνται στην παρούσα εργασία (3.4.2). Τέλος, σχολιάζονται ζητήματα που αφορούν την ψευδο-στατικότητα, τη σύγκλιση, την τριαξονικότητα και το υπολογιστικό κόστος (3.4.3).

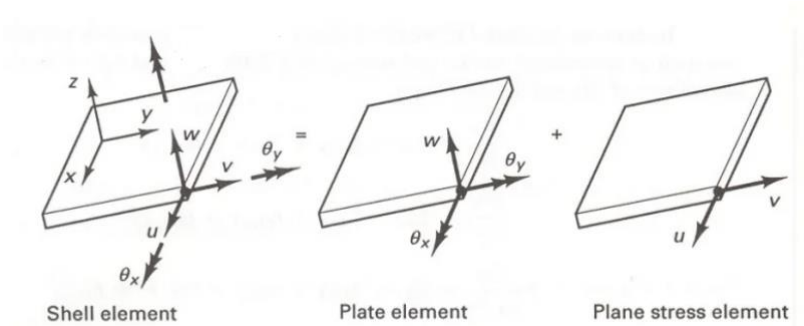
3.1 Παράμετροι μοντελοποίησης

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται, τόσο για την εύρεση του μοντέλου του υλικού όσο και για την προσομοίωση των πειραμάτων διείσδυσης των Alsos και Amdahl [7], είναι το ABAQUS CAE της Dassault Systèmes. Στο παρόν υποκεφάλαιο, θα επεξηγηθεί ο τρόπος με τον οποίο εισάγεται ένα υλικό στο πρόγραμμα αυτό, ο οποίος είναι κοινός και για άλλα προγράμματα μοντελοποίησης, όπως το λογισμικό LS-DYNA της Livermore Software Technology Corporation, που συναντάται ευρύτατα στη βιβλιογραφία. Σε πολλές μελέτες, η επέκταση των δυνατοτήτων και επιλογών του προγράμματος επιτυγχάνεται με την συγγραφή υπολογιστικού κώδικα, με δομή υπορουτίνας, που το συνοδεύει και αλληλοεπιδρά με αυτό. Καθώς, η μοντελοποίηση, στην παρούσα διπλωματική, έγινε αποκλειστικά με τα εργαλεία που είναι ενσωματωμένα στο περιβάλλον ABAQUS CAE και δεν συνεγράφη συμπληρωματικός κώδικας, είναι απαραίτητο τα εργαλεία αυτά να αναλυθούν διεξοδικά, καθώς αποτελούν το πλαίσιο δυνατοτήτων του χρήστη. Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο παρατίθενται τα πεδία που αφορούν την εισαγωγή του υλικού στο λογισμικό, ενώ στο εδάφιο 3.4.1 αναγράφονται οι υπόλοιπες ρυθμίσεις που γίνονται για την προσομοίωση του πειράματος εφελκυσμού.

<u>Τύπος πεπερασμένων στοιχείων</u>

Η μοντελοποίηση λεπτότοιχων κατασκευών, με μικρό λόγο πάχους προς τις άλλες δύο διαστάσεις, γίνεται συχνά με στοιχεία κελύφους. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό των στοιχείων κελύφους (shell elements) είναι ότι αποτελούν μία υπέρθεση των στοιχείων μεμβράνης (membrane elements) και των καμπτώμενων στοιχείων πλάκας (plate elements), γεγονός που σημαίνει ότι παραλαμβάνουν μεμβρανικές, καμπτικές και εγκάρσιες διατμητικές δυνάμεις. Τα στοιχεία μεμβράνης είναι στοιχεία επίπεδης τάσης τα οποία έχουν δύο βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο (μετατοπίσεις εντός επιπέδου). Τα στοιχεία πλάκας έχουν τρεις βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο (μετατόπιση εκτός επιπέδου και δυο στροφές εντός επιπέδου), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-1, και βασίζονται στη θεωρία κάμψης πλακών Kirchhoff. Σύμφωνα με την θεωρία Kirchhoff οι διατομές παραμένουν κάθετες κατά την κάμψη και οι διατμητικές παραμορφώσεις εκτός επιπέδου (γ_{xz}, γ_{yz}) αμελούνται. Τα στοιχεία κελύφους μπορεί να έχουν στρεπτική δυσκαμψία (drill stiffness) εντός επιπέδου ή όχι, ανάλογα με το λογισμικό, οπότε έχουν έξι ή πέντε βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο, αντίστοιχα. Στο ABAQUS οι βαθμοί ελευθερίας σε κάθε κόμβο, των στοιχείων κελύφους, είναι έξι [20].

Η κατανομή τάσης κάθετης στο επίπεδο του στοιχείου (σ_z Σχήμα 3-1), που αναπτύσσεται λόγω καμπτικού φορτίου ή κάθετης πίεσης, είναι αποτέλεσμα μετά-επεξεργασίας της λύσης από το λογισμικό και δεν συμβάλλει στη συνολική ενέργεια παραμόρφωσης του στοιχείου (ούτε στην ισοδύναμη τάση κατά Mises). Σημειώνεται, ότι εξαιτίας της ύπαρξης στρωμάτων (layers) κατά το πάχος του στοιχείου, οι τάσεις επί του επιπέδου (σ_1, σ_2, τ_{12}) έχουν κατανομή καθ' ύψος – θα εξηγηθεί αργότερα.



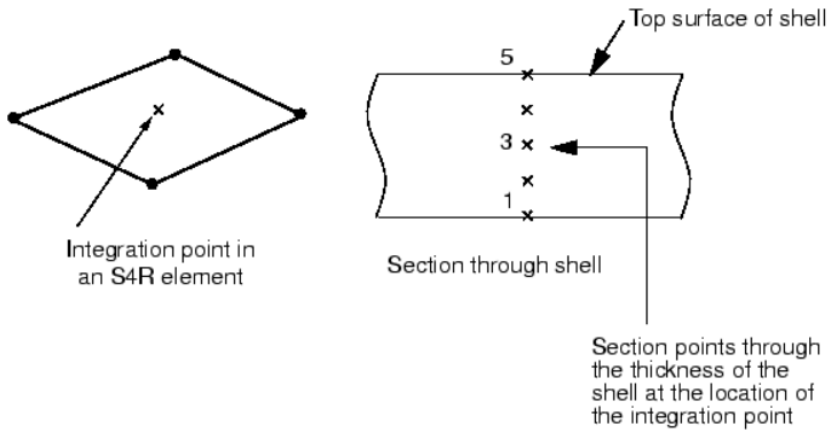
Σχήμα 3-1: Τα στοιχεία κελύφους είναι μία υπέρθεση στοιχείων πλάκας και στοιχείων μεμβράνης.

Επειδή οι γεωμετρίες που θα μοντελοποιηθούν είναι σχετικά απλές, η διακριτοποίηση μπορεί να γίνει εύκολα με τετράπλευρα στοιχεία (σε πιο σύνθετες γεωμετρίες, ίσως χρειαστεί συνδυασμός τετράπλευρων και τριγωνικών στοιχείων). Τα τετρακομβικά τετράπλευρα πεπερασμένα στοιχεία είναι επαρκή για τις συγκεκριμένες προσομοιώσεις (έναντι των όκτακομβικών στοιχείων, τα οποία επιτρέπουν κάμψη των πλευρών τους). Η επίλυση των εξισώσεων στατικής ισορροπίας απαιτεί τη γνώση του μητρώου ακαμψίας του πεπερασμένου στοιχείου, το οποίο υπολογίζεται με ολοκλήρωση Gauss. Η συγκεκριμένη μέθοδος παράγει αποτέλεσμα χωρίς σφάλμα, για τετράπλευρα τετρακομβικά στοιχεία, όταν χρησιμοποιηθούν, το ελάχιστο, τέσσερα σημεία ολοκλήρωσης ανά επίπεδο του στοιχείου (full integration). Παρόλα ταύτα, για τη μείωση του υπολογιστικού κόστους των προσομοιώσεων, συνήθως χρησιμοποιούνται στοιχεία μειωμένης ολοκλήρωσης (reduced integration), που λαμβάνουν ένα σημείο ολοκλήρωσης, στο κεντροειδές κάθε επιπέδου του στοιχείου (Σχήμα 3-2). Το τίμημα είναι ένα μικρό αλλά συχνά αποδεκτό σφάλμα στον υπολογισμό του μητρώου ακαμψίας και συνεπώς στην λύση των εξισώσεων στατικής ισορροπίας.

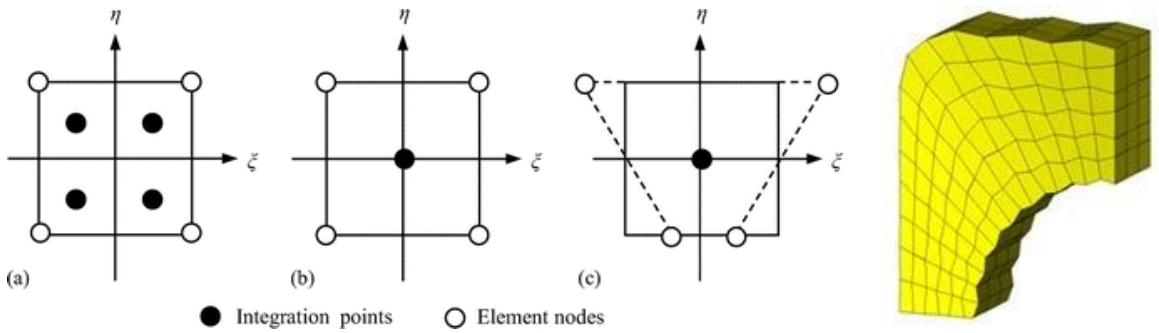
Τα στοιχεία μειωμένης ολοκλήρωσης είναι ευαίσθητα στο φαινόμενο κλεψύδρας («hourglassing»), δηλαδή τη μη ρεαλιστική επίπεδη παραμόρφωσή τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-3. Το στοιχείο δεν φέρει αντίσταση σε αυτήν την παραμόρφωση, καθώς το σημείο ολοκλήρωσης του δεν μετακινείται. Το φαινόμενο μπορεί να αποφευχθεί με την εισαγωγή τεχνητής στρεπτικής δυσκαμψίας από το λογισμικό («hourglass control»). Κατά το πάχος, που ανατίθεται στο στοιχείο κελύφους, ορίζονται πέντε επίπεδα ολοκλήρωσης (δηλαδή πέντε σημεία ολοκλήρωσης ανά στοιχείο, Σχήμα 3-2). Σε κάθε επίπεδο κατά το πάχος θεωρούνται συνθήκες επίπεδης τάσης.

Τα πεπερασμένα στοιχεία που έχουν τα χαρακτηριστικά που περιγράφηκαν παραπάνω είναι τύπου Belytschko-Lin-Tsay και έχουν κωδική ονομασία S4R: Shell elements, 4 nodes, Reduced Integration. Η ρύθμιση αυτή γίνεται μετά την κατασκευή του πλέγματος μέσω του Mesh Module, με την επιλογή Element Type. Οι περαιτέρω κινήσεις γράφονται στην Εξ. 3-1.

$$Element\ Library = Explicit, Geometric\ Order = Linear, Reduced\ Integration \qquad \text{Εξ. 3-1}$$



Σχήμα 3-2: Τετρακομβικό στοιχείο μειωμένης ολοκλήρωσης με πέντε επίπεδα κατά το πάχος (τύπου Belytschko-Lin-Tsay)



Σχήμα 3-3 : Όταν ένα στοιχείο κελύφους μειωμένης ολοκλήρωσης (b) υποστεί επίπεδη παραμόρφωση, το σημείο ολοκλήρωσης του δεν αλλάζει θέση (c) και συνεπώς δεν αντιστέκεται στην παραμόρφωση αυτή, σε αντίθεση με ένα στοιχείο πλήρους ολοκλήρωσης (a). Στη δεξιά εικόνα, φαίνεται το φαινόμενο κλεψύδρα στην μη ρεαλιστική αριθμητική λύση μίας προσομοίωσής πεπερασμένων στοιχείων.

<u>Καμπύλη μοντέλου υλικού</u>

Στο περιβάλλον ABAQUS CAE, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εισάγει τις ιδιότητες ενός υλικού από το Module «Property» και την εντολή «Create Material». Καθώς το υλικό θεωρείται ομογενές, καθορίζεται αρχικά η πυκνότητα μάζας του από την καρτέλα «General».

Κατόπιν, οφείλεται να οριστούν οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού, εφόσον αυτό θα υποβληθεί σε μηχανικά εξωτερικά φορτία, από την καρτέλα «Mechanical». Τα υλικά τα οποία συμμετέχουν στο πείραμα που πρόκειται να μοντελοποιηθεί, όπως και όλα τα μέταλλα που έχουν όλκιμη συμπεριφορά, διανύουν μία περιοχή ελαστικότητας και μία περιοχή πλαστικότητας, κατά την αύξηση του φορτίου που τους ασκείται, όπως περιγράφτηκε στο Κεφάλαιο 2. Κατάλληλες, μεταξύ άλλων, για την μοντελοποίηση υλικών με αυτήν την συμπεριφορά είναι οι επιλογές «Elasticity>Elastic» και «Plasticity>Plastic», μέσω των οποίων ορίζεται η καμπύλη του υλικού στην ελαστική και στην πλαστική περιοχή, αντίστοιχα. Στο πεδίο Elastic, για ισοτροπικό υλικό, δίνονται τιμές για το μέτρο ελαστικότητας και το λόγο Poisson, που, όπως αναφέρθηκε στο εδάφιο 2.1.2, είναι ένα ζεύγος ανεξάρτητων σταθερών που αρκούν για την περιγραφή της ελαστικής συμπεριφοράς τέτοιου υλικού. Το τέλος της ελαστικής περιοχής επέρχεται με

την αρχή της πλαστικότητας, που ξεκινά από το σημείο (πλαστική παραμόρφωση, τάση) που υπολογίζεται με βάση την Εξ. 3-2 και με τη βοήθεια της Εξ. 2-19.

$$\begin{aligned}\left(\varepsilon_{pl,y}, \sigma_{y,true}\right) &= \left(0, \sigma_{y,eng} * \left(\varepsilon_{eng,y} + 1\right)\right) \\ &= \left(0, \sigma_{y,eng} * \left(\frac{\sigma_{y,eng}}{E} + 1\right)\right)\end{aligned} \qquad \text{Εξ. 3-2}$$

Στο πεδίο Plastic, πάλι με την υπόθεση της ισοτροπικότητας, ζητείται να εισαχθεί η πραγματική καμπύλη τάσης - πλαστικής παραμόρφωσης του πειράματος εφελκυσμού στην πλαστική περιοχή, υπό την μορφή σημείων, με πρώτο αυτό της Εξ. 3-2. Το πρόγραμμα εκτελεί γραμμική παρεμβολή μεταξύ των τιμών της ανεξάρτητης μεταβλητής που έχει ορίσει ο χρήστης και θεωρεί σταθερή την τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής, εκτός των ορίων της ανεξάρτητης μεταβλητής.

Η πραγματική καμπύλη, έως το σημείο αστοχίας, που αφορά το πείραμα μονοαξονικού εφελκυσμού θεωρείται ότι προσομοιάζει ικανοποιητικά την συμπεριφορά του υλικού (καμπύλη ισοδύναμης τάσης – ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης) και σε καταστάσεις με τριαξονικότητα διαφορετική από αυτήν της συγκεκριμένης δοκιμής. Γενικότερα, η πραγματική καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης εξαρτάται αποκλειστικά από το υλικό και όχι από τη γεωμετρία του κατασκευαστικού στοιχείου.

Damage Initiation

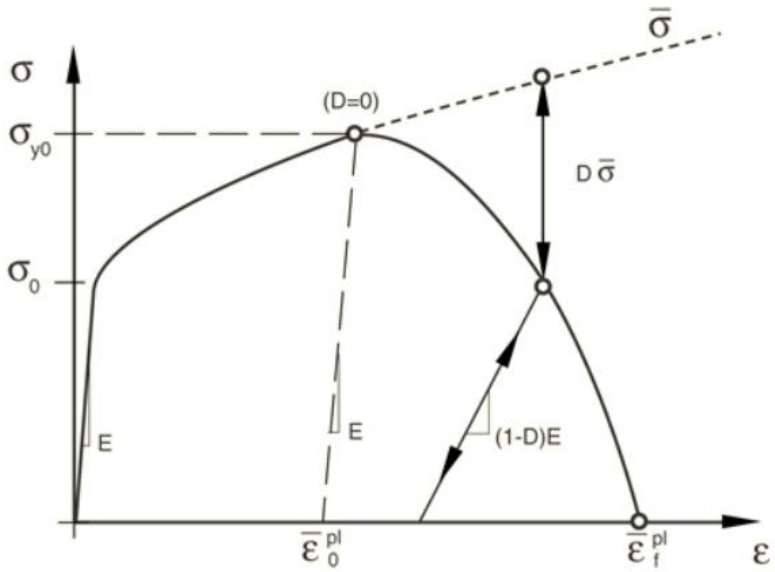
Ο καθορισμός του σημείου αστοχίας του υλικού γίνεται μέσω της ρύθμισης Mechanical>Damage for Ductile Metals, για μέταλλα τα οποία έχουν όλκιμη συμπεριφορά στη θραύση. Δίνεται στον χρήστη η επιλογή μεταξύ επτά, ενσωματωμένων στο πρόγραμμα, κριτηρίων, τα οποία θα αναλυθούν περαιτέρω στο εδάφιο 3.3.3. Η ρύθμιση αυτή προσομοιάζει, κατά μία έννοια, την εκκίνηση του μηχανισμού αστάθειας (Damage Initiation) στο υλικό και ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να την συνοδεύσει ή όχι με την εμφολευμένη εντολή Damage Evolution, με την οποία καθορίζεται η πορεία της καμπύλης υλικού, μετά την ενεργοποίηση του μηχανισμού αστοχίας.

Damage Evolution

Η ρύθμιση αυτή, για όλα τα διαθέσιμα κριτήρια, γίνεται είτε μέσω της τιμής της ενέργειας παραμόρφωσης (όπως αυτή ορίστηκε στο εδάφιο 2.1.3) που απορροφά το υλικό κατά τη διάρκεια εξέλιξης του μηχανισμού θραύσης, είτε μέσω της τιμής της επιπλέον επιμήκυνσης που συγκεντρώνεται, κατά την ίδια διαδικασία. Το Damage Evolution προσομοιάζει τη «χαλάρωση» της στιβαρότητας του υλικού, κατά τη φόρτισή, από την έναρξη της αστοχίας έως τη θραύση, με μία μεταβλητή που ονομάζεται Damage Degradation, D, και η οποία επιδρά στην καμπύλη με τον εξής τρόπο: μετά το Damage Initiation η πραγματική τάση του υλικού που αντιστοιχεί σε μία τιμή παραμόρφωσης είναι μειωμένη κατά ποσοστό D σε σύγκριση με την τιμή που έχει εισαχθεί στο πεδίο Plasticity

από τον χρήστη (Σχήμα 3-4). Δηλαδή, η πραγματική τάση μετά το Initiation δίνεται από τον τύπο της Εξ. 3-3.

$$\overline{\sigma_{true}}\left(\varepsilon_{true,pl} > \varepsilon_{initiation}\right) = \sigma_{true}(\varepsilon_{true,pl}) * (1 - D) \qquad \text{Εξ. 3-3}$$



Σχήμα 3-4 : Επίδραση Damage Evolution στην καμπύλη υλικού [20]

Ενώ όλοι οι ερευνητές συμφωνούν, σε μεγάλο βαθμό, για τη μεθοδολογία προσομοίωσης του υλικού στην περιοχή έως το όριο αντοχής, οι απόψεις διίστανται σε ότι αφορά την μοντελοποίηση της θραύσης. Τα σημεία εκκίνησης και τερματισμού του μηχανισμού της όλκιμης θραύσης ορίζονται διαφορετικά από τον καθένα και σκεπτικισμός εκφράζεται σε σχέση με την αναγκαιότητα της χρήσης της εντολής Damage Evolution. Κάποιες από τις επιλογές που διερεύνησε και τα συμπεράσματα που εξήγαγε κάθε μελετητής, σχετικά με την αποτελεσματικότητα των μεθόδων μοντελοποίησης, παρατίθενται στα εδάφια 3.2.1 και 3.3.2.

<u>Προσομοίωση ρωγμής</u>

Μετά την ολοκλήρωση του μηχανισμού της θραύσης, όπως έχει προσομοιωθεί στο πρόγραμμα, το επίπεδο/στρώση που αστοχεί χάνει την φέρουσα ικανότητα του. Θραύση επέρχεται, σε ολόκληρο το στοιχείο, μόνο όταν όλα τα επίπεδα κατά το πάχος αστοχήσουν. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να «αποσύρει» το στοιχείο, όταν η αντοχή του υποβιβαστεί σε κάποιο μη αποδεκτό βαθμό (Max Degradation>Specify). Για καλύτερη οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων, επιλέγεται συχνά από τον χρήστη η διαγραφή, από το πλέγμα, των πεπερασμένων στοιχείων που έχουν αστοχήσει εξ ολοκλήρου, κατά την προσέγγισή του. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης απεικονίζονται στο Visualization Module του προγράμματος, απ’ όπου φαίνεται και η διάδοση της ρωγμής, με την προοδευτική απώλεια στοιχείων από το πλέγμα.

3.2 Καμπύλη υλικού

Σε αυτό το υποκεφάλαιο, περιγράφεται η διαδικασία εύρεσης της πραγματικής καμπύλης υλικού προς εισαγωγή στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Η μεθοδολογία που συναντάται κατά κόρον στην βιβλιογραφία περιλαμβάνει την αριθμητική μοντελοποίηση του πειράματος εφελκυσμού.

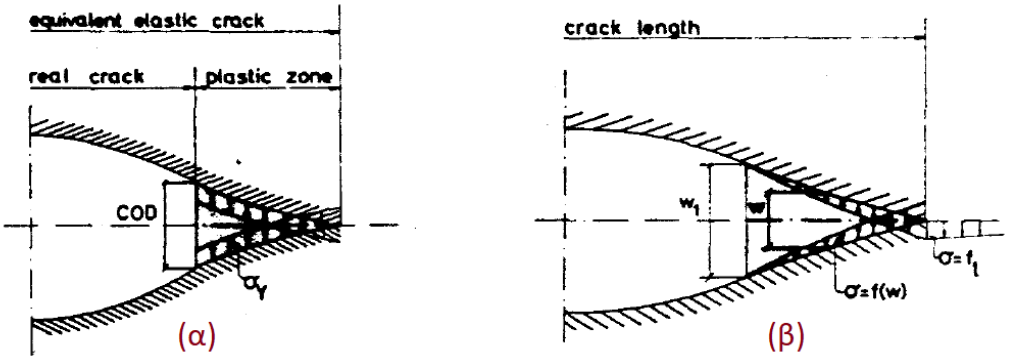
Διαδικασία αντίστροφης μηχανικής

Όπως και στην πραγματικότητα, το υλικό χαρακτηρίζεται από μία πραγματική καμπύλη τάσης παραμόρφωσης, η οποία, στα πλαίσια της μοντελοποίησης, εισάγεται στο πρόγραμμα, με τον τρόπου που αναλύθηκε στο υποκεφάλαιο 3.1. Το δοκίμιο υποβάλλεται σε αυξανόμενη επιμήκυνση έως τη θραύση του, ενώ το ένα άκρο του είναι πακτωμένο. Καταγράφεται το ιστορικό της δύναμης στο μη πακτωμένο άκρο και της επιμήκυνσης στα άκρα του υποτιθέμενου επιμηκυνσιομέτρου (gauge length). Η καμπύλη δύναμης-επιμήκυνσης μετατρέπεται σε καμπύλη πειραματικής τάσης – πειραματικής παραμόρφωσης, όπως περιγράφτηκε στο 2.2.1 και συγκρίνεται με την γνωστή πειραματική καμπύλη για το δεδομένο υλικό. Ο μελετητής καταλήγει στην πραγματική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης με ανάστροφη μηχανική, καθώς τροποποιεί την είσοδο κατάλληλα έως ότου το προϊόν του προσομοιωμένου πειράματος εφελκυσμού να ταυτιστεί, κατά το δυνατόν, με το προϊόν του πραγματικού πειράματος.

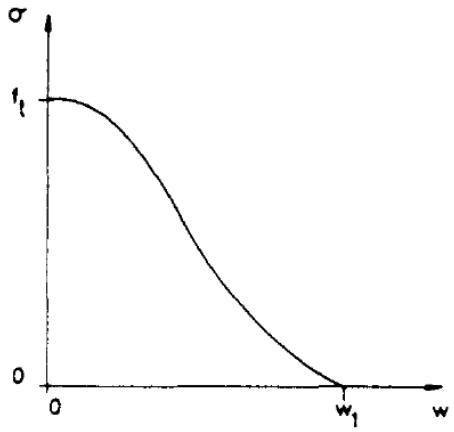
Damage Evolution

Στο λογισμικό ABAQUS, δίνεται η δυνατότητα μοντελοποίησης της «χαλάρωσης» της στιβαρότητας του υλικού, μετά την έναρξη της αστοχίας (Damage Initiation), με την ρύθμιση του πεδίου Damage Evolution, όπως εξηγήθηκε στο υποκεφάλαιο 3.1. Η λειτουργία του Damage Evolution, όπως ορίζεται από το εγχειρίδιο χρήσης του ABAQUS, βασίζεται στο θεωρητικό μοντέλο των Hillerborg et al. [19] το οποίο περιγράφει την έναρξη και διάδοση μίας ρωγμής διαμέσου του υλικού. Η Ελαστοπλαστική Θεωρία της Μηχανικής των Θραύσεων (2.3.1) ορίζει, ότι, γύρω από το άκρο της ρωγμής, υπάρχει μία πλήρως πλαστικοποιημένη ζώνη, στην οποία η τάση ισούται με το όριο διαρροής (Σχήμα 3-5α). Οι Hillerborg et al. προτείνουν, ότι η τάση κατά μήκος της ρωγμής εκφράζεται από μία κατανομή σ(w), με w το άνοιγμα της ρωγμής, η οποία λαμβάνει τιμές από μηδέν, για $w=w_1$, έως την τάση στο όριο αντοχής του υλικού, για w=0 (Σχήμα 3-5β, Σχήμα 3-6). Στην περιοχή $0<w<w_1$ η συνέχεια και φέρουσα ικανότητα του υλικού χάνεται προοδευτικά με την δημιουργία και επέκταση μικρορωγμών - μοντέλο που θυμίζει το μηχανισμό όλκιμης θραύσης (2.3.3). Το σημείο με άνοιγμα ρωγμής w_1 είναι το πραγματικό άκρο της ρωγμής. Σύμφωνα με τους ερευνητές, η τάση συναρτήσει του ανοίγματος της ρωγμής μπορεί να μοντελοποιηθεί με ορθογώνια, τραπεζοειδή ή τριγωνική κατανομή. Αναφέρουν ακόμη, ότι τα χαρακτηριστικά της κατανομής μπορούν να βρεθούν, εάν είναι γνωστό το ποσό της ενέργειας παραμόρφωσης που απορροφάται

με την έναρξη της ρωγμής σε ένα σημείο ή κατά την διάδοσή της μέσω αυτού, η οποία ισούται με το ολοκλήρωμα κάτω από την καμπύλη του Σχήμα 3-6.

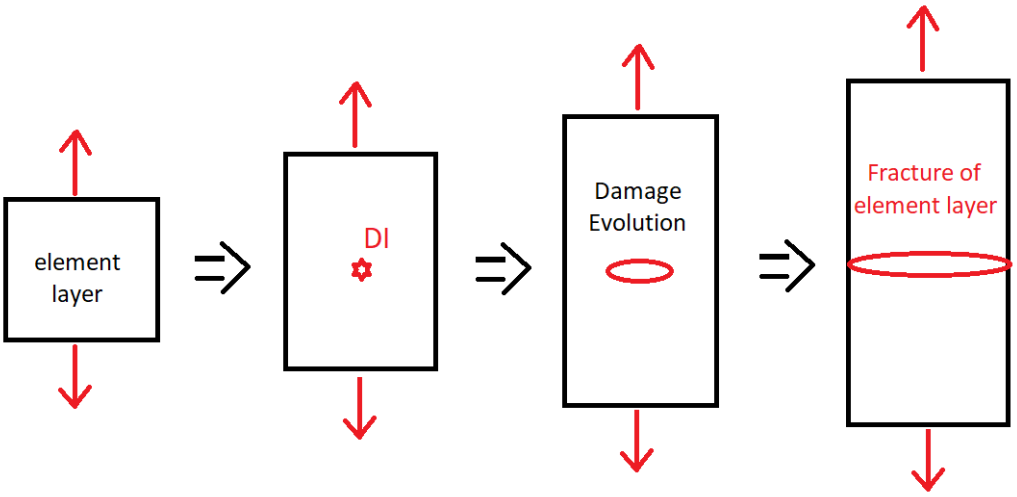


Σχήμα 3-5: Μοντέλο διάδοσης ρωγμής Ελαστοπλαστικής Θεωρίας (α) και θεωρίας Hillerborg et al. (β). [19]

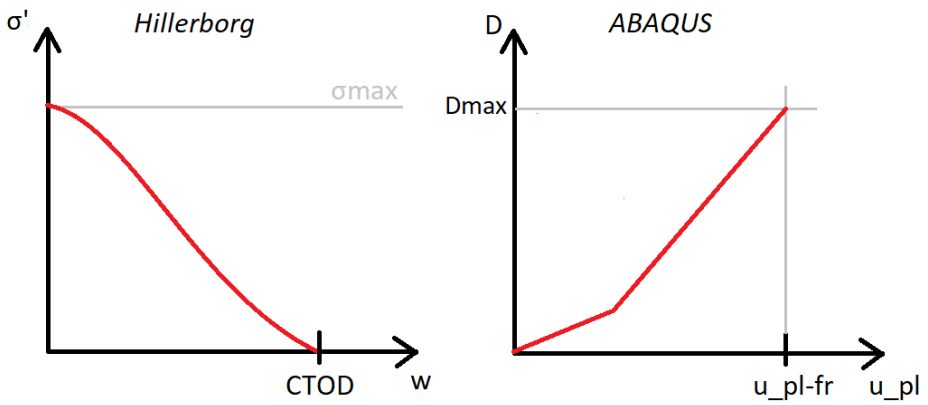


Σχήμα 3-6: Εξέλιξη τιμής της τάσης, με την αύξηση του ανοίγματος της ρωγμής [19]

Βάσει της ανάλυσης της προηγούμενης παραγράφου και όσων αναφέρθηκαν για την ρύθμιση του Damage Evolution στο κεφάλαιο 3.1, ήδη διαφαίνεται ο τρόπος με τον οποίον οι αρχιτέκτονες του λογισμικού χρησιμοποίησαν το μοντέλο διάδοσης ρωγμής των Hillerborg et al.. Το Damage Evolution, στην ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία, προσομοιάζει την απώλεια φέρουσας ικανότητας του στοιχείου εξαιτίας της εξέλιξης της θραύσης διαμέσου αυτού. Καθότι το Damage Evolution υπολογίζεται ανεξάρτητα σε κάθε επίπεδο κατά το πάχος, η ρωγμή διαδίδεται στο επίπεδο της επιφάνειας του στοιχείου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-7. Το ABAQUS εισάγει την παράμετρο D που συσχετίζει την πραγματική τάση με και χωρίς την απώλεια στιβαρότητας (Εξ. 3-3). Η ρύθμιση μπορεί να γίνει μέσω της ενέργειας παραμόρφωσης, όπως ακριβώς πρότειναν οι Hillerborg et al., ή μέσω της ισοδύναμης πλαστικής μετατόπισης θραύσης, η οποία είναι ουσιαστικά η μεταβολή του μήκους του στοιχείου μεταξύ της στιγμής του Damage Initiation (DI) και της τελικής θραύσης. Σε αντιστοιχία με το θεωρητικό υπόβαθρο από τους Hillerborg et al., η πλαστική μετατόπιση θραύσης (D=1) είναι αυτή που επιφέρει μήκος ρωγμής ίσο με το πλάτος του πεπερασμένου στοιχείου (Σχήμα 3-7, Σχήμα 3-8).



Σχήμα 3-7: Μοντέλο διάδοσης ρωγμής κατά μήκους ενός επιπέδου του πεπερασμένου στοιχείου κελύφους με την ρύθμιση Damage Evolution.



Σχήμα 3-8: Αντιστοιχία παραμέτρου απώλειας στιβαρότητας, Damage Degradation, του ABAQUS με το μοντέλο έναρξης/διάδοσης ρωγμής των Hillerborg et. al.

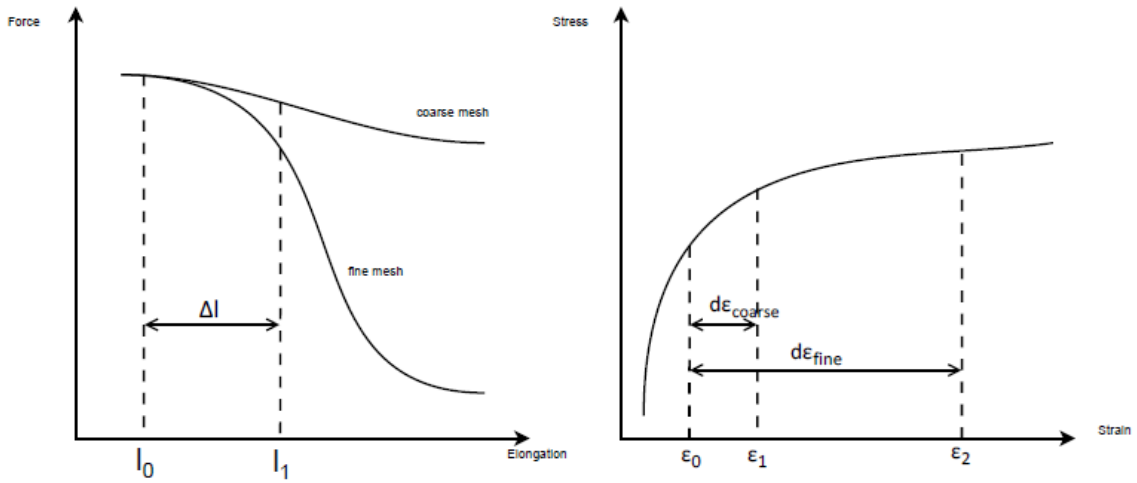
<u>Επίδραση μεγέθους πεπερασμένου στοιχείου</u>

Έως το όριο αντοχής, η καμπύλη που αφορά στο μοντέλο του υλικού (ισοδύναμη τάση – ισοδύναμη παραμόρφωση που εισάγεται στο πρόγραμμα) εξαρτάται αποκλειστικά από το υλικό αυτό καθαυτό. Ωστόσο, μετά την υπέρβαση του μέγιστου φορτίου που μπορεί να παραλάβει το δοκίμιο, η σωστή πραγματική καμπύλη του μοντέλου επηρεάζεται, επιπλέον, από το εκάστοτε μέγεθος του πεπερασμένου στοιχείου που χρησιμοποιείται, γεγονός που οφείλεται στο φαινόμενο δημιουργίας λαιμού. Υπενθυμίζεται, ότι η παραμόρφωση σχετίζεται με την αλλαγή των διαστάσεων του πεπερασμένου στοιχείου ως προς τις αρχικές. Όσο μειώνεται το μέγεθος του πεπερασμένου στοιχείου, τόσο αυξάνεται η παραμόρφωση στην οποία αντιστοιχεί μία επιμήκυνση των πλευρών του. Το μέγεθος του πεπερασμένου στοιχείου αντιπροσωπεύεται από ένα υπολογιστικό μέγεθος που ονομάζεται «χαρακτηριστικό μήκος στοιχείου» (characteristic element length) και για τα στοιχεία κελύφους ισούται με την τετραγωνική ρίζα του εμβαδού τους (Εξ. 3-4). Συχνά, ενδιαφέρει ο λόγος του χαρακτηριστικού μήκους με το πάχος που έχει αποδοθεί στο στοιχείο κελύφους.

$$le = \sqrt{face\ area\ of\ shell\ element} \qquad \text{Εξ. 3-4}$$

Έως το όριο αντοχής, η παραμόρφωση είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη σε όλα τα στοιχεία του πλέγματος, ενώ, μετά την ενεργοποίηση του μηχανισμού όλκιμης θραύσης, συγκεντρώνεται στη ζώνη του λαιμού. Όταν το πλέγμα είναι πυκνό και τα πεπερασμένα στοιχεία μικρά, αυτά τα οποία θα βρεθούν στην περιοχή που θα σχηματιστεί ο λαιμός θα παραμορφωθούν περισσότερο από ότι τα αντίστοιχα μεγαλύτερα στοιχεία ενός πιο αραιού πλέγματος (Σχήμα 3-9). Κάποια πεπερασμένα στοιχεία ενός πυκνού πλέγματος θα βρεθούν αποκλειστικά μέσα στην περιοχή του λαιμού και γι' αυτό το λόγο χρειάζεται να είναι ισχυρότερα σε σχέση με τα γειτονικά τους. Επειδή, συνήθως, δεν είναι δυνατή η πρόβλεψη του σημείου δημιουργίας λαιμού, το μοντέλο υλικού του συνόλου των μικρότερων πεπερασμένων στοιχείων ισχυροποιείται σε σχέση με αυτό που αφορά στο ίδιο υλικό αλλά σε μεγαλύτερο μέγεθος στοιχείου.

Το μέγεθος του στοιχείου επηρεάζει, επιπροσθέτως, την αποτελεσματικότητα της σύλληψης των συγκεντρώσεων τάσης και παραμόρφωσης στο κατασκευαστικό στοιχείο, με τα μικρότερα στοιχεία να επιδεικνύουν βελτιωμένη συμπεριφορά. Το τελευταίο, όμως, πρόβλημα μπορεί να αποφευχθεί μόνο με την πύκνωση του πλέγματος και όχι με κάποια τροποποίηση της τιμής των παραμέτρων που συνθέτουν το μοντέλο του υλικού.



Σχήμα 3-9 : Επίδραση μεγέθους πεπερασμένου στοιχείου στο ύψος της παραμόρφωσης που υφίσταται αυτό, για μία τιμή επιμήκυνσης των πλευρών του [14]

3.2.1 Βιβλιογραφικές μέθοδοι εύρεσης της καμπύλης υλικού

Στην ελαστική περιοχή η πραγματική καμπύλη υλικού είναι μία ευθεία που ξεκινά από την αρχή των αξόνων και καταλήγει στο σημείο διαρροής. Συνεπώς, το μέτρο ελαστικότητας είναι αρκετό για τον προσδιορισμό της δεν τίθεται περαιτέρω συζήτηση για τον τρόπο εισαγωγής της στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, από τους ερευνητές.

Στην πλαστική περιοχή, πολλοί ερευνητές θεωρούν ότι ισχύει η εκθετική σχέση (power-law, Εξ. 2-20) μεταξύ πραγματικής τάσης και πραγματικής πλαστικής παραμόρφωσης. Υπό αυτήν την προϋπόθεση, μόνο δύο σταθερές, οι K και n, είναι απαραίτητες, για την εύρεση της εξίσωσης που χαρακτηρίζει την περιοχή αυτή. Στους μελετητές που χρησιμοποιούν το λογισμικό LS-DYNA, παρέχεται το πεδίο επιλογής «Power Law Plasticity», κατά τον ορισμό των ιδιοτήτων του υλικού, το οποίο αφορά την συμπεριφορά του σε ολόκληρο το εύρος παραμορφώσεων από την ελαστική περιοχή έως τη θραύση. Στο πεδίο αυτό, εισάγονται, πέρα από τις σταθερές της ελαστικής περιοχής, το όριο διαρροής, οι σταθερές της εκθετικής σχέσης και η πλαστική παραμόρφωση θραύσης. Επομένως, η πραγματική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης υπολογίζεται αυτόματα από το LS-DYNA, σε αντίθεση με το πρόγραμμα ABAQUS, που, όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή του Κεφαλαίου, η καμπύλη στην πλαστική περιοχή εισάγεται χειροκίνητα υπό την μορφή σημείων παρεμβολής. Η επιλογή του «Power Law Plasticity» διευκολύνει μεν το χρήστη, μειώνει δε την δυνατότητα τροποποίησης της καμπύλης, κατά βούληση. Οι ερευνητές που επιλέγουν το πεδίο αυτό μπορούν να επέμβουν μόνο στις τιμές K και n, ώστε το αποτέλεσμά τους να έχει την μικρότερη δυνατή απόκλιση από την γνωστή πειραματική καμπύλη. Τη μέθοδο αυτή ακολουθούν οι Ehlers et al. [6] και οι Alsos και Amdahl [8], οι οποίοι θεωρούν ότι η σχέση power-law ισχύει από το όριο διαρροής έως τη θραύση.

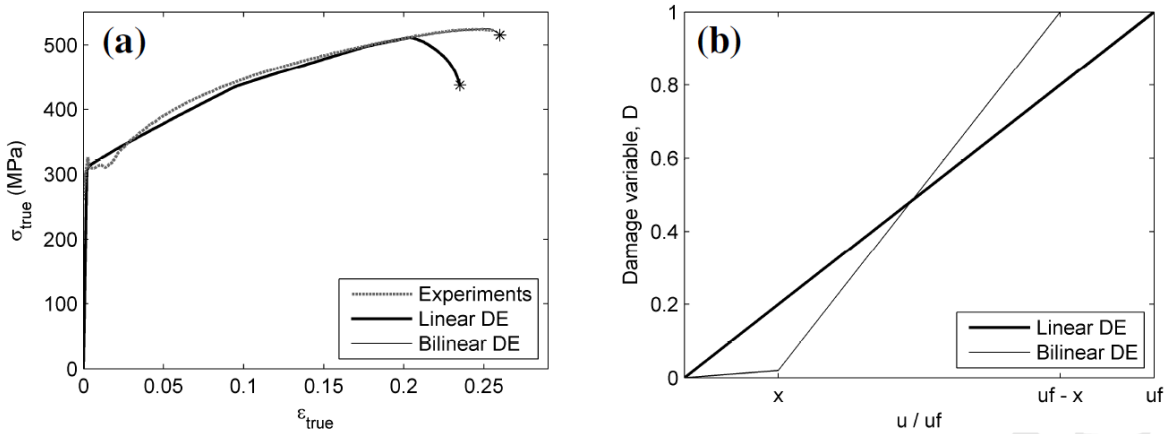
Οι Hogström και Ringsberg [3] μελετούν αριθμητικά στο πρόγραμμα ABAQUS CAE/Explicit ένα πείραμα που εκτέλεσαν οι Karlsson et al. [21], στο οποίο ένας βολβός συγκρούεται με μία μεταλλική κατασκευή που προσομοιάζει πλευρικό τοίχωμα πλοίου. Οι ερευνητές εκτέλεσαν οι ίδιοι πειράματα εφελκυσμού για τα υλικά που συμμετείχαν στο πείραμα των Karlsson et al. και παρήγαγαν ένα σμήνος καμπυλών πειραματικής τάσης-παραμόρφωσης για κάθε υλικό. Κατέληξαν, έπειτα, σε τρεις καμπύλες για το κάθε υλικό: αυτήν που αντιπροσωπεύει τη μέση τιμή των αποτελεσμάτων και τις δύο καμπύλες που απέχουν δύο τυπικές αποκλίσεις από τη μέση ($\pm 2\sigma$). Σκοπό είχαν, να μελετήσουν την ευαισθησία του αποτελέσματος στην καμπύλη υλικού. Θεωρούν, ότι η εκθετική σχέση είναι αντιπροσωπευτική τουλάχιστον μέχρι το σημείο δημιουργίας λαιμού και ακολουθούν την διαδικασία αντίστροφης μηχανικής για τον προσδιορισμό των κατάλληλων παραμέτρων.

Η ερευνητική δουλειά των Hogström και Ringsberg είναι η μοναδική, από αυτές που συμπεριλαμβάνονται στην βιβλιογραφία, η οποία εξετάζει την πιθανότητα χρήσης του πεδίου Damage Evolution. Η εκκίνηση του μηχανισμού αυτού γίνεται στο σημείο Damage Initiation το οποίο εντοπίζουν μέσω διενέργειας δοκιμών εφελκυσμού, για τα υλικά που τους ενδιαφέρουν (καταγραφή πειραματικής παραμόρφωσης στην οποία αρχίζει να σχηματίζεται η αστάθεια) [22]. Επιλέγουν να ελέγξουν την εξέλιξη του φαινομένου μέσω της ισοδύναμης πλαστικής μετατόπισης (equivalent plastic displacement, u_{pl}), η οποία ορίζεται στην Εξ. 3-5 (επιλογή Damage Evolution, Type>Displacement).

$$\frac{d\overline{u_{pl}}}{dt} = \frac{d\overline{\varepsilon_{true,pl}}}{dt} * l_e \qquad \text{Εξ. 3-5}$$

Η τιμή της παραμέτρου Damage Degradation, D, που ορίστηκε στο υποκεφάλαιο 3.1, μπορεί να σχετιστεί με την τιμή της πλαστικής μετατόπισης γραμμικά, βηματικά ή εκθετικά. Όταν επιλέγεται η βηματική μεταβολή (Softening>Tabular), ο χρήστης καλείται να συμπληρώσει πίνακα με τιμές D και equivalent plastic displacement.

Για D=1 το υλικό έχει χάσει όλη την αντοχή του και η παραλαμβανόμενη τάση μηδενίζεται. Η προεπιλογή του προγράμματος είναι ότι το επίπεδο κατά το πάχος του πεπερασμένο στοιχείο που φτάνει Damage=1 θραύεται και σταματά να συμμετέχει στην παραλαβή του φορτίου. Παρόλα ταύτα ο χρήστης μπορεί να ορίσει χειροκίνητα την τιμή του D στην οποία το επίπεδο (layer) αποσύρεται από τους υπολογισμούς (Max Degradation, όπως περιγράφτηκε στο υποκεφάλαιο 3.1).



Σχήμα 3-10 : Ορισμός Damage Evolution από τους Hogström και Ringsberg [22] με γραμμική ή δι-γραμμική σχέση (b) και οι αντίστοιχες καμπύλες που παράγονται (a)

Οι Hogström και Ringsberg [22] δοκιμάζουν μια γραμμική και μία δι-γραμμική (linear και tabular: bilinear) σχέση μεταξύ της μεταβλητής D και του u_{pl}. Οι ερευνητές χρησιμοποιούν την εξής απλουστευμένη σχέση για την εύρεση των απαραίτητων τιμών της πλαστικής μετατόπισης συναρτήσει της πλαστικής παραμόρφωσης :

$$u_{pl} = \varepsilon_{true,pl} * l_e \qquad \text{Εξ. 3-6}$$

Στην περίπτωση της γραμμικής συσχέτισης, η μοναδική παράμετρος που πρέπει να ρυθμιστεί είναι η τιμή της πλαστικής μετατόπισης στο σημείο της θραύσης, $u_{pl,f}$. Για την εύρεση της τιμής της πραγματικής παραμόρφωσης στο σημείο της θραύσης – η οποία δεν μπορεί να υπολογισθεί ευθέως από τα δεδομένα της πειραματικής καμπύλης, διότι δεν ισχύει η συνθήκη της ομοιόμορφης μεταβολής – χρησιμοποιείται αντίστροφη μηχανική,

ώστε η πειραματική παραμόρφωση θραύσης του μοντέλου να ταυτίζεται με αυτήν της δοκιμής. Στην περίπτωση της δι-γραμμικής εξέλιξης, οι παράμετροι είναι, πέρα από το $u_{pl,f}$, το ζεύγος (u_{pl}, D) που προσδιορίζει το ενδιάμεσο σημείο και υπολογίζεται μέσω της διαδικασίας αντίστροφης μηχανικής. Μάλιστα, οι ερευνητές, για να μειώσουν τον αριθμό των μεταβλητών, όρισαν μία τιμή για το D στο ενδιάμεσο σημείο και άφησαν ελεύθερη την τιμή του u_{pl}. Οι Hogström και Ringsberg παρατηρούν ότι η δι-γραμμική σχέση μπορεί να περιγράψει με μεγαλύτερη ακρίβεια την διαδικασία εξέλιξης του μηχανισμού θραύσης για τα υλικά που τους απασχολούν, σε σχέση με την γραμμική, που είναι πιο χονδροειδής. Ο ορισμός των δύο σχέσεων και η καμπύλη του μοντέλου του υλικού που παράγεται σε κάθε περίπτωση φαίνεται στο Σχήμα 3-10. Σημειώνουν, επιπλέον, ότι η αξιοποίηση του Damage Evolution συμβάλλει στην αποφυγή αριθμητικών ασταθειών.

Ο Μαρινάτος [23] υιοθετεί μία διαφορετική εξίσωση για την καμπύλη πραγματικής τάσης-παραμόρφωσης. Αποσυμπλέκει την περιοχή δημιουργίας λαιμού από την περιοχή έως το όριο διαρροής, εκφράζοντας την σχέση τάσης-παραμόρφωσης διαφορετικά για την κάθε μία. Όσον αφορά την πλαστική περιοχή έως το όριο διαρροής, η σχέση πραγματικής τάσης και παραμόρφωσης εξάγεται με την χρήση των εξισώσεων που συνδέουν πραγματικά και πειραματικά μεγέθη (Εξ. 2-17, Εξ. 2-19). Καθώς η πειραματική καμπύλη είναι γνωστή, η καμπύλη του μοντέλου προκύπτει με την μετατροπή μίας σειράς πειραματικών σημείων σε σημεία πραγματικής τάσης – παραμόρφωσης. Επειδή οι σχέσεις μετατροπής ισχύουν μόνο υπό την προϋπόθεση της ομογενούς παραμόρφωσης του στοιχείου, η αναφερθείσα τεχνική δεν μπορεί να ακολουθηθεί για το κομμάτι της καμπύλης που αφορά την περιοχή δημιουργίας λαιμού.

Για την περιοχή που αφορά την εντοπισμένη παραμόρφωση του δοκιμίου εφελκυσμού, ο Μαρινάτος εφαρμόζει μία ιδέα που προτάθηκε αρχικά από τον Ling το 1996 [24]. Η καμπύλη πραγματικής τάσης και παραμόρφωσης που συνεχίζεται μετά το μέγιστο φορτίο, περιγράφεται από μία εξίσωση με βαθμό από n έως 1. Σε κάθε περίπτωση, εξασφαλίζεται συνέχεια πρώτου βαθμού στο σημείο συμβολής, δηλαδή στο όριο αντοχής. Οι σταθερές που αφορούν την εκθετική σχέση βρίσκονται με τις δύο εξισώσεις για τη συνέχεια στο όριο αντοχής (Εξ. *3-7*, Εξ. *3-8*).

$$\sigma_{ult,true} = K * \varepsilon_{ult,true,pl}^{n} \qquad \text{Εξ. 3-7}$$

$$\frac{d\sigma_{ult,true}}{d\varepsilon_{ult,true,pl}} = \sigma_{ult,true} \qquad \text{Εξ. 3-8}$$

Η επίλυση αυτών των δύο εξισώσεων δίνει παραμετρικά την τιμή των σταθερών K και n (Εξ. *3-9*).

$$\varepsilon_{ult,true,pl} = n, \qquad K = \frac{\sigma_{ult,true}}{\varepsilon_{ult,true,pl}^{\varepsilon_{ult,true,pl}}} \qquad \text{Εξ. 3-9}$$

Οι δύο σταθερές που αφορούν την γραμμική σχέση υπολογίζονται με ανάλογο τρόπο (Εξ. 3-10, Εξ. 3-11, Εξ. 3-12).

$$\sigma_{ult,true} = \alpha * \varepsilon_{ult,true,pl} + \beta \qquad \text{Εξ. 3-10}$$

$$\frac{d\sigma_{ult,true}}{d\varepsilon_{ult,true,pl}} = \sigma_{ult,true} = \alpha \qquad \text{Εξ. 3-11}$$

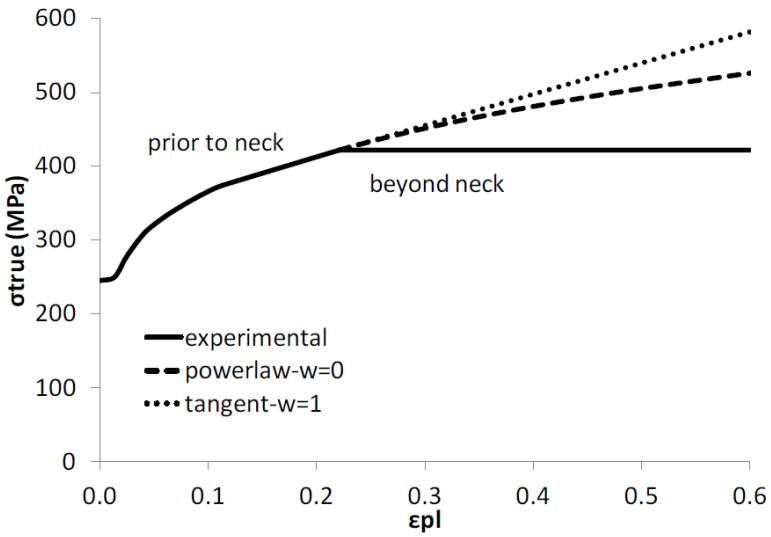
$$\alpha = \sigma_{\mathrm{ult,true}} \text{ και } \beta = \sigma_{\mathrm{ult,true}} * (1 - \varepsilon_{\mathrm{ult,true,pl}}) \qquad \text{Εξ. 3-12}$$

Εισάγεται, κατόπιν, ο παράγοντας w ο οποίος οδηγεί σε μία σχέση που παρεμβάλλεται μεταξύ της εκθετικής και της γραμμικής, ως εξής.

$$\sigma_{true} = (1 - w) * f_{powerlaw}(\varepsilon_{true,pl}) + w * f_{tangent}(\varepsilon_{true,pl})$$

$$=> \sigma_{true} = (1 - w) * \left[\frac{\sigma_{ult,true}}{\varepsilon_{ult,true,pl}^{\varepsilon_{ult,true,pl}}} * \varepsilon_{true,pl}^{\varepsilon_{ult,true,pl}}\right]$$
$$+w * \left[\sigma_{ult,true} * \varepsilon_{true,pl} + \sigma_{ult,true} * \left(1 - \varepsilon_{ult,true,pl}\right)\right] \qquad \text{Εξ. 3-13}$$

$$=> \sigma_{true} = \sigma_{ult,true} * \left[(1 - w) * \left(\frac{\varepsilon_{true,pl}}{\varepsilon_{ult,true,pl}}\right)^{\varepsilon_{ult,true,pl}}\right.$$
$$\left. +w * \left(\varepsilon_{true,pl} + 1 - \varepsilon_{ult,true,pl}\right]\right.$$



Σχήμα 3-11: Μοντέλο πραγματικής καμπύλη τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης μετά το όριο αντοχής, εφαπτομενικού (tangent, w=1) και εκθετικού (power-law, w=0) τύπου [23]

Για w=0, η εξίσωση μετά το όριο αντοχής ταυτίζεται με την εκθετική, ενώ για w=1 ισοδυναμεί με την εφαπτομενική (γραμμική) σχέση (Σχήμα 3-11). Η τιμή του w υπολογίζεται με αντίστροφη μηχανική, για την περιοχή μετά το όριο αντοχής.

Η καμπύλη του μοντέλου του υλικού συνεχίζει κατά την Εξ. 3-13 μέχρι το σημείο της αστοχίας, το οποίο ο Μαρινάτος λαμβάνει ως το όριο θραύσης του υλικού. Η θέση του σημείου αυτού πάνω στην καμπύλη βρίσκεται με βάση το εκάστοτε κριτήριο θραύσης το οποίο αναλύεται στο υποκεφάλαιο 3.3. Στην παρούσα φάση, αναφέρεται μόνο ότι ο μελετητής τοποθετεί το Damage Initiation του προγράμματος ABAQUS στο σημείο της θραύσης και κατόπιν αφαιρεί ακαριαία το πεπερασμένο στοιχείο, δηλαδή δεν αξιοποιεί το πεδίο Damage Evolution.

Άξιος αναζήτησης είναι, ακόμη, ο χειρισμός, από τους ερευνητές της βιβλιογραφίας, του ζητήματος αλληλεξάρτησης του μεγέθους του πεπερασμένου στοιχείου και της καμπύλης του μοντέλου του υλικού. Στις περισσότερες μελέτες, οι προσομοιώσεις εκτελούνται με διαφορετικά μεγέθη πεπερασμένων στοιχείων, ώστε να ελεγχθεί η σύγκλιση, ή και με τοπικές πυκνώσεις του πλέγματος, ώστε να συλλαμβάνεται η επίδραση των συγκεντρώσεων τάσης και παραμόρφωσης. Συνεπώς, για κάθε μέγεθος στοιχείου, το μοντέλο του υλικού πρέπει να τροποποιείται καταλλήλως.

Οι Ehlers et al. [6] και Alsos και Amdahl [8] δεν λαμβάνουν υπόψη το μέγεθος του στοιχείου κατά την κατασκευή της εξίσωσης της καμπύλης του υλικού, αφού χρησιμοποιούν τις ίδιες τιμές για τις σταθερές K και n της εκθετικής σχέσης. Και οι δύο ομάδες ερευνητών εισάγουν την επίδραση του λόγου του χαρακτηριστικού μήκους προς το πάχος του στοιχείου (l_e/t) στην τιμή της ρυθμιστικής παραμέτρου του εκάστοτε κριτηρίου θραύσης, το οποίο θα συζητηθεί στο εδάφιο 3.3.2.

Οι Alsos και Amdahl κρίνουν πως η περιοχή δημιουργίας λαιμού μπορεί να αμεληθεί, επειδή ο μηχανισμός θραύσης εξελίσσεται ταχύτατα. Γι' αυτό το λόγο, η καμπύλη διακόπτεται στο σημείο εμφάνισης του λαιμού και τα πεπερασμένα στοιχεία που το υπερβαίνουν αφαιρούνται από το πλέγμα. Υπάρχει, όμως μία αντίφαση στον τρόπο που οι ερευνητές αντιμετωπίζουν το μοντέλο υλικού. Θεωρώντας ότι η πραγματική καμπύλη υλικού εκφράζεται ικανοποιητικά από το power-law, η τιμή της παραμόρφωσης στο όριο αντοχής του υλικού ισούται με το συντελεστή ενδοτράχυνσης, n, όπως αποδείχθηκε (Εξ. *3-9*). Το σημείο εκκίνησης του μηχανισμού αστοχίας, με το σχηματισμό του λαιμού, ταυτίζεται με - ή βρίσκεται πολύ κοντά στο - όριο αντοχής, όπως εξηγήθηκε στο Κεφάλαιο 2. Ωστόσο, οι τιμές που έχουν δώσει οι ερευνητές στην σταθερά n και την παραμόρφωση στο σημείο δημιουργίας λαιμού απέχουν αρκετά μεταξύ τους. Μία ακόμη αντίφαση που αφορά την χρήση του κριτηρίου αστοχίας θα αναφερθεί στο σχετικό εδάφιο (3.3.2).

Στην ερευνητική δουλειά του Μαρινάτου [23], η χρήση της μεθόδου του Ling, με το διαχωρισμό της εξίσωσης που περιγράφει την περιοχή πριν και μετά τη δημιουργία λαιμού, αφήνει μεγαλύτερη ελευθερία προσαρμογής της καμπύλης. Η καμπύλη δεν μεταβάλλεται με την αλλαγή του μεγέθους του στοιχείου, παρά μόνο μετά το όριο αντοχής, που θεωρείται σημείο εκκίνησης του μηχανισμού της όλκιμης θραύσης, γεγονός που αποδίδει καλύτερα το μηχανικό φαινόμενο. Ο παράγοντας ρύθμισης της καμπύλης

του υλικού μετά το μέγιστο φορτίο είναι ο παράγοντας w, του οποίου η λειτουργία παρουσιάζεται στην Εξ. 3-13. Ο Μαρινάτος καταλήγει πως για λόγους χαρακτηριστικού μήκους προς πάχος (l_e/t) μεγαλύτερους της μονάδας, τιμές του w στο εύρος 0 – 0.4 είναι κατάλληλες και, όπως αναλύθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, όσο αυξάνεται ο λόγος αυτός τόσο μειώνεται η τιμή που πρέπει να λάβει το w ως αποτέλεσμα της διαδικασίας αντίστροφης μηχανικής.

3.2.2 Μέθοδος παρούσας εργασίας για την εύρεση της καμπύλης υλικού

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην παρούσα μελέτη για την εύρεση της καμπύλης του μοντέλου του υλικού, που προσομοιάζει ακριβέστερα την συμπεριφορά του κατά τη φόρτιση, έχει περισσότερα κοινά χαρακτηριστικά με την μεθοδολογία που εισηγείται ο Μαρινάτος στη διδακτορική διατριβή του [23].

Στο πεδίο «Elasticity>Elastic», της απόδοσης ιδιοτήτων στο υλικό στο λογισμικό ABAQUS, συμπληρώνεται η τιμή του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson και στο πεδίο «Plasticity>Plastic» η πραγματική καμπύλη του υλικού σε μορφή σημείων, όπως εξηγήθηκε στο υποκεφάλαιο 3.1.

Στην περίπτωση που μελετάται μία σύγκρουση που έχει ήδη συμβεί, όπως στην παρούσα εφαρμογή, μπορεί να εκτελεσθεί πείραμα εφελκυσμού σε δοκίμιο που λαμβάνεται από υγιές υλικό σε περιοχή γειτονική της αστοχίας. Όταν το ατύχημα σύγκρουσης μελετάται σε θεωρητικό επίπεδο στη φάση σχεδιασμού της κατασκευής, ως πειραματική καμπύλη μπορεί να ληφθεί η ελάχιστη εγγυημένη που δίνεται από την πιστοποίηση του υλικού που έχει επιλεχθεί στην εκάστοτε περιοχή της κατασκευής. Η πειραματική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης της δοκιμής εφελκυσμού των υλικών που συμμετέχουν στην πειραματική διάταξη που προσομοιώνεται είναι γνωστή και παρατίθεται στη δημοσίευση των Alsos και Amdahl [7]. Οι καμπύλες αυτές ψηφιοποιούνται και μετατρέπονται σε πίνακα με ζεύγη τιμών πειραματικής τάσης και πειραματικής παραμόρφωσης. Οι εξισώσεις Εξ. 2-17 και Εξ. 2-19 χρησιμοποιούνται για τον μετασχηματισμό των ζευγών τιμών σε πραγματική τάση και παραμόρφωση. Οι τιμές πραγματικής τάσης και πλαστικής πραγματικής παραμόρφωσης – που υπολογίζεται με την αφαίρεση της μέγιστης ελαστικής παραμόρφωσης – συνθέτουν την καμπύλη του μοντέλου υλικού έως το όριο αντοχής, το οποίο εντοπίζεται από το διάγραμμα της δοκιμής εφελκυσμού.

Μετά το όριο αντοχής, η καμπύλη περιγράφεται από μία εξίσωση της μορφής Εξ. 3-13. Κατά τη διαδικασία αντίστροφης μηχανικής παρατηρήθηκε ότι, για τα περισσότερα μεγέθη στοιχείου, η εξαγόμενη πειραματική καμπύλη που προέκυπτε με χρήση της Εξ. 3-13, για κάθε τιμή της παραμέτρου w, ήταν υψηλότερη από την πραγματική πειραματική καμπύλη της δοκιμής εφελκυσμού. Το γεγονός αυτό οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η πραγματική καμπύλη υλικού οφείλει να λαμβάνει χαμηλότερες τιμές τάσης απ' ότι η εκθετική καμπύλη, όταν αυτό είναι απαραίτητο. Στις περιπτώσεις αυτές, η γραμμική παρεμβολή έγινε μεταξύ της εκθετικής καμπύλης και της οριζόντιας ευθείας $\sigma = \sigma_{ult}$, όπως

φαίνεται στην Εξ. 3-14 (ευθεία που στο Σχήμα 3-11 φαίνεται ως «experimental»). Η τιμή του παράγοντα w, για την ίδια σύσταση και πάχος υλικού, διαφοροποιεί το μοντέλο του υλικού για κάθε χαρακτηριστικό μήκος πεπερασμένου στοιχείου.

$$\sigma_{true} = (1-w) * f_{powerlaw}\left(\varepsilon_{true,pl}\right) + w * f_{constant}\left(\varepsilon_{true,pl}\right)$$

$$=> \sigma_{true} = (1-w) * \left[\frac{\sigma_{ult,true}}{\varepsilon_{ult,true,pl}^{\varepsilon_{ult,true,pl}}} * \varepsilon_{true,pl}^{\varepsilon_{ult,true,pl}}\right] + w * \sigma_{ult,true} \qquad \text{Εξ. 3-14}$$

$$=> \sigma_{true} = \sigma_{ult,true} * \left[(1-w) * \left(\frac{\varepsilon_{true,pl}}{\varepsilon_{ult,true,pl}}\right)^{\varepsilon_{ult,true,pl}} + w\right]$$

Όταν απαιτείται η χρήση της Εξ. 3-14, η τιμή w=0 δίνει καμπύλη που ταυτίζεται με την οριζόντιο $\sigma = \sigma_{ult}$, ενώ για w=1 η καμπύλη εκφράζεται από τον εκθετικό νόμο.

Στην παρούσα μελέτη, το όριο αστοχίας θεωρείται το σημείο στο οποίο το υλικό θραύεται, σε συμφωνία με την προσέγγιση του Μαρινάτου και σε αντίθεση με αυτήν του Alsos και ακολουθείται μία μεθοδολογία η οποία επιχειρεί να αποδώσει ακριβέστερα τον μηχανισμό της όλκιμης θραύσης. Όπως αναλύθηκε στο Θεωρητικό Υπόβαθρο (Κεφάλαιο 2), ο μηχανισμός δημιουργίας μικροκενών και άρα απώλειας της φέρουσας ικανότητας του στοιχείου ξεκινά μετά από το όριο αντοχής του υλικού. Συνεπώς, το Damage Initiation, που αντιστοιχεί στην εκκίνηση του μηχανισμού, τοποθετείται σε παραμόρφωση μεγαλύτερη η ίση της παραμόρφωσης στο όριο αντοχής. Από τις διαθέσιμες επιλογές που δίνονται από το λογισμικό, για την ρύθμιση του Damage Initiation, και οι οποίες θα αναλυθούν εκτενέστερα στο κεφάλαιο 3.3, χρησιμοποιείται το κριτήριο Ductile Damage, στο οποίο η ρυθμιστική παράμετρος, για την εκκίνηση του μηχανισμού όλκιμης θραύσης, είναι η παραμόρφωση, συναρτήσει της τριαξονικότητας και του ρυθμού παραμόρφωσης.

Η πτώση της πειραματικής καμπύλης, που οφείλεται στην εξασθένιση της αντοχής του υλικού μετά τη μέγιστη τάση, απαιτεί, για τα συγκεκριμένα υλικά που εξετάζονται στην παρούσα μελέτη, την αξιοποίηση του πεδίου Damage Evolution, καθώς, ακόμη και η χαμηλότερη τιμή του παράγοντα w οδηγεί σε υψηλότερη καμπύλη από την γνωστή πειραματική, στην υπό μελέτη περιοχή. Χρειάζεται, επομένως, να γίνει ο κατάλληλος χειρισμός των εντολών Damage Initiation και Damage Evolution και της παραμέτρου w, ώστε να κατασκευαστεί το ακριβέστερο μοντέλο υλικού, για την περιοχή μετά το όριο αντοχής.

Μία ικανοποιητική προσέγγιση του προβλήματος είναι ο ορισμός του Damage Initiation στο όριο αντοχής, το οποίο είναι δεδομένο για κάθε υλικό και ανεξάρτητο του μεγέθους του στοιχείου, κάτι που προτείνουν έμμεσα οι αρχιτέκτονες του λογισμικού με το Σχήμα 3-4. Σε αυτήν την περίπτωση, η ρύθμιση του παράγοντα w και του Damage Degradation (3.1) οδηγούν στον σχηματισμό της σωστής πραγματικής καμπύλης, για κάθε μέγεθος πεπερασμένου στοιχείου. Η τεχνική αυτή, ωστόσο, καθιστούσε σχετικά χρονοβόρα την εύρεση των παραμέτρων που οδηγούσαν σε αποτελέσματα, τα οποία προσέγγιζαν απόλυτα την επιθυμητή καμπύλη. Τελικά, αποφασίστηκε, η ρύθμιση που

αφορά το Damage Evolution να διατηρηθεί σταθερή για κάθε υλικό, ανεξάρτητα από το μέγεθος του πεπερασμένου στοιχείου, και η μεταβολή που επιφέρει η πυκνότητα του πλέγματος στο αποτέλεσμα να εξισορροπηθεί με τη ρύθμιση της τιμής του w και της παραμόρφωσης τη στιγμή εκκίνησης του μηχανισμού αστοχίας (Damage Initiation Strain), η οποία λαμβάνει πλέον τιμές μεγαλύτερες αυτής του ορίου αντοχής. Η διατήρηση της μίας από τις τρεις «παραμέτρους» σταθερής μετριάζει το επίπεδο πολυπλοκότητας της μεθοδολογίας και την καθιστά ταχύτερη στην εφαρμογή, χωρίς να υπεραπλουστεύει το πρόβλημα.

Η συγκεκριμένη προσέγγιση θυμίζει την αντιμετώπιση των Hogström και Ringsberg οι οποίοι έθεσαν το Damage Initiation στο σημείο εμφάνισης τοπικής αστάθειας. Στην παρούσα μελέτη, η τιμή της παραμόρφωσης αυτής δεν είναι γνωστή, καθώς δεν διατίθεται οπτικό υλικό από την διάρκεια της δοκιμής εφελκυσμού. Το σημείο εκκίνησης του μηχανισμού όλκιμης θραύσης λαμβάνεται στο σημείο που η πειραματική καμπύλη αρχίζει να έχει πτωτική τάση. Ακόμη μία διαφορά με τη μεθοδολογία των Hogström και Ringsberg έγκειται στο ότι η παρούσα μελέτη επιτρέπει την τροποποίηση της εξίσωσης της καμπύλης μετά το όριο αντοχής, όπως πρότεινε ο Μαρινάτος [23].

Επιστρέφοντας στις ρυθμίσεις που πρέπει να γίνουν στο λογισμικό ABAQUS CAE, το ενσωματωμένο κριτήριο θραύσης Ductile Damage θα αναλυθεί εκτενέστερα στο σχετικό εδάφιο (3.3.3) και το Damage Evolution θα περιγραφεί συνοπτικά εδώ. Επιλέγεται βηματική μεταβολή της παραμέτρου Damage Degradation συναρτήσει της πλαστικής μετατόπισης, όπως προτάθηκε από τους Hogström και Ringsberg [22], με γραμμική ή δι-γραμμική σχέση. Τα ζεύγη (u_{pl}, D) προσδιορίζονται με αντίστροφη μηχανική και συμπληρώνονται στον κατάλληλο πίνακα. Αξιοποιείται, ακόμη, η ρύθμιση της τιμής του Maximum Degradation, που ισούται με την τεταγμένη του τελευταίου σημείου των ζευγών (u_{pl}, D).

Σε αυτό το υποκεφάλαιο περιγράφτηκε η μεθοδολογία εύρεσης της καμπύλης του υλικού. Οι τιμές που λαμβάνουν οι παράμετροι που συζητήθηκαν - και είναι εξαρτώμενες από το υλικό που μοντελοποιείται - παρατίθενται στο υποκεφάλαιο 3.4.

3.3 Κριτήριο αστοχίας

Το προηγούμενο υποκεφάλαιο αφιερώθηκε στην περιγραφή της μεθοδολογίας κατασκευής του μοντέλου του υλικού, όσον αφορά στην καμπύλη πραγματικής τάσης και παραμόρφωσης. Αναφέρθηκε, ακόμη, ότι κάθε ερευνητής έχει διαφορετική θεώρηση για το σημείο διακοπής αυτής της καμπύλης – άλλοι λαμβάνουν το σημείο δημιουργίας τοπικής αστάθειας και άλλοι το σημείο στο οποίο το στοιχείο θραύεται τελειωτικά. Όποια και να είναι η προσέγγιση, οι συντεταγμένες του πραγματικού σημείου ενδιαφέροντος, υπό κάποια εντατική κατάσταση του στοιχείου, μπορούν να προσδιοριστούν με την εκτέλεση κατάλληλης καταστρεπτικής δοκιμής και κατόπιν μοντελοποίησής της και χρήσης αντίστροφης μηχανικής (όπως στην περίπτωση του μονοαξονικού εφελκυσμού). Επίσης, σχολιάστηκε η επιρροή του χαρακτηριστικού μεγέθους του στοιχείου στο σημείο αστοχίας του μοντέλου υλικού, αν αυτό τοποθετείται μετά το όριο αντοχής.

Τα κριτήρια αστοχίας, αφορούν την πρόβλεψη του σημείου αστοχίας του υλικού, όταν το κατασκευαστικό στοιχείο βρίσκεται υπό εντατική κατάσταση με διαφορετικά χαρακτηριστικά σε σχέση με μία (η περισσότερες) καταστάσεις αναφοράς, στις οποίες το σημείο αστοχίας είναι γνωστό από πειράματα. Θεμελιώδης είναι ο ρόλος της τριαξονικότητας, όπως επίσης και του ρυθμού παραμόρφωσης, στην εξέλιξη του μηχανισμού της θραύσης, όπως τονίστηκε στο εδάφιο 2.3.3. Τα κριτήρια θραύσης καλιμπράρονται με μία ή περισσότερες καταστρεπτικές δοκιμές (όπως η δοκιμή εφελκυσμού) και επιχειρούν να εκφράσουν τη συνθήκη θραύσης σε συνάρτηση με παραμέτρους που αφορούν τη φόρτιση.

Σε σχέση με το είδος του θεωρούμενου ύστατου σημείου της καμπύλης υλικού, τα κριτήρια αστοχίας μπορούν να ταξινομηθούν σε:

- κριτήρια αστάθειας, τα οποία θεωρούν ως σημείο διακοπής της καμπύλης υλικού το σημείο εμφάνισης του λαιμού και
- κριτήρια θραύσης, τα οποία χρησιμοποιούνται, όταν είναι επιθυμητό να ληφθεί υπόψη όλο το εύρος της καμπύλης, μέχρι τον αποχωρισμό του υλικού.

Η συνθήκη θραύσης εκφράζεται ως υπέρβαση της μέγιστης τιμής κάποιας κρίσιμης παραμέτρου. Ως προς τον ρυθμιστικό παράγοντα της αστοχίας, τα κριτήρια κατηγοριοποιούνται σε:

- κριτήρια βασισμένα στην παραμόρφωση,
- κριτήρια βασισμένα στην τάση,
- κριτήρια βασισμένα στην ενέργεια παραμόρφωσης.

3.3.1 Παρουσίαση δημοφιλών κριτηρίων αστοχίας

Στις παραγράφους που ακολουθούν, θα περιγραφούν κάποια από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα, στην βιβλιογραφία του αντικειμένου, κριτήρια αστοχίας.

1. Κριτήριο Ισοδύναμης Πλαστικής Παραμόρφωσης (Equivalent Plastic Strain Criterion)

Παρόλο που η ανάπτυξή του χρονολογείται στις αρχές του προηγούμενου αιώνα, το Κριτήριο Ισοδύναμης Πλαστικής Παραμόρφωσης χρησιμοποιείται ακόμη ευρύτατα στις αριθμητικές προσομοιώσεις, κυρίως λόγω της απλούστατης μορφής του [4]. Το Κριτήριο δεν απαιτεί κάποια διαδικασία ολοκλήρωσης ή την γνώση του ιστορικού τάσης και παραμόρφωσης κάθε στοιχείου, αφού η συνθήκη αστοχίας εκφράζεται ως ισότητα της στιγμιαίας τιμής της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης σε κάποιο σημείο με μία κρίσιμη τιμή.

Η ισοδύναμη παραμόρφωση υπολογίζεται με τον τρόπο που φαίνεται στην Εξ. 2-6 και η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση προκύπτει από την αφαίρεση του μέγιστου ελαστικού όρου. Όπως περιγράφτηκε στο υποκεφάλαιο 2.1, η τιμή των παραμορφώσεων (και τάσεων) σε ένα σημείο εξαρτάται από τις διευθύνσεις και τα επίπεδα στα οποία αυτές ορίζονται. Οι διευθύνσεις και τα επίπεδα στα οποία αναπτύσσονται οι μέγιστες

παραμορφώσεις/τάσεις αποκαλούνται «κύριες» και οι παραμορφώσεις/τάσεις αυτές ονομάζονται «κύριες παραμορφώσεις/τάσεις». Η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση μπορεί να βρεθεί μέσω των κυρίων παραμορφώσεων ως εξής (Εξ. 3-15) [25].

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}} * \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2} \qquad \text{Εξ. 3-15}$$

Το αναφερόμενο κριτήριο κατατάσσεται στην κατηγορία των κριτηρίων θραύσης, όμως μπορεί πολύ εύκολα να μετατραπεί σε κριτήριο αστάθειας, εάν η συνθήκη αστοχίας τροποποιηθεί καταλλήλως. Γίνεται αντιληπτό, ότι, λόγω της απλότητάς του, ο χρήστης του Κριτηρίου μπορεί να επηρεάσει τη συνθήκη αστοχίας κατά βούληση.

Όπως είναι προφανές, στην μορφή που μόλις παρουσιάστηκε, το Κριτήριο δεν λαμβάνει υπόψη του το μέγεθος των τάσεων, ούτε το είδος της εντατικής κατάστασης. Συνεπώς, επαρκεί για τη ρύθμισή του μόνο μία τιμή της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης, δηλαδή μία και μόνο πειραματική δοκιμή. Όπως, όμως, σχολιάστηκε στο εδάφιο 2.3.4, η παραμόρφωση θραύσης επηρεάζεται δραστικότατα από το επίπεδο της τριαξονικότητας, το οποίο με τη σειρά του εξαρτάται από την γεωμετρία και την φόρτιση του δοκιμίου. Η πειραματική μελέτη των Wierzbicki και Bao [16] (Σχήμα 2-20) έδειξε πως η τιμή της πραγματικής ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης θραύσης κυμαίνεται από περίπου 0.2 ως 0.6 για το αλουμίνιο 2024-T351, δηλαδή έχει μία διακύμανση 50% γύρω από την μέση της τιμή, ίση με 0.4. Τονίζεται, λοιπόν, η σημασία της επιλογής της καταστρεπτικής δοκιμής, προς καλιμπράρισμα του Κριτηρίου.

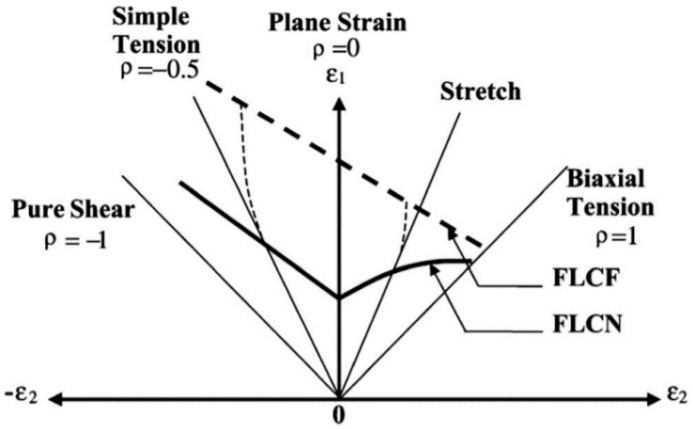
Αν είναι γνωστή η μέση τριαξονικότητα της επιβαλλόμενης εντατικής κατάστασης, τότε η κατάλληλη καταστρεπτική δοκιμή, για το καλιμπράρισμα του Κριτηρίου, είναι αυτή η οποία παραπέμπει σε παρόμοια μέση τριαξονικότητα. Εάν ενδιαφέρει όλο το εύρος τριαξονικότητας, τότε η δοκιμή για τη ρύθμιση του Κριτηρίου επιλέγεται με ανάλογο σκεπτικό. Στην περίπτωση του 2024-T351, που μελετήθηκε από τους Wierzbicki και Bao, το καλιμπράρισμα του Κριτηρίου Ισοδύναμης Πλαστικής Παραμόρφωσης θα μπορούσε να γίνει με τη διενέργεια μίας δοκιμής, με τριαξονικότητα μεταξύ καθαρής διάτμησης και μονοαξονικού εφελκυσμού. Η τιμή της κρίσιμης παραμόρφωσης, που θα προέκυπτε σε αυτήν την περίπτωση, θα ήταν κοντά στη μέση τιμή όλης της καμπύλης (Σχήμα 2-20), γεγονός που θα οδηγούσε σε όσο το δυνατόν μικρότερα σφάλματα. Επίσης, συνίσταται η αποκοπή του Κριτηρίου για τιμές τριαξονικότητας χαμηλότερες του -1/3 (μονοαξονική θλίψη), καθώς δεν παρατηρείται θραύση των δοκιμίων υπό αυτές τις συνθήκες.

Για την επίτευξη της μεγαλύτερης δυνατής ακρίβειας, συστήνεται η υιοθέτηση της μεθοδολογίας των ερευνητών Wierzbicki και Bao [16], οι οποίοι μετασκευάζουν το Κριτήριο Ισοδύναμης Παραμόρφωσης, ώστε να συμπεριληφθεί η επίδραση του είδους της εντατικής κατάστασης. Η τεχνική αυτή προϋποθέτει την εκτέλεση δοκιμών - τουλάχιστον τεσσάρων (που ορίζουν τις τρεις περιοχές του διαγράμματος) -, την διαγραμματοποίηση των αποτελεσμάτων ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης – μέσης τριαξονικότητας πειράματος και την παρεμβολή συναρτήσεων μεταξύ των πειραματικών σημείων, ώστε να σχηματιστεί η καμπύλη για όλο το εύρος τριαξονικότητας. Ωστόσο, ο χρήστης

προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων δεν έχει πάντα πρόσβαση σε αποτελέσματα καταστρεπτικών δοκιμών για το υλικό που προσπαθεί να μοντελοποιήσει, παρά μόνο σε μία ενδεικτική πειραματική καμπύλη εφελκυσμού, αν όχι μόνο σε κάποιες χαρακτηριστικές μηχανικές του ιδιότητες. Συνεπώς, όσο εντείνεται η πολυπλοκότητα και οι απαιτήσεις του κριτηρίου, αυξάνεται και η δυσχρηστότητά του. Ο μελετητής που θα χρησιμοποιήσει το κριτήριο, εξαιτίας της απλότητάς του, το αναβαθμίζει ανάλογα με την πρόσβαση σε πληροφορίες για το υλικό και τις δυνατότητες του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων που διαθέτει.

2. Κριτήριο Θραύσης Διαγράμματος Οριακής Μορφοποίησης (Fracture Forming Limit Diagram Criterion, FFLD)

Το συγκεκριμένο είναι ένα κριτήριο βασισμένο στην ισοδύναμη παραμόρφωση το οποίο, εν γένει, λαμβάνει υπόψη την επίδραση της τριαξονικότητας της εντατικής κατάστασης. Η έννοια του Διαγράμματος Οριακής Μορφοποίησης, προήλθε, όπως φαίνεται και από το όνομά της, από τη βιομηχανία μορφοποίησης ελασμάτων, όπου ήταν απαραίτητο να βρεθούν οι οριακές παραμορφώσεις με τις οποίες αποφεύγεται η δημιουργία λαιμού ή ζωνών διάτμησης (όρια μηχανικής επεξεργασίας του ελάσματος). Εξ ορισμού, εφόσον το Κριτήριο αναπτύχθηκε για τέτοιες διαδικασίες, έχει ισχύ σε συνθήκες επίπεδης τασικής κατάστασης, που σημαίνει ότι δεν υπάρχει κατανομή τάσεων κάθετων στο επίπεδο του ελάσματος.



Σχήμα 3-12 : Οριακό Διάγραμμα. Καμπύλη Αστάθειας (FLCN) και καμπύλη θραύσης (FLCF)

Στην πρωτότυπη εκδοχή του, το Κριτήριο κατατάσσεται στα κριτήρια αστάθειας, καθώς αστοχία, για την βιομηχανία μορφοποίησης, είναι, μεταξύ άλλων, η αλλοίωση της επιθυμητής διατομής, που προκαλείται από το λαιμό. Παρόλα ταύτα, η λογική του Οριακού Διαγράμματος μπορεί να εφαρμοστεί και στην περίπτωση που αναζητούνται οι παραμορφώσεις που προκαλούν θραύση του ελάσματος. Ένα Οριακό Διάγραμμα παρουσιάζει μία καμπύλη, με συντεταγμένες τις δύο κύριες παραμορφώσεις στο επίπεδο του ελάσματος, ε_1, ε_2, που χωρίζει την επιφάνεια σε περιοχή αστοχίας (πάνω) και ασφαλή περιοχή (κάτω). Στο Σχήμα 3-12 παρουσιάζεται ένα Οριακό διάγραμμα με μία καμπύλη

που αφορά στην εμφάνιση αστάθειας (FLCN) και μία καμπύλη που αφορά στην εμφάνιση θραύσης (FLCF). Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα, η καμπύλη FLCF είναι ικανή να προβλέψει την θραύση για λόγους παραμορφώσεων, β (ρ στο Σχήμα 3-12), από -0.5 ως 1, δηλαδή για τριαξονικότητες, η, από 1/3 ως 2/3.

Παρατηρείται, ότι η καμπύλη που αφορά στην θραύση αντιπροσωπεύεται από μία ευθεία γραμμή, γεγονός που θα αιτιολογηθεί αμέσως. Ισχύει, ότι τρεις κύριες παραμορφώσεις συνδέονται με την εξής σχέση, καθώς η μεταβολή είναι ισόογκη.

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$$
$$=> \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = -\varepsilon_3 \qquad \text{Εξ. 3-16}$$

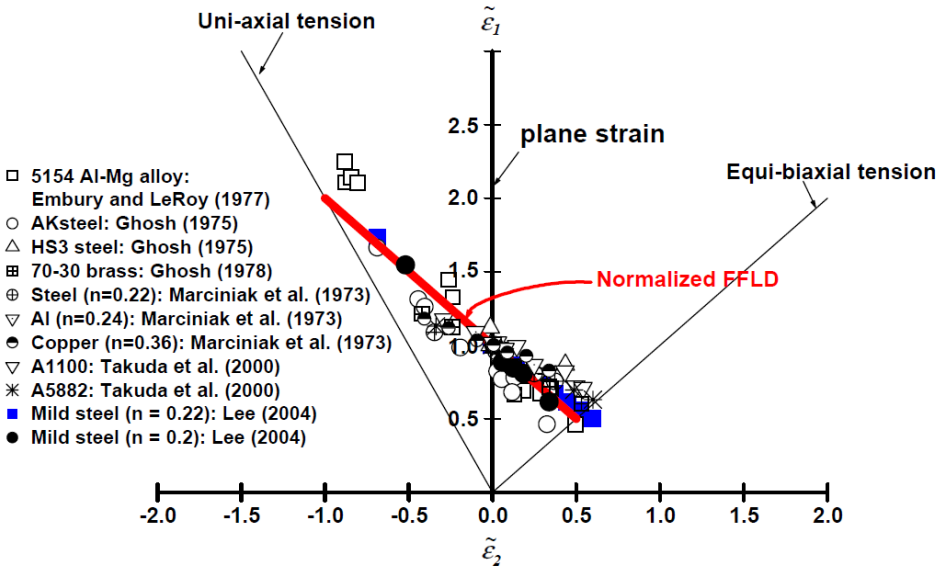
Αυτό σημαίνει, ότι με τον προσδιορισμό της εκτός επιπέδου παραμόρφωσης ε_3, ο μελετητής καταλήγει στην σχέση των επί του επιπέδου παραμορφώσεων. Διαφορετικά, η εύρεση οποιουδήποτε ζεύγους ε_1 και ε_2 είναι αρκετή για την γνώση των υπόλοιπων σημείων. Αν η παραπάνω σχέση εκφραστεί για το σημείο της θραύσης και αδιαστατοποιηθεί με την κύρια παραμόρφωση για κατάσταση επίπεδης παραμόρφωσης, $\varepsilon_{ps,f}$, τότε προκύπτει η Εξ. 3-17. Σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης, με χρήση της Εξ. 3-18, η Εξ. 3-17 παίρνει την μορφή της Εξ. 3-19.

$$\frac{\varepsilon_{1f}}{\varepsilon_{ps,f}} + \frac{\varepsilon_{2f}}{\varepsilon_{ps,f}} = -\frac{\varepsilon_{3f}}{\varepsilon_{ps,f}} \qquad \text{Εξ. 3-17}$$

$$\varepsilon_1 + 0 = -\varepsilon_3 => \varepsilon_1 = -\varepsilon_3 = \varepsilon_{plain-strain} \qquad \text{Εξ. 3-18}$$

$$\widetilde{\varepsilon_{1f}} = -\widetilde{\varepsilon_{2f}} + 1 \qquad \text{Εξ. 3-19}$$

Οι Wierzbicki και Bao [16] παρουσιάζουν πειραματικά αποτελέσματα συγκεντρωμένα από τον Lee Y. W. (2004), στα οποία φαίνεται η σχέση των αδιαστατοποιημένων κύριων τάσεων στο επίπεδο, στο σημείο της θραύσης, για ελάσματα από διαφορετικά υλικά (Σχήμα 3-13), όπου αποδεικνύεται η ισχύς της Εξ. 3-19. Όπως εξηγήθηκε, η γνώση της κύριας παραμόρφωσης στο σημείο της θραύσης, για συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης, όπως και η αντίστοιχη παραμόρφωση θραύσης οποιασδήποτε άλλης δοκιμής, με η από 1/3 ως 2/3, αποκαλύπτει την ακριβή θέση της ευθείας. Συμπερασματικά, επαρκεί μία καταστρεπτική δοκιμή για το καλιμπράρισμα του Κριτηρίου.



Σχήμα 3-13 : Πειραματικά αποτελέσματα που συλλέχθηκαν από τον Lee και αφορούν στο σημείο της θραύσης [4].

Η ευθεία (ε_2, ε_1) είναι ισοδύναμη της γνωστής υπερβολής (η, ε_{eq}) [16] για το συγκεκριμένο εύρος τριαξονικότητας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-14 [4]– η απόδειξη ακολουθεί. Η ισοδύναμη παραμόρφωση μπορεί να βρεθεί συναρτήσει των κυρίων παραμορφώσεων από την Εξ. 3-15. Εφόσον ισχύει η θεωρία πλαστικής ροής (J_2 flow theory) και επικρατούν συνθήκες επίπεδης τάσης, ο λόγος ελάχιστης και μέγιστης τάσης εκφράζεται συναρτήσει του λόγου παραμορφώσεων, β, ως εξής (Εξ. 3-20) [25].

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{1 + 2\beta}{\beta + 2} \qquad \text{Εξ. 3-20}$$

Σε συνθήκες επίπεδης τάσης, η σχέση που συνδέει την ισοδύναμη τάση, σ_{eq}, με τη μέγιστη κύρια τάση σ_1 [25] (με τη βοήθεια της Εξ. 3-20) αναγράφεται στην Εξ. 3-21.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2} * [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - 0)^2 + (0 - \sigma_1)^2]}$$

$$=> \sigma_{eq} = \sigma_1 * \sqrt{1 - \frac{\sigma_2}{\sigma_1} + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)^2} \qquad \text{Εξ. 3-21}$$

$$=> \sigma_{eq} = \sigma_1 * \sqrt{3} * \frac{\sqrt{1 + \beta + \beta^2}}{\beta + 2}$$

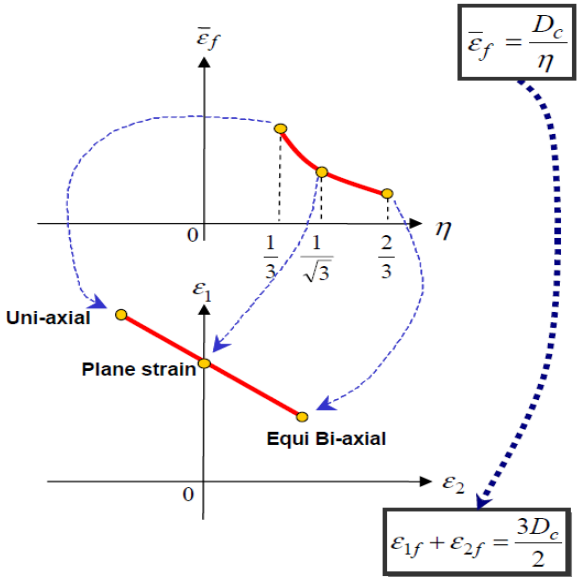
Η σχέση που συνδέει την τριαξονικότητα, η, με τον λόγο των κύριων παραμορφώσεων στο επίπεδο, β, σε συνθήκες επίπεδης τάσης, φαίνεται στην Εξ. 3-22.

$$\eta = \frac{\sigma_h}{\sigma_{eq}} = \frac{\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + 0)}{\sqrt{\frac{1}{2} * [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - 0)^2 + (0 - \sigma_1)^2]}}$$

$$=> \eta = \frac{\frac{1}{3} * \sigma_1 * \left(1 + \frac{1 + 2\beta}{\beta + 2} + 0\right)}{\sigma_1 * \sqrt{1 - \frac{\sigma_2}{\sigma_1} - \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)^2}} \qquad \text{Εξ. 3-22}$$

$$\eta = \frac{\frac{1}{3} * \sigma_1 * \frac{3 * (\beta + 1)}{\beta + 2}}{\sigma_1 * \sqrt{3} * \frac{\sqrt{1 + \beta + \beta^2}}{\beta + 2}} => \eta = \frac{\beta + 1}{\sqrt{3} * \sqrt{1 + \beta + \beta^2}}$$

Με την βοήθεια των εξισώσεων Εξ. 3-15 και Εξ. 3-21 τα σημεία της ευθείας (ε_2, ε_1) αντιστοιχίζονται σε σημεία της υπερβολής (η, ε_{eq}).

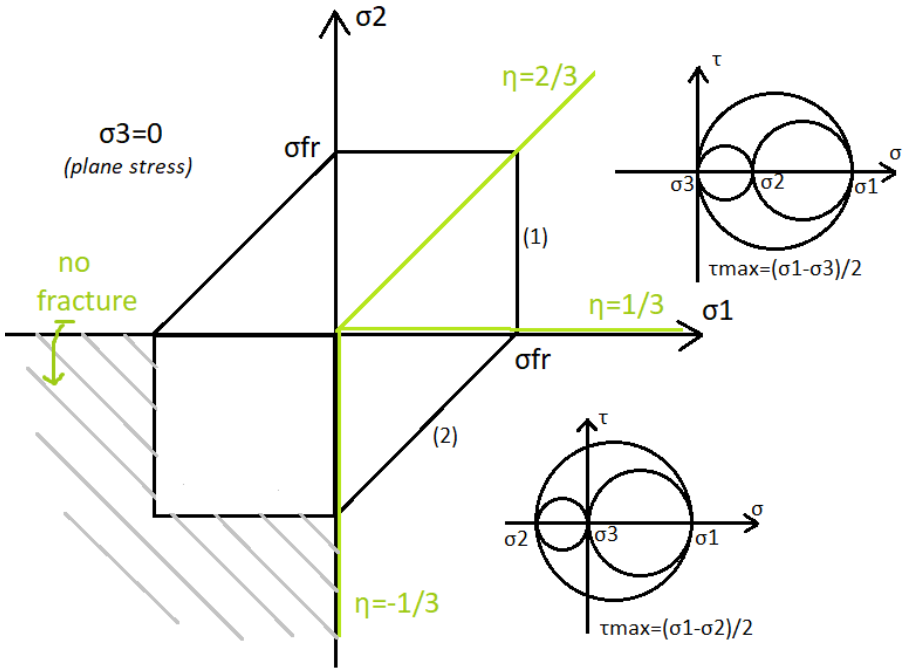


Σχήμα 3-14 : Σύνθεση μεταξύ κριτηρίου FFLD και κριτηρίου Ισοδύναμης Πλαστικής Παραμόρφωσης με επίδραση της τριαξονικότητας [4].

Η διαφορά του κριτηρίου FFLD από το Κριτήριο Ισοδύναμης Πλαστικής Παραμόρφωσης είναι ότι προϋποθέτει συνθήκες επίπεδης τάσης, έχει ισχύ σε ένα εύρος τριαξονικότητας (1/3, 2/3) και καλιμπράρεται με τιμές κύριας και όχι ισοδύναμης παραμόρφωσης. Όπως φάνηκε, όμως, για την περιοχή η=[1/3, 2/3] τα δύο κριτήρια είναι αλληλένδετα (Σχήμα 3-14). Αξίζει να σημειωθεί, τέλος, πως το κριτήριο προϋποθέτει ότι ο λόγος των ρυθμών μεταβολής των παραμορφώσεων, β, παραμένει σταθερός καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης.

3. Κριτήριο Μέγιστης Διατμητικής Τάσης (Maximum Shear Stress Criterion, MS)

Η διατύπωση αυτού του κριτηρίου βασίζεται στο γεγονός ότι η όλκιμη θραύση συχνά εξελίσσεται στα επίπεδα μέγιστης διατμητικής τάσης, εντός του υλικού. Συνεπώς, το ύψος της διατμητικής τάσης μπορεί να είναι ο ρυθμιστικός παράγοντας για την εμφάνιση της θραύσης. Το συγκεκριμένο κριτήριο ανήκει στην κατηγορία των κριτηρίων θραύσης που βασίζονται στην τάση, όμως μπορεί να μετασχηματιστεί, με τη χρήση των γνωστών σχέσεων, ώστε να προβλέπει την ισοδύναμη παραμόρφωση στη θραύση. Στην απλούστερη μορφή του, το κριτήριο ικανοποιείται όταν η διατμητική τάση ξεπεράσει τη μέγιστη τιμή της – σαν ένα κριτήριο Tresca όπου αντί για σ_{yield} υπάρχει το $\sigma_{fracture}$. Σε συνθήκες επίπεδης τάσης, το κριτήριο θραύσης Tresca φαίνεται στο Σχήμα 3-15.



Σχήμα 3-15 : Κριτήριο Tresca

Για τη μέγιστη διατμητική τάση ισχύει η Εξ. 3-23, όπου σ_1, σ_2, σ_3 είναι οι κύριες τάσεις.

$$\tau_{max} = max\left\{\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}, \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}, \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2}\right\} \qquad \text{Εξ. 3-23}$$

Αν θεωρηθεί ότι $\sigma_1 > \sigma_2$ και $\sigma_3 = 0$, τότε απομονώνονται οι περιοχές (1) και (2) στο Σχήμα 3-15 – για $\sigma_2 > \sigma_1$ ισχύουν τα αντίστοιχα.

<u>Περιοχή 1</u> : $\frac{1}{3} < \eta < \frac{2}{3}$ ή $-\frac{1}{2} < \beta < 1$

Στην περιοχή (1), από τον κύκλο του Mohr φαίνεται ότι, η μέγιστη διατμητική τάση ισούται με $\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1 - 0}{2}$, επομένως η διατμητική τάση θραύσης είναι $\tau_{max,fr} = \frac{\sigma_{1,fr}}{2}$. Χρησιμοποιώντας την Εξ. 3-21 και θεωρώντας ότι ισχύει ο εκθετικός νόμος έως το σημείο της θραύσης, η μέγιστη διατμητική τάση μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της ισοδύναμης παραμόρφωσης στη θραύση (Εξ. 3-24).

$$\tau_{max,fr} = \frac{\sigma_{1,fr}}{2} = \frac{1}{2} * (K * \varepsilon_{eq,fr}^{n}) * \frac{1}{\sqrt{3} * \frac{\sqrt{1 + \beta + \beta^2}}{\beta + 2}}$$

$$=> \varepsilon_{eq,fr}^{n} = \frac{2 * \tau_{max,fr}}{\sqrt{3} * K} * \frac{\sqrt{1 + \beta + \beta^2}}{\beta + 2}$$

$$=> \varepsilon_{eq,fr} = \left(\frac{2 * \tau_{max,fr}}{\sqrt{3} * K}\right)^{\frac{1}{n}} * \left(\frac{\sqrt{1 + \beta + \beta^2}}{\beta + 2}\right)^{\frac{1}{n}}$$

Εξ. 3-24

$$=> \varepsilon_{eq,fr} = C(material) * \left(\frac{\sqrt{1 + \beta + \beta^2}}{\beta + 2}\right)^{\frac{1}{n}}$$

<u>Περιοχή 2</u> : $-\frac{1}{3} < \eta < \frac{1}{3}$ ή $-2 < \beta < -\frac{1}{2}$

Στην περιοχή (2), από τον κύκλο του Mohr φαίνεται, ότι η μέγιστη διατμητική τάση ισούται με $\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$, επομένως η διατμητική τάση θραύσης - με χρήση της Εξ. 3-20 - είναι η εξής (Εξ. 3-25).

$$\tau_{max,fr} = \frac{\sigma_{1,fr} - \sigma_{2,fr}}{2} = \frac{\sigma_{1,fr}}{2} * \left(1 - \frac{1 + 2\beta}{\beta + 2}\right)$$

Εξ. 3-25

$$=> \tau_{max,fr} = \frac{\sigma_{1,fr}}{2} * \frac{1 - \beta}{\beta + 2}$$

Σε αντιστοιχία με την Εξ. 3-24 η σχέση ισοδύναμης τάσης και μέγιστης διατμητικής δύναμης, για -1/3<η<1/3, είναι η Εξ. 3-26.

$$\tau_{max,fr} = \frac{\sigma_{1,fr}}{2} * \frac{1-\beta}{\beta+2} = \frac{1}{2} * (K * \varepsilon_{eq,fr}^{n}) * \frac{\frac{1-\beta}{\beta+2}}{\sqrt{3} * \frac{\sqrt{1+\beta+\beta^2}}{\beta+2}}$$

$$=> \varepsilon_{eq,fr}^{n} = \frac{2 * \tau_{max,fr}}{\sqrt{3} * K} * \frac{\sqrt{1+\beta+\beta^2}}{1-\beta} \qquad \text{Εξ. 3-26}$$

$$=> \varepsilon_{eq,fr} = C(material) * \left(\frac{\sqrt{1+\beta+\beta^2}}{1-\beta}\right)^{\frac{1}{n}}$$

Τελικά, συνθέτοντας τις δύο σχέσεις, μία για κάθε περιοχή, προκύπτει η έκφραση του κριτηρίου για το πλήρες εύρος τριαξονικότητας (Εξ. 3-27).

$$\varepsilon_{eq,fr} = \begin{cases} C(mat.) * \left(\frac{\sqrt{1+\beta+\beta^2}}{1-\beta}\right)^{\frac{1}{n}} \; \gamma\iota\alpha - 2 < \beta < -\frac{1}{2} (\delta\iota\alpha\gamma\acute{\omega}\nu\iota o \; \tau\mu\acute{\eta}\mu\alpha) \\ C(mat.) * \left(\frac{\sqrt{1+\beta+\beta^2}}{\beta+2}\right)^{\frac{1}{n}} \; \gamma\iota\alpha \; -\frac{1}{2} < \beta < 1 \; (\kappa\alpha\tau\alpha\kappa\acute{o}\rho\upsilon\varphi o \; \tau\mu\acute{\eta}\mu\alpha) \end{cases} \qquad \text{Εξ. 3-27}$$

Και στις δύο σχέσεις, εμφανίζεται η σταθερά C η οποία, όπως φαίνεται από την Εξ. 3-24, αποτελεί συνάρτηση παραμέτρων του υλικού (την τιμή της διατμητικής τάσης στη θραύση και τις σταθερές του εκθετικού νόμου). Είναι, λοιπόν, ξεκάθαρο από την Εξ. 3-27 ότι μόνο μία παράμετρος, το C, χρειάζεται να προσδιοριστεί για την ρύθμιση του Κριτηρίου στο υλικό ενδιαφέροντος, επομένως, μία και μόνο καταστρεπτική δοκιμή αποτελεί την προεργασία για τη χρήση του. Δοκιμές που συστήνονται για την ρύθμιση του κριτηρίου είναι η δοκιμή καθαρής διάτμησης και η δοκιμή επίπεδης παραμόρφωσης -και όχι η δοκιμή εφελκυσμού σε δοκίμιο με κυκλική διατομή [4].

4. Κριτήριο Αστάθειας Bressan-Williams-Hill (BWH Criterion)

Κατά τον Alsos [8], [25], όταν μελετάται η συμπεριφορά ενισχυμένων ελασμάτων σε ακραίες φορτίσεις, η αστοχία θα πρέπει να ισοδυναμεί με την εμφάνιση πλαστικής αστάθειας στο κατασκευαστικό στοιχείο. Υποστηρίζει, ότι ο μηχανισμός θραύσης, που ξεκινά σε εκείνο το σημείο, εξελίσσεται ταχύτατα και επομένως η αμέλειά του δεν οδηγεί σε μεγάλα υπολογιστικά σφάλματα. Ακόμη, θεωρεί, ότι η προσέγγισή του δικαιώνεται από το γεγονός ότι τα μεγάλα πεπερασμένα στοιχεία κελύφους, που χρησιμοποιούνται σε προσομοιώσεις προσαράξεων πλοίων, δεν μπορούν ούτως ή άλλως να συλλάβουν με ακριβή τρόπο την συγκέντρωση παραμόρφωσης στην περιοχή του λαιμού. Αναζητώντας ένα κριτήριο αστάθειας, ο Alsos διστάζει να χρησιμοποιήσει το Κριτήριο Οριακού Διαγράμματος Μορφοποίησης (FLD), το οποίο προϋποθέτει σταθερό λόγο ρυθμού

μεταβολής των κυριών παραμορφώσεων, και στρέφεται σε κριτήρια με βάση την τάση, τα οποία δεν δεσμεύονται από αυτήν την συνθήκη, όπως το Κριτήριο Δημιουργίας Λαιμού του Hill και το Κριτήριο Δημιουργίας Διατμητικής Ζώνης Αστάθειας των Bressan και Williams [26].

Ο Hill μελετά τη δημιουργία μίας τοπικής μείωσης της διατομής (λαιμός) που σχηματίζεται σε γωνία $\varphi = \tan^{-1}(\frac{1}{\sqrt{-\beta}})$ ως προς την διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης (στο επίπεδο του ελάσματος). Καθώς φαίνεται, το κριτήριο του Hill παράγει λογικά αποτελέσματα για αρνητικές τιμές του λόγου του ρυθμού μεταβολής των δύο κύριων παραμορφώσεων, β, δηλαδή για τριαξονικότητες, η, από -1/3 (μονοαξονική θλίψη) έως -1/$\sqrt{3}$ (επίπεδη παραμόρφωση). Το πρωτότυπο κριτήριο βασίζεται στην παραμόρφωση και συνεπώς διέπεται από την περιοριστική συνθήκη που αναφέρθηκε παραπάνω. Ο Alsos [24], με κατάλληλο χειρισμό των σχέσεων τάσης και παραμόρφωσης, το επαναδιατυπώνει μετατρέποντάς το σε κριτήριο με βάση την τάση.

Οι Bressan και Williams εισηγήθηκαν ένα κριτήριο με βάση τη διατμητική τάση που θυμίζει το MS, που αναλύθηκε σε προηγούμενη παράγραφο. Εκτιμούν την δημιουργία μίας ζώνης διάτμησης, πριν την εμφάνιση λαιμού, σε γωνία θ ως προς την διεύθυνση της κύριας τάσης (κατά το πάχος του ελάσματος) και υποστηρίζουν ότι η αστάθεια θα δημιουργηθεί όταν η τιμή της διατμητικής τάσης στο επίπεδο της ζώνης φτάσει την κρίσιμη τιμή. Ο Alsos σημειώνει ότι οι πειραματικές παρατηρήσεις του συμφωνούν με το φαινόμενο που μελετούν οι Bressan και Williams [8]. Έτσι, συμπληρώνει την περιοχή των θετικών β, που δεν καλύπτεται από το κριτήριο του Hill, με το κριτήριο των Bressan και Williams ορίζοντας το ενοποιημένο κριτήριο ως Κριτήριο Αστάθειας Bressan-Williams-Hill [26]. Στις παρακάτω παραγράφους περιγράφεται ο τρόπος εξαγωγής του κάθε κριτηρίου.

<u>Κριτήριο Δημιουργίας Λαιμού του Hill</u> : -1/3<η<1/$\sqrt{3}$

Όπως αποδείχθηκε στο εδάφιο 2.3.3, στο όριο αντοχής, η εφαπτομένη της πραγματικής καμπύλης ισούται με την τιμή της ισοδύναμης τάσης, καθώς τα φαινόμενα Poisson και ενδοτράχυνσης αλληλοαναιρούνται στιγμιαία. Η ισότητα αυτή εκφρασμένη στην περιοχή του λαιμού που μελετά ο Hill δίνει την παρακάτω συνθήκη:

$$\frac{d\sigma_1}{dt} = \left(\frac{d\varepsilon_1}{dt} + \frac{d\varepsilon_2}{dt}\right) * \sigma_1 => \frac{d\sigma_1}{dt} = \frac{d\varepsilon_1}{dt}\left(1 + \frac{\frac{d\varepsilon_2}{dt}}{\frac{d\varepsilon_1}{dt}}\right) * \sigma_1$$

$$=> \frac{\frac{d\sigma_1}{dt}}{\frac{d\varepsilon_1}{dt}} = \left(1 + \frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_1}\right) * \sigma_1 => \frac{d\sigma_1}{d\varepsilon_1} = (1 + \beta) * \sigma_1$$

Εξ. 3-28

Εισάγοντας τον εκθετικό νόμο που συνδέει κύριες τάσεις και παραμορφώσεις, ο Hill καταλήγει στη σχέση για τη μέγιστη κύρια παραμόρφωση αστοχίας (Εξ. 3-29)

$$\varepsilon_{1,necking} = \frac{n}{\beta + 1} \qquad \text{Εξ. 3-29}$$

Με ανάλογο τρόπο, όπως στις τάσεις, η ισοδύναμη παραμόρφωση μπορεί να γραφτεί ως συνάρτηση της μέγιστης κύριας παραμόρφωσης, χρησιμοποιώντας τις Εξ. 3-15 και Εξ. 3-16.

$$\varepsilon_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3}} * \varepsilon_1 * \sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}\right)^2 + \left(\frac{-\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1}\right)^2}$$

$$=> \varepsilon_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3}} * \varepsilon_1 * \sqrt{1 + \beta^2 + (-1 - \beta)^2} \qquad \text{Εξ. 3-30}$$

$$=> \varepsilon_{eq} = \frac{2 * \varepsilon_1}{\sqrt{3}} * \sqrt{1 + \beta + \beta^2}$$

Ο Alsos [26] μετασχηματίζει τη συνθήκη αστοχίας του Hill Εξ. 3-29 σε συνθήκη που αφορά την τάση χρησιμοποιώντας τον εκθετικό νόμο (Εξ. 3-21,Εξ. 3-30 ,Εξ. 3-29).

$$\sigma_{eq,neck} = K * \varepsilon_{eq,neck}^n$$

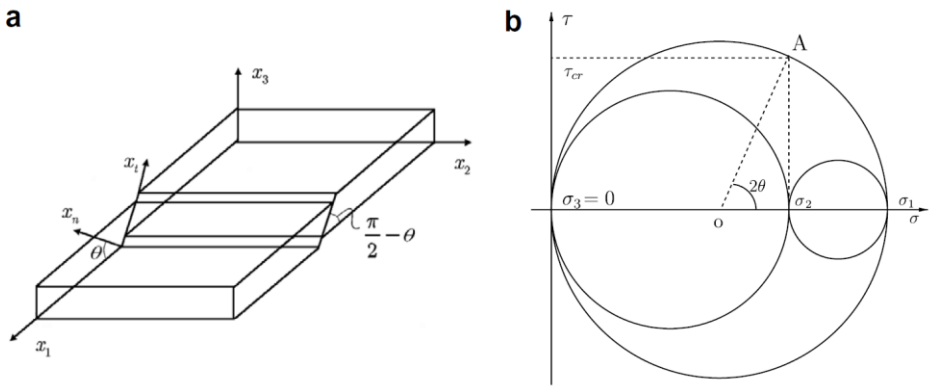
$$=> \sigma_{1,neck} * \sqrt{3} * \frac{\sqrt{1 + \beta + \beta^2}}{\beta + 2} = K * \left(\frac{n}{\beta + 1} * \frac{2}{\sqrt{3}} * \sqrt{1 + \beta + \beta^2}\right)^n \qquad \text{Εξ. 3-31}$$

$$=> \sigma_{1,neck} = \frac{K}{\sqrt{3}} * \frac{\beta + 2}{\sqrt{1 + \beta + \beta^2}} * \left(\frac{n}{\beta + 1} * \frac{2}{\sqrt{3}} * \sqrt{1 + \beta + \beta^2}\right)^n$$

Παρατηρείται η ομοιότητα αυτής της σχέσης με την Εξ. 3-24, παρόλο που η τωρινή αφορά αστοχία και όχι θραύση.

<u>Κριτήριο Διατμητικής Ζώνης Αστάθειας των Bressan και Williams</u>: $1/\sqrt{3} < \eta < 2/3$

Οι ερευνητές μελετούν την εντατική κατάσταση στο επίπεδο με γωνία θ ως προς την διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης (Σχήμα 3-16). Από τον κύκλο του Mohr προκύπτει ότι σε αυτό το επίπεδο η διατμητική τάση σχετίζεται με τη μέγιστη κύρια τάση μέσω της Εξ. 3-32. Η δεύτερη έκφραση της Εξ. 3-32 προκύπτει από την υπόθεση ότι το υλικό δεν υφίσταται επιμήκυνση στο επίπεδο της ζώνης διάτμησης, και η απόδειξή της περιλαμβάνεται στην δημοσίευση του Alsos [26].



Σχήμα 3-16 : Αστάθεια σε επίπεδο λοξό κατά το πάχος, που σχηματίζει γωνία θ με την διεύθυνση της μέγιστης τάσης [26]

$$\tau_{cr} = \frac{\sigma_1}{2} * sin(2\theta) => \sigma_{1,nech} = \frac{2 * \tau_{cr}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\beta}{\beta + 2}\right)^2}} \qquad \text{Εξ. 3-32}$$

Η κρίσιμη τιμή της διατμητικής τάσης που οδηγεί σε αστάθεια μπορεί να βρεθεί με την εξίσωση της Εξ. 3-32 με την Εξ. 3-31 για την κατάσταση επίπεδης παραμόρφωσης (β=0).

$$\sigma_{1,neck,ps} = \frac{2 * \tau_{cr}}{\sqrt{1 - \left(\frac{0}{0 + 2}\right)^2}} = \frac{K}{\sqrt{3}} * \frac{0 + 2}{\sqrt{1 + 0 + 0^2}} * \left(\frac{n}{0 + 1} * \frac{2}{\sqrt{3}} * \sqrt{1 + 0 + 0^2}\right)^n$$

$$=> \tau_{cr,neck} = \frac{K}{\sqrt{3}} * \left(\frac{2}{\sqrt{3}} * n\right)^n \qquad \text{Εξ. 3-33}$$

Με συνδυασμό των Εξ. 3-32 και Εξ. 3-33 προκύπτει το κριτήριο των Bressan και Williams εκφρασμένο ως προς την μέγιστη κύρια τάση.

<u>Κριτήριο Bressan-Williams-Hill</u>: -1/3< η<2/3

Ο συνδυασμός των δύο κριτηρίων από τον Alsos οδηγεί στην παρακάτω πλήρη έκφραση:

$$\sigma_1 = \begin{cases} \frac{K}{\sqrt{3}} * \frac{\beta + 2}{\sqrt{1 + \beta + \beta^2}} * \left(\frac{n}{\beta + 1} * \frac{2}{\sqrt{3}} * \sqrt{1 + \beta + \beta^2}\right)^n, \beta \leq 0 \\ \frac{2K}{\sqrt{3} * \sqrt{1 - \left(\frac{\beta}{\beta + 2}\right)^2}} * \left(\frac{2}{\sqrt{3}} * n\right)^n, \beta > 0 \end{cases} \qquad \text{Εξ. 3-34}$$

Σημειώνεται, καταληκτικά, ότι καθώς η εφαρμογή του κριτηρίου προϋποθέτει καθεστώς επίπεδης τάσης, αφορά μόνο σε μεμβρανικές τάσεις και παραμορφώσεις και αμελεί την επίδραση καμπτικών τάσεων. Γι' αυτό το λόγο, ο Alsos [8] ελέγχει το Κριτήριο μόνο στη μεσαία στρώση, κατά το πάχος, του πεπερασμένου στοιχείου, στις προσομοιώσεις του.

5. Κριτήριο Rice-Tracey-Cockcroft-Latham (RTCL Criterion)

Ανάλογα με τον Alsos, ο Törnqvist [5] συνέθεσε τα κριτήρια των Rice-Tracey και Cockcroft-Latham για να σχηματίσει ένα κριτήριο θραύσης που αφορά όλο το εύρος της τριαξονικότητας από τη μονοαξονική θλίψη έως τον διαξονικό εφελκυσμό.

<u>Κριτήριο Θραύσης λόγω Διάτμησης Cockcroft-Latham:</u> -1/3<η<1/3

Το κριτήριο θραύσης των Cockcroft και Latham ήταν ένα από τα πρώτα κριτήρια αστοχίας που βασίστηκαν στο πλαστικό έργο ανά μονάδα όγκου (πυκνότητα ενέργειας, βλ. 2.1.1) το οποίο αντί για την ισοδύναμη τάση εμπλέκει την μέγιστη κύρια τάση. Οι Oh et. al. τροποποίησαν το κριτήριο των Cockcroft και Latham, ώστε να περιλαμβάνει το λόγο των τάσεων, ο οποίος είναι συνάρτηση της τριαξονικότητας. Σε κάθε περίπτωση, η αστοχία επέρχεται όταν η τιμή του ολοκληρώματος της ενέργειας παραμόρφωσης ξεπεράσει μία κρίσιμη τιμή, D_{cr}, η οποία εξαρτάται από το υλικό.

$$D = \int \sigma_{eq}\, d\varepsilon_{eq} \geq D_{cr}\ (\gamma\varepsilon\nu\iota\kappa\acute{\eta}\ \mu o\rho\varphi\acute{\eta}\ \kappa\rho\iota\tau\eta\rho\acute{\iota}o\nu)$$

$$D = \int \sigma_1\, d\varepsilon_{eq} \geq D_{cr}\ \ (Cockcroft - Latham, 1972) \qquad \text{Εξ. 3-35}$$

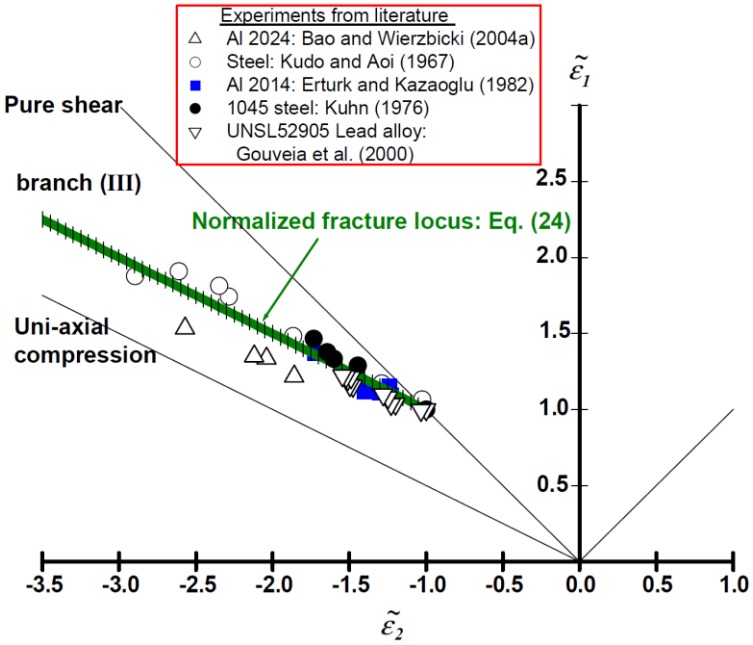
$$D = \int \frac{\sigma_1}{\sigma_{eq}}\, d\varepsilon_{eq} \geq D_{cr}\ \ (Oh\ et.al., 1979)$$

Το κριτήριο των Cockcroft-Latham έχει αποδείξει την εφαρμοσιμότητά του σε συνθήκες αρνητικής τριαξονικότητας. Οι Bao και Wierzbicki [4] χρησιμοποιούν τα αποτελέσματα των Kudo και Aoi (1967) για να ρυθμίσουν την τιμή της κρίσιμης παραμέτρου, D_{cr}, και να καλιμπράρουν το κριτήριο. Η καμπύλη των πειραματικών παρατηρήσεων αυτών των ερευνητών, που αφορά την περιοχή -1/3<η<0, φαίνεται στο Σχήμα 3-17 και περιγράφεται από την Εξ. 3-36 σε αδιαστατοποιημένη μορφή – η αδιαστατοποίηση έχει γίνει με την τιμή της πλαστικής παραμόρφωσης σε κατάσταση επίπεδης παραμόρφωσης.

$$\widetilde{\varepsilon_{1,f}} + \frac{1}{2} * \widetilde{\varepsilon_{2,f}} = \frac{1}{2}\ \ (1)$$

$$\frac{\varepsilon_{1,f}}{\varepsilon_{ps,f}} + \frac{1}{2} * \frac{\varepsilon_{2,f}}{\varepsilon_{ps,f}} = \frac{k}{\varepsilon_{ps,f}}\ \ (2) \qquad \text{Εξ. 3-36}$$

$$(1) - (2) => k = \frac{\varepsilon_{ps,f}}{2}$$



Σχήμα 3-17: Συλλογή πειραματικών αποτελεσμάτων για τις κρίσιμες παραμορφώσεις θραύσης, σε αρνητικές τριαξονικότητες, από τους Bao και Wierzbicki [4].

Με τη χρήση του λόγου ελάχιστης και μέγιστης κύριας παραμόρφωσης, η μέγιστη κύρια παραμόρφωση θραύσης και εν συνεχεία η ισοδύναμη παραμόρφωση θραύσης (με χρήση της Εξ. 3-30) μπορεί να βρεθεί συναρτήσει της τιμής της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης θραύσης στην κατάσταση επίπεδης παραμόρφωσης (Εξ. 3-37).

$$\varepsilon_{1,f} + \frac{1}{2} * \varepsilon_{2,f} = \frac{\varepsilon_{ps,f}}{2}$$

$$=> \varepsilon_{1,f} * \left(1 + \frac{\beta}{2}\right) = \frac{\varepsilon_{ps,f}}{2} => \varepsilon_{1,f} = \frac{\varepsilon_{ps,f}}{\beta + 2} \qquad \text{Εξ. 3-37}$$

$$=> \varepsilon_{eq,f} = \frac{2}{\sqrt{3}} * \frac{\varepsilon_{ps,f}}{\beta + 2} * \sqrt{1 + \beta + \beta^2}$$

Κατόπιν, η $\varepsilon_{ut,f}$ εκφράζεται συναρτήσει της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης θραύσης σε συνθήκες μονοαξονικού εφελκυσμού, διότι το μέγεθος αυτό είναι λιγότερο δυσεύρετο για το εκάστοτε υλικό ενδιαφέροντος.

$$\varepsilon_{eq,ps} = \varepsilon_{eq}(\beta = 0) = \frac{2}{\sqrt{3}} * \varepsilon_{1,ps} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{eq,ut} = \varepsilon_{eq}\left(\beta = -\frac{1}{2}\right) = \varepsilon_{1,ut} \quad (2) \qquad \text{Εξ. 3-38}$$

$$\varepsilon_{1,ps,f} = \varepsilon_{1,ut,f} => \varepsilon_{eq,ps,f} = \frac{\sqrt{3}}{2} * \varepsilon_{eq,ut,f}$$

Ο συνδυασμός των Εξ. 3-37 και Εξ. 3-38 δίνει την Εξ. 3-39.

$$\varepsilon_{eq,f} = \varepsilon_{eq,ut,f} * \frac{\sqrt{1+\beta+\beta^2}}{\beta+2} \qquad \text{Εξ. 3-39}$$

Σε συνθήκες επίπεδης τάσης, αξιοποιούνται οι σχέσεις Εξ. 3-20 και Εξ. 3-22 και η εμπειρική συνθήκη θραύσης μετατρέπεται στην Εξ. 3-40 (Wierzbicki και Werner, 1998).

$$\varepsilon_{eq,f} = \varepsilon_{eq,ut,f} * \frac{3\eta + \sqrt{12-27\eta^2}}{2*\left(1+\eta\sqrt{12-27\eta^2}\right)} \qquad \text{Εξ. 3-40}$$

Ακολουθώντας αυτήν την διαδρομή, το μετασχηματισμένο από τον Oh κριτήριο των Cockcroft και Latham γράφεται ως εξής [5]:

$$\frac{1}{\varepsilon_{eq,ut,f}} * \int_0^{\varepsilon_f} f(\eta)\, d\varepsilon_{eq} \geq 1$$

$$=> \frac{1}{\varepsilon_{eq,ut,f}} * \int_0^{\varepsilon_f} \frac{3\eta + \sqrt{12-27\eta^2}}{2*\left(1+\eta\sqrt{12-27\eta^2}\right)} d\varepsilon_{eq} \geq 1 \qquad \text{Εξ. 3-41}$$

Όπως φαίνεται από την παραπάνω εξίσωση, το κριτήριο παράγει λογικά αποτελέσματα για εύρος τριαξονικότητας -1/3<η<1/3.

<u>Κριτήριο Θραύσης λόγω Δημιουργίας Μικροκενών Rice-Tracey:</u> 1/3<η<2/3

Στην έρευνά τους, οι Rice και Tracey μελέτησαν την ανάπτυξη ενός σφαιρικού κενού, που έχει πυρηνωθεί στην μικροδομή του υλικού, υπό υδροστατική εφελκυστική τάση. Κατέληξαν στην εξής σχέση που περιγράφει την αύξηση της ακτίνας του κενού, R, προς την αρχική του ακτίνα, R_0 :

$$ln\left(\frac{R}{R_0}\right) = \int_{\varepsilon_{nucleation}}^{\varepsilon_{coalescence}} a_{RT} * exp\left(\frac{3}{2}*\eta\right) d\varepsilon_{eq} \qquad \text{Εξ. 3-42}$$

Η παράμετρος a_{RT} είναι σταθερά και εξαρτάται από το υλικό. Οι Hancock και Mackenzie (1976) μετέτρεψαν το μοντέλο ανάπτυξης σφαιρικών μικροκενών των Rice και Tracey σε κριτήριο αστοχίας της μορφής του Oh (Εξ. 3-43). Η συσχέτιση αυτή είναι καθ' όλη λογική, αφού ο μηχανισμός πυρήνωσης και ανάπτυξης μικροκενών είναι ένας από τους βασικούς μηχανισμούς όλκιμης θραύσης σε καθεστώς εφελκυστικών φορτίσεων, όπως περιγράφτηκε στο εδάφιο 2.3.3.

$$D = \int a_{RT} * exp(c_{hm} * \eta)\, d\varepsilon_{eq} \geq D_{cr} \qquad \text{Εξ. 3-43}$$

Η σταθερά c_{hm} ισούται με 3/2 για το μοντέλο ανάπτυξης μικροκενών των Rice-Tracey, όμως μπορεί να λάβει και άλλες τιμές, ώστε να παρεμβάλλει καλύτερα τα πειραματικά δεδομένα [5]. Ο Törnqvist [5] αδιαστατοποίησε την κρίσιμη παράμετρο D_{cr}, παρομοίως με το κριτήριο των Cockcroft-Latham-Oh (Εξ. 3-43), χρησιμοποιώντας c_{hm} =3/2.

$$\frac{1}{\varepsilon_{eq,ut,f}} * \int_0^{\varepsilon_f} a_{RT} * exp\left(\frac{3}{2} * \eta\right) d\varepsilon_{eq} \geq 1 \qquad \text{Εξ. 3-44}$$

<u>Κριτήριο Θραύσης Rice-Tracey-Cockcroft-Latham του Törnqvist:</u> -1/3<η<2/3

Κατά την εκπόνηση της διδακτορικής του διατριβής, ο Törnqvist [5] είχε την ιδέα να συμπληρώσει την περιοχή στην οποία το κριτήριο των Cockcroft-Latham δεν μπορεί να παράξει λογικά αποτελέσματα με το κριτήριο των Rice-Tracey, το οποίο βασίζεται στην περιγραφή του βασικού μηχανισμού που λειτουργεί σε αυτήν την περιοχή. Η παράμετρος a_{RT} στη σχέση των Rice-Tracey ρυθμίζεται ώστε να εξασφαλίζεται η συνέχεια της συνάρτησης τριαξονικότητας στο σημείο η=1/3. Το αποτέλεσμα είναι το συνδυαστικό κριτήριο Rice-Tracey-Cockcroft-Latham με την εξής μορφή :

$$1 \leq \begin{cases} \dfrac{1}{\varepsilon_{eq,ut,f}} * \displaystyle\int_0^{\varepsilon_f} \dfrac{3\eta + \sqrt{12 - 27\eta^2}}{2 * \left(1 + \eta\sqrt{12 - 27\eta^2}\right)} d\varepsilon_{eq}, & -\dfrac{1}{3} < \eta < \dfrac{1}{3} \\ \dfrac{1}{\varepsilon_{eq,ut,f}} * \displaystyle\int_0^{\varepsilon_f} exp\left(\dfrac{3\eta - 1}{2}\right) d\varepsilon_{eq}, & \dfrac{1}{3} \leq \eta < \dfrac{2}{3} \end{cases} \qquad \text{Εξ. 3-45}$$

3.3.2 Χρήση κριτηρίων αστοχίας από τους ερευνητές της βιβλιογραφίας

Τα κριτήρια που παρουσιάστηκαν στις παραπάνω σελίδες είναι μερικά από τα βασικότερα και μακροβιότερα για την μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του υλικού στην αστοχία. Κάποια από αυτά βρίσκονται αυτούσια ενσωματωμένα στους κώδικες πεπερασμένων στοιχείων και άλλα χρησιμοποιούνται με την βοήθεια υπορουτίνας που συνοδεύει το λογισμικό και δίνει μεγαλύτερη ελευθερία ρυθμίσεων στον χρήστη. Μερικά από τα κριτήρια που παρουσιάστηκαν αποτελούν συγχώνευση άλλων παλαιότερων κριτηρίων, τα οποία βασίζονταν σε μηχανισμούς εξέλιξης της όλκιμης θραύσης, που

εμφανίζονται σε ένα συγκεκριμένο μόνο εύρος τριαξονικότητας. Στις παρακάτω παραγράφους, καταγράφεται η χρήση των κριτηρίων από τους ερευνητές της βιβλιογραφίας και συνοψίζονται τα συμπεράσματά τους για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων που αυτά παρήγαγαν.

Οι Bao και Wierzbicki [4] παρουσίασαν και αξιολόγησαν επτά κριτήρια θραύσης βάσει πειραματικών αποτελεσμάτων που οι ίδιοι εκτέλεσαν σε δοκίμια αλουμινίου. Κάθε ένα από τα δεκαπέντε πειράματα που μελέτησαν (δοκίμια εφελκυσμού με ή χωρίς οπή, δοκίμια θλίψης, επίπεδα δοκίμια) αντιπροσώπευε κάποια επικρατούσα τριαξονικότητα, καθώς δεν υπήρχαν μεγάλες διακυμάνσεις στη φύση της εντατικής κατάστασης. Κατόπιν, μοντελοποίησαν τα πειράματα αυτά με το λογισμικό ABAQUS CAE/Explicit και εισήγαγαν την πραγματική καμπύλη του υλικού, την οποία βρήκαν με τη βοήθεια του πειράματος εφελκυσμού σε δοκίμιο με κυκλική διατομή. Για τον ορισμό της ισοδύναμης παραμόρφωσης θραύσης στο πρόγραμμα, δεν χρησιμοποίησαν κάποιο κριτήριο θραύσης – καθώς σκοπό είχαν να τα αξιολογήσουν – αλλά αξιοποίησαν παρατηρήσεις από την πειραματική διαδικασία για την τιμή της μετατόπισης του άκρου του δοκιμίου την στιγμή της θραύσης. Τα ζεύγη ισοδύναμης παραμόρφωσης θραύσης και τριαξονικότητας, που προέκυψαν από τη συνδυαστική μελέτη των πειραμάτων και των προσομοιώσεών τους, χρησιμοποιήθηκαν για τη ρύθμιση και επικύρωση των κριτηρίων θραύσης. Εν τέλει, οι ερευνητές παρουσιάζουν ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα με τα αποτελέσματα των πειραμάτων και τις καμπύλες παραμόρφωσης-τριαξονικότητας που αποτελούν την πρόγνωση των κριτηρίων. Καταλήγουν ότι το Κριτήριο Μέγιστης Διατμητικής Τάσης παρέχει εντυπωσιακά καλές προβλέψεις για όλο το εύρος τριαξονικότητας. Σχολιάζουν ότι τα κριτήρια FFLD και Ισοδύναμης Πλαστικής Παραμόρφωσης αξίζει να χρησιμοποιηθούν μόνο εάν το εύρος τριαξονικότητας είναι μικρό και γνωστό εκ προοιμίου.

Ο Törnqvist [5] κατασκεύασε το κριτήριο Rice-Tracey-Cockcroft-Latham, συνθέτοντας δύο επιμέρους κριτήρια, στα πλαίσια του διδακτορικού του, όπου μελέτησε το σχεδιασμό γάστρας πλοίων έναντι θραύσης σε συνθήκες ατυχήματος. Μετά από σύγκριση των αποτελεσμάτων από προσομοιώσεις ατυχημάτων μεγάλης κλίμακας, αποτίμησε την αξιοπιστία των προβλέψεων του RTCL για χάλυβα και αλουμίνιο. Συμπέρανε, ότι το κριτήριό του μοντελοποιεί ικανοποιητικά την εμφάνιση μίας ρωγμής, αλλά δημιουργεί αμφιβολίες για την προγνωστική ικανότητα της εξέλιξής της. Υπεύθυνα γι’ αυτό θεωρεί, ωστόσο, τα πεπερασμένα στοιχεία κελύφους, τα οποία, εξ ορισμού, αφορούν συνθήκες επίπεδης τάσης σε κάθε επίπεδο/layer (με περιορισμό στο εύρος τριαξονικότητας) και δεν μπορούν να περιγράψουν με ακρίβεια τις συνθήκες γύρω από το άκρο τις ρωγμής, όπου η τριαξονικότητα κυμαίνεται σε επίπεδα από 2 έως 3. Τέτοιες συνθήκες προσομοιάζονται καλύτερα με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία, τα οποία όμως δεν χρησιμοποιούνται συχνά στη μοντελοποίηση μεταλλικών κατασκευών πλοίων. Καταλήγει, ότι το RTCL παράγει πολύ αξιόπιστα αποτελέσματα, αν ληφθεί υπόψη η απλότητα της ρύθμισής του – με δεδομένα ενός πειράματος εφελκυσμού – και η οικονομία σε υπολογιστικό χρόνο που εξασφαλίζει.

Οι Ehlers et. al. μοντελοποιούν τρία πειράματα μεγάλης κλίμακας με χρήση του λογισμικού LS-DYNA και εφαρμόζουν τρία κριτήρια θραύσης: δύο κριτήρια που

βασίζονται στην ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση, των Scharrer-Zhang (GLF) και του Peschmann (PES) αντίστοιχα και το RTCL που συνέθεσε ο Törnqvist. Τα κριτήρια ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης εμπεριέχουν πληροφορία για την ισοδύναμη παραμόρφωση στο σημείο δημιουργίας λαιμού και το δεύτερο ιδίως (PES) για τις διαστάσεις της ζώνης αστάθειας. Το κριτήριο RTCL ρυθμίζεται μέσω της ισοδύναμης παραμόρφωσης θραύσης σε μονοαξονικό εφελκυσμό για διαφορετικά μεγέθη στοιχείου. Οι μελετητές τονίζουν την επίδραση της πυκνότητας του πλέγματος στην πρόβλεψη της καμπύλης δύναμης-μετατόπισης και παρατηρούν ότι τα κριτήρια ισοδύναμης παραμόρφωσης είναι πιο ευαίσθητα σε σχέση με το RTCL στις μεταβολές του μεγέθους του στοιχείου. Συνοψίζουν, ότι είναι σημαντικό, η κρίσιμη πλαστική παραμόρφωση να υπολογίζεται για το πραγματικό μέγεθος στοιχείου, το οποίο μπορεί να βρεθεί μέσω των συντεταγμένων των κόμβων του, εάν χρησιμοποιείται υπορουτίνα.

Οι Hogström και Ringsberg [3] μοντελοποιούν ένα πείραμα μεγάλης κλίμακας που προσομοιάζει την πλαγιομετωπική σύγκρουση μεταξύ δύο πλοίων και εξετάζουν την ευαισθησία του αποτελέσματος στις παραμέτρους εισόδου. Μεταξύ των στοιχείων που διερευνούν είναι η επιρροή του κριτηρίου θραύσης στην πρόβλεψη της καμπύλης απόκρισης της κατασκευής και στην απορροφούμενη ενέργεια παραμόρφωσης και μορφολογία της ζημιάς. Εξετάζουν τρία κριτήρια αστοχίας τα οποία είναι ενσωματωμένα στο ABAQUS/Explicit. Το SHEAR criterion είναι ένα κριτήριο με βάση την παραμόρφωση που παρέχει το ABAQUS και συνδυάζει το Κριτήριο Ισοδύναμης Παραμόρφωσης με το κριτήριο Μέγιστης Διατμητικής Δύναμης. Περιλαμβάνει μία παράμετρο που αφορά τον λόγο των διατμητικών τάσεων προς την μέγιστη τάση, όμως δεν λαμβάνει υπόψη την τριαξονικότητα των τάσεων. Οι Hogström και Ringsberg χρησιμοποιούν μία ευρηματική μέθοδο, ώστε να εισάγουν το συνδυαστικό κριτήριο του Alsos [26], Bressan-Williams-Hill, στο ABAQUS χωρίς να την βοήθεια υπορουτίνας VUMAT. Υπολογίζουν τα ζεύγη κρίσιμων τάσεων και παραμορφώσεων, (ε_1, ε_2) και (σ_1, σ_2), βάσει του BWH και τα τοποθετούν στις κατάλληλες μεταβλητές εισόδου των, ενσωματωμένων στο ABAQUS, κριτηρίων FLD και FLSD. Καταλήγουν, μετά τις προσομοιώσεις τους, ότι το καταλληλότερο κριτήριο για την μοντελοποίηση συγκρούσεων πλοίων είναι ένα κριτήριο με βάσει την ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση το οποίο χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την ρύθμιση Damage Evolution, ώστε να ληφθεί υπόψη η συμπεριφορά του υλικού μετά το όριο αντοχής.

Οι Alsos και Amdahl [8] δοκιμάζουν την επίδοση του κριτηρίου BWH, που συνέθεσαν οι ίδιοι, και βασίζεται στην κρίσιμη τάση, σε σύγκριση με το ανάλογο συνδυαστικό κριτήριο RTCL, του Törnqvist, που βασίζεται στην κρίσιμη παραμόρφωση. Σημειώνεται σε αυτό το σημείο, ότι οι Alsos και Amdahl χρησιμοποιούν το κριτήριο RTCL, το οποίο κατασκευάστηκε με στόχο να προβλέπει την θραύση του υλικού, σε μία ανάλυση όπου αστοχία θεωρείται η δημιουργία τοπικής αστάθειας, και δεν σχολιάζουν τις συνέπειες αυτής της επιλογής στα αποτελέσματα της μοντελοποίησης. Το BWH δεν επηρεάζεται από την πυκνότητα του πλέγματος, ενώ το RTCL πρέπει να εφαρμοστεί σε συνδυασμό με έναν νόμο συσχέτισης ("scaling law"), ο οποίος προσαρμόζει την τιμή της κρίσιμης παραμόρφωσης ανάλογα με το μέγεθος του στοιχείου. Η εφαρμογή του νόμου συσχέτισης προβληματίζει τους Alsos και Amdahl, γιατί προκαταβάλει ότι η θραύση εμφανίζεται κατόπιν τοπικής συγκέντρωσης παραμόρφωσης, κάτι που έρχεται σε

αντίθεση με πειραματικές παρατηρήσεις και οδηγεί στην πρόωρη εμφάνιση θραύσης σε μη ρεαλιστικές περιοχές. Επιπλέον, το κριτήριο δεν μπορεί να διακρίνει τις περιοχές όπου πραγματικά αναπτύσσεται συγκέντρωση τάσεων και τις περιοχές που υπάρχουν εντοπισμένες υψηλότερες παραμορφώσεις - αλλά χωρίς συγκέντρωση – φαινόμενο το οποίο εντείνει η ελάττωση της πυκνότητας του πλέγματος. Τα αποτελέσματα του RTCL αποκτούν μεγάλη διασπορά, σε αυτήν την περίπτωση. Μία λύση που προτείνουν οι μελετητές, για τις περιπτώσεις όπου η μείωση του μεγέθους του στοιχείου έχει μεγάλο υπολογιστικό κόστος, είναι η εφαρμογή του νόμου συσχέτισης σε εστιασμένες περιοχές, όπου αναμένεται αστοχία, όπως τα σημεία με γεωμετρική ασυνέχεια (π.χ. οι περιοχές των συγκολλήσεων). Σε αυτήν την περίπτωση, το κριτήριο BWH υφίσταται επίσης μία μικρή προσαρμογή στην τιμή της κρίσιμης παραμόρφωσης αστοχίας.

Ο Μαρινάτος [23], στα πλαίσια του διδακτορικού του, θέλησε να προτείνει ένα μοντέλο υλικού, το οποίο οδηγεί σε αξιόπιστα αποτελέσματα για πληθώρα εφαρμογών που αφορούν τη φόρτιση έως τη θραύση μεταλλικών κατασκευών. Προγραμμάτισε σε υπορουτίνα VUMAT τα κριτήρια ισοδύναμης παραμόρφωσης θραύσης SHEAR (χωρίς επιρροή τριαξονικότητας) και RTCL και το κριτήριο αστάθειας BWH και αξιολόγησε τις επιδόσεις τους στην προσομοίωση μίας σειράς από είκοσι δύο πειράματα, μελετώντας παράλληλα και άλλα κριτήρια της βιβλιογραφίας. Τέλος, μοντελοποίησε μία πραγματική σύγκρουση πλοίων για να ελέγξει την συμπεριφορά του μοντέλου υλικού σε προσομοίωση μεγάλης κλίμακας. Παρατήρησε, ότι τα κριτήρια αστάθειας προβλέπουν πολύ διαφορετική συμπεριφορά της κατασκευής σε σχέση με τα κριτήρια θραύσης. Κατέληξε, ότι τα καλύτερα αποτελέσματα προκύπτουν με τη χρήση του Κριτηρίου Ισοδύναμης Παραμόρφωσης, λαμβάνοντας υπόψη τη συμπεριφορά μετά το όριο αντοχής, σε συνδυασμό με έναν νόμο συσχέτισης, για την επίδραση του μεγέθους του στοιχείου και με τιμή αποκοπής η=-1/3, κάτω από την οποία δεν επέρχεται αστοχία. Εξέφρασε, επίσης, την ίδια ανησυχία με τους Alsos και Amdahl για την διασπορά των αποτελεσμάτων, όταν η κατανομή των παραμορφώσεων δεν παρουσιάζει ασυνέχειες. Σημείωσε, όμως, ότι το πρόβλημα αυτό δεν εμφανίζεται σε προσομοιώσεις πραγματικών ατυχημάτων, όπου η πολύπλοκη γεωμετρία της μεταλλικής κατασκευής καθιστά τα σημεία συγκέντρωσης τάσεων και παραμορφώσεων κυρίαρχες περιοχές αστοχίας. Ακόμη, ο Μαρινάτος εξέφρασε την ανάγκη για ανάπτυξη ενός κριτηρίου με βάση την ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση, το οποίο να λαμβάνει υπόψη την γενικότερη εντατική κατάσταση (πχ. τριαξονικότητα). Κριτήρια τέτοιας μορφής έχουν προταθεί, όμως δεν έχει βρεθεί ακόμη αξιόπιστος τρόπος ρύθμισης τους σε σχέση με το υλικό και την πυκνότητα του πλέγματος. Συμπληρώνει, ότι το κριτήριο RTCL, το οποίο είναι ένα σχετικά αξιόπιστο κριτήριο που βασίζεται στο πλαστικό έργο, δίνει ακριβή αποτελέσματα στην περιοχή τριαξονικότητας $0<\eta<1/\sqrt{3}$, όμως έχει απόκλιση για το υπόλοιπο εύρος, ειδικά στην περιοχή της σχέσης Rice-Tracey ($1/3<\eta<2/3$), η οποία, μάλιστα, ενδιαφέρει περισσότερο κατά την προσομοίωση συγκρούσεων. Κρίνει απαραίτητη, λοιπόν, την επανεξέταση των παραμέτρων της συνάρτησης τριαξονικότητας που εμπλέκεται σε αυτό το κριτήριο, με σκοπό να διορθωθεί η ακρίβεια των προβλέψεών του.

Μελετώντας την δουλειά των ερευνητών της βιβλιογραφίας και παρακολουθώντας τις παρατηρήσεις και τις ανησυχίες τους, μπορούν να συνοψιστούν μερικά κοινά για όλους συμπεράσματα.

Η πρόβλεψη της συμπεριφοράς του υλικού μετά την εμφάνιση αστάθειας και η συμπερίληψή της στο μοντέλο, επηρεάζει το αποτέλεσμα, γι' αυτό πολλοί ερευνητές προτρέπουν στη χρήση κριτηρίων θραύσης και όχι αστάθειας. Όσοι μελετητές εξέτασαν την καταλληλότητα χρήσης της επιλογής Damage Evolution, κατέληξαν ότι βελτιώνει τα αποτελέσματα, σε συνδυασμό με συμβατό κριτήριο έναρξης της αστοχίας.

Το κριτήριο Ισοδύναμης Πλαστικής Παραμόρφωσης, συνοδευόμενο από τον ενδεδειγμένο νόμο συσχέτισης της κρίσιμης τιμής ("fracture scaling law"), παράγει αξιόπιστα αποτελέσματα στις προσομοιώσεις συγκρούσεων πλοίων. Η τάση είναι προς ένα κριτήριο ισοδύναμης παραμόρφωσης, το οποίο λαμβάνει υπόψη την επήρεια της τριαξονικότητας. Το RTCL είναι ένα κριτήριο το οποίο συμπεριλαμβάνει την φύση της εντατικής κατάστασης και μπορεί να γραφτεί σε μορφή ισοδύναμης παραμόρφωσης, όμως πρέπει να επαναξιολογηθεί η έκφραση της συνάρτησης τριαξονικότητας που χρησιμοποιεί. Το συγκεκριμένο κριτήριο είναι σχετικά αξιόπιστο όσον αφορά την έναρξη της θραύσης, ωστόσο αμφιβολίες εγείρονται σε σχέση με την καταλληλότητα του να προσομοιώσει τη διάδοση της ρωγμής. Η αδυναμία του να ανταποκριθεί για συνθήκες υψηλής τριαξονικότητας, που επικρατούν στο άκρο της ρωγμής, δεν έχει ισχυρό αντίκτυπο στην περίπτωση μοντελοποίησης με πεπερασμένα στοιχεία κελύφους, τα οποία εξ ορισμού περιορίζονται σε εφαρμογές, όπου η παραδοχή της επίπεδης τάσης ($1/3<\eta<2/3$) ανά επίπεδο κατά το πάχος είναι αποδεκτή.

Μέριμνα πρέπει να ληφθεί για την ευθύνη του νόμου συσχέτισης της παραμόρφωσης θραύσης στην πρόγνωση αστοχίας σε λανθασμένες περιοχές, χωρίς συγκέντρωση τάσεων/παραμορφώσεων. Η τριαξονικότητα στις εφαρμογές των ατυχημάτων συγκρούσεων και προσαράξεων πλοίων κυμαίνεται σε τιμές, συνήθως, άνω του 1/3, συνεπώς το κριτήριο θραύσης που θα επιλεγεί θα πρέπει να μπορεί να παράγει αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα ιδιαιτέρως γι' αυτήν την περιοχή. Τέλος, ο υπολογιστικός χρόνος είναι μία καθοριστική παράμετρος σε κάθε εφαρμογή και επηρεάζεται συχνότερα από την πυκνότητα του πλέγματος και την περιπλοκότητα των δεδομένων εισόδου στο λογισμικό.

3.3.3 Κριτήρια αστοχίας ABAQUS

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, σκοπός ήταν να αξιοποιηθούν τα κριτήρια που παρέχονται έτοιμα από το ABAQUS CAE, χωρίς να χρειαστεί να συγγραφεί συμπληρωματική υπορουτίνα VUMAT. Επομένως, είναι σημαντική η γνώση των διαθέσιμων επιλογών, που αποτελούν και το πλαίσιο δυνατοτήτων του χρήστη. Για την μοντελοποίηση της όλκιμης αστοχίας, το ABAQUS έχει, στο παράθυρο ρύθμισης του μοντέλου του υλικού, το πεδίο «Mechanical>Ductile Damage», κάτω από το οποίο διατίθεται οι παρακάτω επτά επιλογές [20].

1. Ductile Criterion: Αυτό είναι ένα κριτήριο θραύσης ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης που προσομοιώνει την έναρξη και εξέλιξη της όλκιμης θραύσης εξαιτίας του μηχανισμού πυρήνωσης και ανάπτυξης μικροκενών στην δομή του υλικού. Η συνθήκη θραύσης είναι η εξής:

$$\int \omega_D \, d\varepsilon_{eq} \geq 1 \Rightarrow \sum_{1}^{inc.num} \Delta\omega_D \geq 1 \, , \text{όπου } \Delta\omega_D = \frac{\Delta\varepsilon_{eq}^{pl}}{\varepsilon_{eq,fr}^{pl}\left(\eta, \frac{d\varepsilon_{eq}^{pl}}{dt}\right)} \geq 0 \qquad \text{Εξ. 3-46}$$

Το ω_D είναι μια μεταβλητή κατάστασης, που αυξάνεται μονότονα με την πλαστική παραμόρφωση. Η αύξησή του υπολογίζεται σε κάθε αριθμητικό βήμα της προσομοίωσης. Όπως φαίνεται, η επιλογή του κριτηρίου αυτού δίνει την ευελιξία στο χρήστη να λάβει υπόψη την επίδραση της τριαξονικότητας και του ρυθμού παραμόρφωσης εάν το επιθυμεί, χωρίς αυτό να είναι δεσμευτικό. Ο μελετητής μπορεί να ορίσει την ίδια τιμή παραμόρφωσης για δύο ακραίες τιμές του εύρους των άλλων παραμέτρων, σηματοδοτώντας ότι δεν λαμβάνει υπόψη την επιρροή τους.

2. Johnson-Cook: Επίσης ένα κριτήριο θραύσης ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης, συναρτήσει της τριαξονικότητας και του ρυθμού παραμόρφωσης το οποίο, επίσης, εμπλέκει την επίδραση της θερμοκρασίας (η οποία, αντίστοιχα με τα προηγούμενα, μπορεί να αμεληθεί). Μεταβλητές εισόδου είναι πέντε σταθερές (τρεις, αν αγνοηθεί ο ρυθμός παραμόρφωσης και η θερμοκρασία) οι οποίες χρειάζονται τον αντίστοιχο αριθμό εργαστηριακών δοκιμών για να προσδιοριστούν.

3. Shear Damage: Κριτήριο θραύσης ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης που βασίζεται στο μηχανισμό όλκιμης θραύσης με δημιουργία ζωνών διάτμησης, με ρυθμιστικό παράγοντα τη μέγιστη τιμή διατμητικής τάσης. Αναφέρθηκε σε παραπάνω παράγραφο, στο πλαίσιο της δημοσίευσης των Hogström και Ringsberg [3]. Δε λαμβάνει υπόψη την τριαξονικότητα, αλλά τον λόγο των διατμητικών τάσεων. Οι αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις υπολογίζονται μέσω της υδροστατικής τάσης, της τριαξονικότητας και μίας σταθεράς που αφορά στο υλικό, ks. Τυπικές τιμές της σταθεράς αυτής, που να αφορούν στον χάλυβα, είναι δυσεύρετες.

Το λογισμικό διαθέτει επιπλέον τέσσερα κριτήρια αστάθειας.

1. FLD: Το γνωστό κριτήριο αστάθειας που βασίζεται στην τιμή και το λόγο της ελάσσονας και μείζονας κύριας παραμόρφωσης. Ο πίνακας ζευγών τιμών συμπληρώνεται είτε από πειραματικά δεδομένα, είτε με υπολογισμούς που προέκυψαν από άλλο κριτήριο αστοχίας. Κάθε στιγμή, η μέγιστη κύρια τάση συγκρίνεται με την κρίσιμη που προβλέπει το κριτήριο για την αντίστοιχη ελάχιστη κύρια τάση, στο επίπεδο που βρίσκεται στο μέσο του πεπερασμένου στοιχείου. Γι' αυτό το λόγο, το κριτήριο δεν ενδείκνυται σε περιπτώσεις όπου το φορτίο είναι καμπτικό, σε αντίθεση με τα κριτήρια Ductile Damage και Shear.

2. FLSD: Το ανάλογο του FLD, που βασίζεται σε επίπεδα τάσης, αντί για παραμόρφωσης και, συνεπώς, δεν προϋποθέτει σταθερό λόγο β κατά τη φόρτιση. Δεν συστήνεται, εξίσου,

να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις όπου το φορτίο είναι καμπτικό, καθώς ενδέχεται προβλέψει αστοχία σε πρόωρο στάδιο.

3. Marciniak-Kuczynski (M-K) Criterion: Κριτήριο αστάθειας που προβλέπει τα όρια μορφοποίησης λεπτών ελασμάτων. Βασίζεται στην υπόθεση μικρών διαταραχών στο πάχος του υλικού και την σύγκριση του ρυθμού παραμόρφωσης εντός της ατέλειας με το ρυθμό παραμόρφωσης σε ιδανικές συνθήκες (χωρίς αυτή). Το κριτήριο επιχειρεί να προσομοιάσει τον ρεαλιστικό μηχανισμό δημιουργίας λαιμού σε κάποια ευαίσθητη διατομή, όμως απαιτεί τον προσδιορισμό αρκετών παραμέτρων και ενέχει πολυπλοκότητα και μεγάλο υπολογιστικό κόστος. Επίσης, δεν συναντάται συχνά στην βιβλιογραφία.

4. Müschenborn-Sonne Forming Limit Diagram (MSFLD): Μία υποσχόμενη μορφή κριτηρίου αστάθειας FLD, η οποία λαμβάνει υπόψη την πορεία της παραμόρφωσης ("strain path") και όχι μόνο τις μεμονωμένες τιμές σε κάθε υπολογιστικό βήμα, όπως το FLD. Συνεπώς, το κριτήριο πληρείται σε περιπτώσεις, όπου, η καμπύλη (ε_1, ε_2) κατά την φόρτιση τέμνει το οριακό διάγραμμα, μεταξύ των χρονικών βημάτων. Έτσι, καλύπτει περιπτώσεις αστοχίας που δεν προβλέπονται από το FLD ή MSFLD. Πάρα ταύτα, παραμένει ένα κριτήριο που δεν εφαρμόζεται σε περιπτώσεις καμπτικού φορτίου.

3.3.4 Κριτήριο αστοχίας στην παρούσα εργασία

Πέραν του σωστού προσδιορισμού της καμπύλης του υλικού, το κριτήριο αστοχίας διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στα αποτελέσματα μίας προσομοίωσης, στην οποία η φόρτιση επιφέρει θραύση του υλικού, καθώς ρυθμίζει το επίπεδο της απορροφούμενης ενέργειας από την κατασκευή και την τελική έκταση της ρωγμής. Σε αυτό το σημείο, έχει παρουσιαστεί το θεωρητικό υπόβαθρο και το πεδίο εφαρμογής μερικών από τα δημοφιλέστερα κριτήρια αστοχίας, έχουν συνοψιστεί οι εντυπώσεις των ερευνητών από την εμπειρία χρήσης των κριτηρίων αυτών και έχουν παρατεθεί οι διαθέσιμες εναλλακτικές του λογισμικού, που χρησιμοποιείται κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Έχοντας ολοκληρώσει αυτά, μπορεί να ληφθεί η καλύτερη πληροφορημένη απόφαση για τη μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί στην συγκεκριμένη εφαρμογή.

Με βάση όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, το κριτήριο που επιλέχθηκε είναι το Ductile Damage του ABAQUS CAE, ένα κριτήριο με βάση την ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση.

Η επίδραση της τριαξονικότητας στην τιμή της κρίσιμης παραμόρφωσης λήφθηκε υπόψη μέσω της συνάρτησης f(η) που περιλαμβάνεται στο κριτήριο RTCL. Μάλιστα, επειδή στα πειράματα τα οποία μοντελοποιούνται [8] - θα περιγραφούν εκτενέστερα στο Κεφάλαιο 4 – οι τάσεις είναι κυρίως μεμβρανικές/καμπτικές και η θραύση επέρχεται υπό συνθήκες διαξονικού εφελκυσμού (1/3<η<2/3, σε κάθε επίπεδο κατά το πάχος των στοιχείων κελύφους), χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση f(η) που αφορά την περιοχή Rice-Tracey. Η τιμή της κρίσιμης παραμόρφωσης αστοχίας για $\eta \leq 1/3$ παραμένει σταθερή. Η ρύθμιση της παραμέτρου αστοχίας του κριτηρίου, που εξαρτάται από το υλικό, γίνεται μέσω της κρίσιμης ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης σε συνθήκες μονοαξονικού εφελκυσμού, για το εκάστοτε υλικό και μέγεθος στοιχείου, η οποία εντοπίζεται μέσω της

μοντελοποίησης του πειράματος εφελκυσμού και της διαδικασίας αντίστροφης μηχανικής. Η συμμετοχή του ρυθμού παραμόρφωσης στο προκείμενο κριτήριο αστοχίας αμελείται, στην παρούσα διπλωματική εργασία. Η συνθήκη αστοχίας, δηλαδή, περιγράφεται από την Εξ. 3-47. Η συγκεκριμένη μορφή του κριτηρίου αστοχίας αναφέρεται, επίσης, στην διδακτορική διατριβή του Jesper [27]. (Όλες οι παραμορφώσεις που αναγράφονται στους τύπους είναι ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις).

$$F(\eta) * \varepsilon_{eq,fr}^{pl}(\eta) \geq 1 => \varepsilon_{eq,fr}^{pl}(\eta) \geq \frac{1}{F(\eta)} = \frac{\varepsilon_{eq,fr}^{pl}\left(\eta = \frac{1}{3}\right)}{f(\eta)}$$

$$f(\eta) = \begin{cases} 1, & \eta \leq 1/3 \\ exp\left(\frac{3\eta - 1}{2}\right), & \eta > 1/3 \end{cases}$$

Εξ. 3-47

Όπως αναφέρθηκε στο εδάφιο 3.3.3, το κριτήριο Ductile Damage του ABAQUS χρησιμοποιεί ολοκλήρωση, ως προς την ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση (Εξ. 3-46). Με τη χρήση, λοιπόν, της συνάρτησης τριαξονικότητας, για τον ορισμό της κρίσιμης ισοδύναμης παραμόρφωσης, το κριτήριο, τελικά, παίρνει την γνωστή μορφή, κατά τον τρόπο που φαίνεται στην Εξ. 3-48.

$$\int \frac{d\varepsilon_{eq}}{\varepsilon_{eq,fr}^{pl}(\eta)} \geq 1 => \int \frac{f(\eta)\, d\varepsilon_{eq,fr}^{pl}}{\varepsilon_{eq,fr}^{pl}\left(\eta = \frac{1}{3}\right)} \geq 1$$

$$=> \int f(\eta) d\varepsilon_{eq} \geq \varepsilon_{eq,fr}^{pl}\left(\eta = \frac{1}{3}\right) => \int f(\eta) d\varepsilon_{eq,fr}^{pl} \geq D_{cr}$$

Εξ. 3-48

Με τη βοήθεια της Εξ. *3-47*, υπολογίζονται τα ζεύγη (η, $\varepsilon_{eq,f}$) για την περιοχή $-1/3 < \eta < 2/3$, τα οποία δίνονται ως είσοδοι στο πεδίο Damage Initiation του Abaqus. Όταν πληρείται η συνθήκη αστοχίας σε ένα επίπεδο κατά το πάχος του πεπερασμένου στοιχείου, η ζημιά εξελίσσεται με τον τρόπο που υπαγορεύει η ρύθμιση Damage Evolution, έως τη θραύση (εδάφιο 3.2.2). Όπως προαναφέρθηκε, όταν ένα επίπεδο φτάσει την παραμόρφωση θραύσης, παύει να συμμετέχει στην παραλαβή του φορτίου. Το πεπερασμένο στοιχείο διαγράφεται μετά την θραύση όλων των επιπέδων κατά το πάχος.

Μία εύλογη απορία που ενδεχομένως έχει δημιουργηθεί στον αναγνώστη είναι η εξής: πως η συνάρτηση τριαξονικότητας του κριτηρίου Rice-Tracey, το οποίο είναι ένα κατ' εξοχήν κριτήριο θραύσης, χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη του σημείου στο οποίο συμβαίνει η έναρξη της αστοχίας και ακολουθείται από Damage Evolution; Η απάντηση δίνεται από τον τρόπο που καλιμπράρεται το κριτήριο. Η τιμή της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης σε συνθήκες μονοαξονικού εφελκυσμού, η οποία λειτουργεί ως παράμετρος υλικού και έχει βρεθεί από την μοντελοποίηση του πειράματος εφελκυσμού, αφορά επίσης το σημείο στο οποίο ξεκινά η αστοχία και όχι το σημείο θραύσης. Η συνάρτηση Rice-Tracey, λοιπόν, συμβάλλει στον μετασχηματισμό που χρειάζεται να γίνει

για διαφορετικές συνθήκες εντατικής κατάστασης, του ίδιου μεγέθους - ίδια φυσική σημασία. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο υποκεφάλαιο, το Damage Initiation μοντελοποιεί την εκκίνηση του μηχανισμού αστοχίας και το Damage Evolution την εξέλιξή του. Ένα ερώτημα το οποίο εγείρεται σε αυτό το σημείο είναι το εξής: αντιπροσωπεύει ο μηχανισμός όλκιμης θραύσης, ο οποίος προσομοιώνεται με την συγκεκριμένη μοντελοποίηση, όλο το εύρος τριαξονικότητας σε συνθήκες επίπεδης τάσης; Η απορία καλύπτεται, αν υπενθυμιστεί η παρατήρηση του Μαρινάτου [23], δηλαδή ότι το κυρίαρχο εύρος τριαξονικότητας το οποίο ενδιαφέρει κατά την μοντελοποίηση συγκρούσεων και προσαράξεων πλοίων είναι μεταξύ συνθηκών μονοαξονικού και διαξονικού εφελκυσμού, όπου ο μηχανισμός όλκιμης θραύσης είναι ο ίδιος.

Σχετικά με την επιρροή του μεγέθους του πεπερασμένου στοιχείου στην κρίσιμη τιμή ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης, αυτή λαμβάνεται υπόψη με την μοντελοποίηση του πειράματος εφελκυσμού ξεχωριστά για κάθε μέγεθος στοιχείου, που χρησιμοποιείται κατόπιν στην κύρια προσομοίωση. Εφόσον δεν προγραμματίζεται κατάλληλη υπορουτίνα που να επικοινωνεί με το λογισμικό ABAQUS, ο νόμος συσχέτισης κρίσιμης παραμόρφωσης (“fracture scaling law”) δεν μπορεί να εισαχθεί με μία συνάρτηση $\varepsilon_f(l_e)$, όπως γίνεται στην βιβλιογραφία. Στο Damage Initiation του ABAQUS, ακόμη και για τα κριτήρια που βασίζονται στην ισοδύναμη παραμόρφωση, δεν υπάρχει πεδίο για το χαρακτηριστικό μήκος του πεπερασμένου στοιχείου, όπως υπάρχει για την τριαξονικότητα και το ρυθμό παραμόρφωσης. Συνεπώς, σε ένα μοντέλο ABAQUS με διαφορετικές πυκνότητες πλέγματος κατά τόπους, το υλικό μοντελοποιείται ξεχωριστά για κάθε μέγεθος στοιχείου (όπως θα αναλυθεί σε επόμενο Κεφάλαιο).

Τα αποτελέσματα των κύριων προσομοιώσεων (καμπύλη δύναμης-μετατόπισης και μορφή αστοχίας) συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν εάν αγνοούταν η επίδραση της τριαξονικότητας. Παρατηρήθηκε, ότι, σε κάποιες περιπτώσεις, η μορφή αστοχίας του πειράματος μπορούσε να προβλεφθεί από το μοντέλο μόνο εάν χρησιμοποιούταν η συνάρτηση Rice-Tracey. Σε κάθε περίπτωση, όπως θα φανεί, η μέθοδος είναι πολύ εύκολη στον προγραμματισμό και έχει μικρό υπολογιστικό κόστος.

Συνοψίζοντας, η μέθοδος εφαρμογής του κριτηρίου θραύσης απαρτίζεται από τα παρακάτω βήματα:

1. Μοντελοποίηση πειράματος εφελκυσμού, για κάθε μέγεθος πεπερασμένου στοιχείου που θα χρησιμοποιηθεί στην κύρια προσομοίωση και εντοπισμός της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης στο σημείο έναρξης της αστοχίας με αντίστροφη μηχανική.
2. Χρήση της τιμής αυτής στην ρύθμιση του κριτηρίου αστοχίας, για το συγκεκριμένο μέγεθος πεπερασμένου στοιχείου και εύρεση της καμπύλης τριαξονικότητας - ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης με την Εξ. 3-47, για $\eta>1/3$.
3. Εισαγωγή της καμπύλης σε πινακοποιημένη μορφή στο Damage Initiation του ABAQUS και συμπλήρωση των κελιών «Strain Rate» με την τιμή 0.
4. Η διαδικασία προσδιορισμού του Damage Evolution περιγράφτηκε στο εδάφιο 3.2.2.

3.4 Προσομοίωση πειράματος εφελκυσμού στο ABAQUS

Στα προηγούμενα υποκεφάλαια, περιγράφτηκε αναλυτικά η μεθοδολογία προσδιορισμού του μοντέλου του υλικού, το οποίο αποτελείται από την πραγματική καμπύλη τάσης παραμόρφωσης και το κριτήριο αστοχίας. Όπως αναφέρθηκε, αν η πραγματική καμπύλη τάσης παραμόρφωσης του υλικού δεν είναι γνωστή από μετρήσεις που έχουν προκύψει από καταστρεπτικές δοκιμές, ο μελετητής χρειάζεται να μοντελοποιήσει το πείραμα εφελκυσμού σε κάποιο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων και να χρησιμοποιήσει αντίστροφη μηχανική, για να αντλήσει τα απαραίτητα δεδομένα. Σε αυτό το υποκεφάλαιο, αναφέρονται οι παράμετροι προσομοίωσης του πειράματος εφελκυσμού στο πρόγραμμα ABAQUS CAE, όπως αυτή έγινε στην παρούσα εργασία και κατόπιν παρατίθεται το μοντέλο των υλικών που ενδιαφέρουν για τις προσομοιώσεις των πειραμάτων - που θα ακολουθήσουν στο επόμενο κεφάλαιο.

3.4.1 Παράμετροι προσομοίωσης πειράματος εφελκυσμού

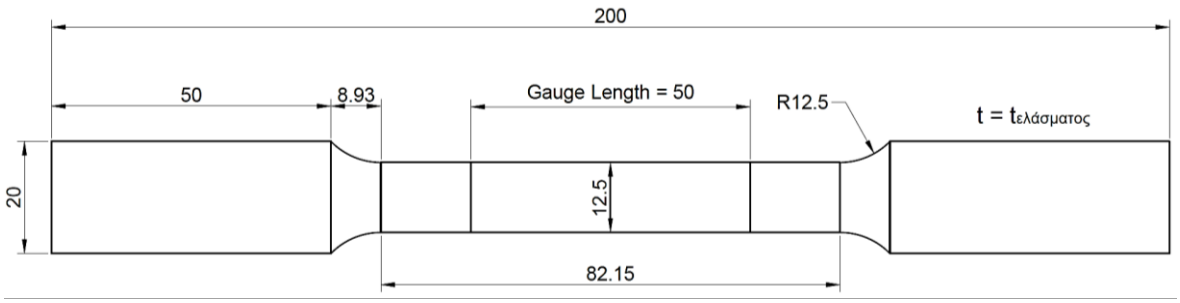
Χρονική διακριτοποίηση

Το ABAQUS προσφέρει δύο επιλογές σε μεθόδους χρονικής διακριτοποίησης: την άμεση μέθοδο, ABAQUS/Explicit, και την έμμεση μέθοδο (implicit), ABAQUS/Standard. Στην άμεση μέθοδο, η λύση για το επόμενο χρονικό βήμα υπολογίζεται με δεδομένα από το προηγούμενο, ενώ στην έμμεση μέθοδο χρειάζεται ολοκλήρωση και συνεπώς απαιτούνται μεγαλύτεροι υπολογιστικοί χρόνοι και μνήμη. Η επίλυση της εξίσωσης κίνησης με την έμμεση μέθοδο απαιτεί την αναστροφή του μητρώου ακαμψίας, το οποίο υπολογίζεται σε κάθε χρονικό βήμα, ενώ με την άμεση μέθοδο απαιτείται η αναστροφή του μητρώου μάζας, το οποίο είναι σταθερό στο χρόνο, επομένως η αναστροφή του γίνεται εφάπαξ. Η άμεση μέθοδος χρειάζεται συνήθως αυξημένο αριθμό χρονικών βημάτων, παρόλα αυτά η ταχύτητά της την καθιστά ελκυστική. Σε ψευδο-στατικά προβλήματα, το εγχειρίδιο χρήσης του ABAQUS [20] δεν διακρίνει κάποια μέθοδο διακριτοποίησης ως καλύτερη, μεταξύ της έμμεσης και άμεσης. Απεναντίας, σε προβλήματα που εμπεριέχουν επαφή μεταξύ σωμάτων, η άμεση διακριτοποίηση θεωρείται μονόδρομος. Η έμμεση διακριτοποίηση είναι πιο αποτελεσματική στην επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων. Στην προσομοίωση του πειράματος εφελκυσμού, όπου το πρόβλημα δεν είναι σύνθετο και ο υπολογιστικός χρόνος περιορισμένος (περίπου 1 λεπτό), επιλέχθηκε η έμμεση μέθοδος χρονικής διακριτοποίησης (Implicit Analysis) με το ABAQUS/Standard.

Γεωμετρία δοκιμίου εφελκυσμού

Δοκίμια εφελκυσμού κατασκευάζονται σε πολλά μεγέθη και σχήματα. Στην παρούσα εργασία το δοκίμιο εφελκυσμού της προσομοίωσης οφείλει να έχει ορθογώνια διατομή, καθώς πρέπει να προσομοιάσει την συμπεριφορά των λεπτών ελασμάτων που συμμετέχουν στα πειράματα. Το πάχος του δοκιμίου ισούται κάθε φορά με το πάχος του

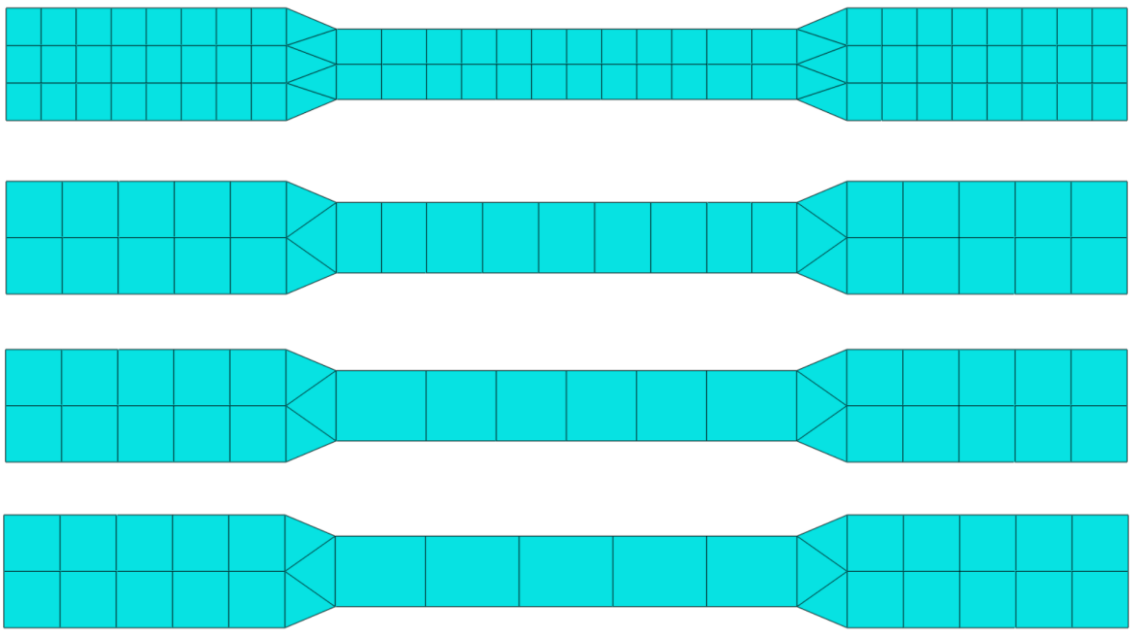
ελάσματος, του οποίου το υλικό εξετάζεται. Η γεωμετρία του δοκιμίου εφελκυσμού ταυτίζεται με αυτήν που χρησιμοποίησε ο Μαρινάτος [23] και φαίνεται στο Σχήμα 3-18.



Σχήμα 3-18: Γεωμετρία δοκιμίου εφελκυσμού

Χωρική διακριτοποίηση

Για την προσομοίωση του πειράματος εφελκυσμού χρησιμοποιούνται ίδια στοιχεία με αυτά που θα οριστούν στην προσομοίωση των πειραμάτων κρούσης, δηλαδή στοιχεία Belytschko-Lin-Tsay της βιβλιοθήκης Explicit (τετρακομβικά στοιχεία κελύφους, μειωμένης ολοκλήρωσης, με πέντε στρώσεις κατά το πάχος), με διπλή ακρίβεια. Το πάχος που ανατίθεται στα στοιχεία κελύφους ταυτίζεται με το πάχος του ελάσματος από το εκάστοτε υλικό που μοντελοποιείται και συμμετέχει στα πειράματα κρούσης των Alsos και Amdahl [7]. Η διατομή είναι ομογενής (Shell, Homogenous).



Σχήμα 3-19: Διακριτοποίηση δοκιμίου εφελκυσμού με στοιχεία χαρακτηριστικού μήκους 6.25, 10, 12.5, 15 mm (από πάνω προς τα κάτω) στην περιοχή του επιμηκυνσιομέτρου (gauge length)

Όπως εξηγήθηκε στην πορεία του κεφαλαίου, το μοντέλο για το ίδιο υλικό διαφέρει ανάλογα με το μέγεθος του πεπερασμένου στοιχείου, εξαιτίας της επιρροής του μεγέθους αυτού στην τιμή της πραγματικής παραμόρφωσης, μετά το όριο αντοχής. Στην παρούσα μελέτη, οι προσομοιώσεις των πειραμάτων εκτελούνται για τέσσερα διαφορετικά χαρακτηριστικά μεγέθη πεπερασμένων στοιχείων, le= 6.25mm, 10mm, 12.5mm και 15mm , ώστε να ελεγχθεί η επίδραση στα αριθμητικά αποτελέσματα και η σύγκλιση. Στο Σχήμα 3-19 φαίνεται η διακριτοποίηση του δοκιμίου με διαφορετικά μεγέθη πεπερασμένων στοιχείων και στον Πίνακας 3-1 φαίνονται οι ακριβείς διαστάσεις των στοιχείων, για κάθε χαρακτηριστικό μήκος.

Πίνακας 3-1: Χαρακτηριστικά μήκη πεπερασμένων στοιχείων προσομοιώσεων

	$le = \sqrt{l * w}$			
Ονομαστικό Χαρακτηριστικό Μήκος	6.25	10	12.5	15
Διαστάσεις Πεπερασμένου Στοιχείου στην Μοντελοποίηση του Πειράματος Εφελκυσμού (l x w)	6.25 x 6.25	10 x 12.5	12.5 x 12.5	16.67 x 12.5

Οριακές συνθήκες

Το δοκίμιο πακτώνεται στο αριστερό άκρο του και στο δεξί άκρο του επιβάλλεται μετατόπιση (50mm), ομοιόμορφη κατά το πάχος και με σταθερό ρυθμό.

Ρυθμίσεις Step και Job

Καθώς το φορτίο επιβάλλεται αυξανόμενο με αργό ρυθμό στο πείραμα εφελκυσμού, η ανάλυση μπορεί να γίνει ψεύδο-στατικά, δηλαδή να αμεληθούν οι όροι της αδράνειας και της απόσβεσης των εξισώσεων. Το βήμα (step) που επιλέγεται είναι, λοιπόν, “Static, General” και εφαρμόζεται αυτόματη σταθεροποίηση, ώστε να εξαλειφθούν τυχόν αριθμητικές αστάθειες, που οφείλονται στην παράλειψη της απόσβεσης. Στο τέλος της ανάλυσης, θα πρέπει να συγκριθεί η χρονική ιστορία της κινητικής ενέργειας με τη χρονική ιστορία της εσωτερικής ενέργειας, ώστε να διασφαλιστεί ότι τα δυναμικά φαινόμενα όντως είναι αμελητέα (μέγιστη τιμή κινητικής ενέργειας < 5% μέγιστης τιμής εσωτερικής ενέργειας). Επιλέγεται, ακόμη, η ρύθμιση Nlgeom (Nonlinear Geometry), ώστε το πρόγραμμα να μην θεωρήσει ότι μεγάλες παραμορφώσεις των στοιχείων σε κάθε χρονικό βήμα δεν είναι αριθμητικό σφάλμα.

Η έμμεση διακριτοποίηση είναι σταθερή για οποιοδήποτε μέγεθος χρονικού βήματος (unconditionally stable). Γι’ αυτό το λόγο το χρονικό βήμα δεν ρυθμίζεται βάσει σύγκλισης της μεθόδου αλλά βάσει της επιθυμητής ακρίβειας. Για την επιλογή του μεγέθους του βήματος επιλέγεται ο αυτόματος τρόπος. Ο χρήστης ορίζει ένα αρχικό, ένα

ελάχιστο και ένα μέγιστο χρονικό βήμα καθώς και ένα μέγιστο αριθμό βημάτων που θα χρησιμοποιήσει το πρόγραμμα. Για τη μοντελοποίηση του πειράματος εφελκυσμού οι περιορισμοί που τέθηκαν στο χρονικό βήμα φαίνονται στην Εξ. 3-49. Ο επιλύτης χρησιμοποιεί άμεση μέθοδο Newton (Direct Newton).

$$Max.Num.of\ Inc. = 10^5, Initial\ Inc. = 10^{-3},$$
$$Min\ Inc. = 10^{-20}, Max\ Inc. = 10^{-3} \qquad \text{Εξ. 3-49}$$

Στο "Job" γίνεται η ρύθμιση "Submission: Full Analysis" και "Precision: Full". Η πλήρης ακρίβεια (full precision) σχετίζεται με τον αριθμό των δεκαδικών ψηφίων των μεγεθών που αποθηκεύει το πρόγραμμα.

Έξοδοι (Field Outputs και History Outputs)

Field Outputs είναι οι έξοδοι που αφορούν δεδομένα που είναι χωρικά κατανεμημένα σε ολόκληρο το μοντέλο ή ένα τμήμα του και μπορούν να οπτικοποιηθούν με χρωματική αναπαράσταση ισοϋψών περιοχών (colour contour στο Visualization Module). Ο όγκος των δεδομένων αυτών είναι μεγάλος και γι αυτό ζητείται από το πρόγραμμα να τα αποθηκεύει με χαμηλό ρυθμό (λίγες χρονικές στιγμές κατά την προσομοίωση). Τα History Outputs είναι μεγέθη των οποίων η χρονική ιστορία αποθηκεύεται με μεγαλύτερο ρυθμό, ζητούνται σε κάποια συγκεκριμένα σημεία ή ομάδες σημείων στο μοντέλο και αξιοποιούνται ευκολότερα για τη δημιουργία διαγραμμάτων .

Στην προσομοίωση του πειράματος εφελκυσμού, ζητείται από το πρόγραμμα να αναπαραστήσει την κατανομή της ισοδύναμης τάσης (Stresses>MISES) και πλαστικής παραμόρφωσης (Strains>PEEQ) κατά Mises σε όλο το μοντέλο (Domain: Whole Model). Για να λειτουργήσει η εντολή διαγραφής των πεπερασμένων στοιχείων τα οποία έχουν αστοχήσει πρέπει, επίσης, οπωσδήποτε να επιλεχθούν οι μεταβλητές "Failure/Fracture>SDEG" και "State/Field/User/Time>STATUS". Για την παραγωγή της πειραματικής καμπύλης εφελκυσμού, ζητείται η χρονική ιστορία της μετατόπισης των άκρων του επιμηκυνσιομέτρου (Gauge Length, Σχήμα 3-18) και η αξονική δύναμη αντίστασης στο δεξί άκρο. Για τον υπολογισμό του αθροίσματος της δύναμης από όλους τους κόμβους του δεξιού άκρου γίνεται κινηματική σύζευξή τους σε ένα σημείο ελέγχου που βρίσκεται στο μέσο του πλάτους και η χρονική ιστορία μετράται εκεί (Constraints>Coupling, Coupling type>Kinematic, Constrained degrees of freedom> όλοι). Ακόμη, ζητείται η χρονική ιστορία της εσωτερικής (ALLIE) και κινητικής ενέργειας (ALLKE) όλου του δοκιμίου, για να ελεγχθεί η καταλληλότητα της παραδοχής του ψεύδο-στατικού προβλήματος.

Εύρεση πειραματικής καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης

Η χρονική ιστορία της πειραματικής τάσης υπολογίζεται μέσω της δύναμης που εφαρμόζεται στην κεντρική διατομή του δοκιμίου, από την Εξ. 3-50 και η χρονική ιστορία

της πειραματικής παραμόρφωσης υπολογίζεται μέσω της μετατόπισης των άκρων του επιμηκυνσιομέτρου, από την Εξ. 3-51.

$$\sigma_{eng}(t) = \frac{F(t)}{w * t} = \frac{F(t)}{12.5\,mm * t_{material}} \qquad \text{Εξ. 3-50}$$

$$\varepsilon_{eng}(t) = \frac{\Delta l(t)}{gauge\ length} = \frac{u_{right}(t) - u_{left}(t)}{50mm} \qquad \text{Εξ. 3-51}$$

Οι χρονικές ιστορίες αποθηκεύονται από το Visualization Module με την εντολή Create XY Date> ODB history output. Η καμπύλη πειραματικής τάσης – πειραματικής παραμόρφωσης εξάγεται με τη σύνθεση των δύο χρονικών ιστοριών : Create XY Date> Operate on XY data και την συνάρτηση combine(X,X).

3.4.2 Αποτελέσματα διαδικασίας αντίστροφης μηχανικής

Στις παρακάτω σελίδες, αναγράφονται τα αριθμητικά αποτελέσματα της διαδικασίας αντίστροφης μηχανικής, εύρεσης της πραγματικής καμπύλης, για τα υλικά των ελασμάτων που συμμετέχουν στα πειράματα που θα προσομοιωθούν στο επόμενο κεφάλαιο. Τα ελάσματα, από τα οποία είναι κατασκευασμένα η πειραματική διάταξη αυτή, είναι δύο υλικών και παχών:

1) Έλασμα πάχους 5 mm από χάλυβα με όριο διαρροής 285 MPa που ανήκει στην κατηγορία S235JR EN10025 (Υλικό 1), και
2) Έλασμα πάχους 6 mm από χάλυβα με όριο διαρροής 340 MPa που ανήκει στην κατηγορία S235JR EN10025 (Υλικό 2).

Το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα είναι E = 206 GPa και ο λόγος Poisson 0.3.

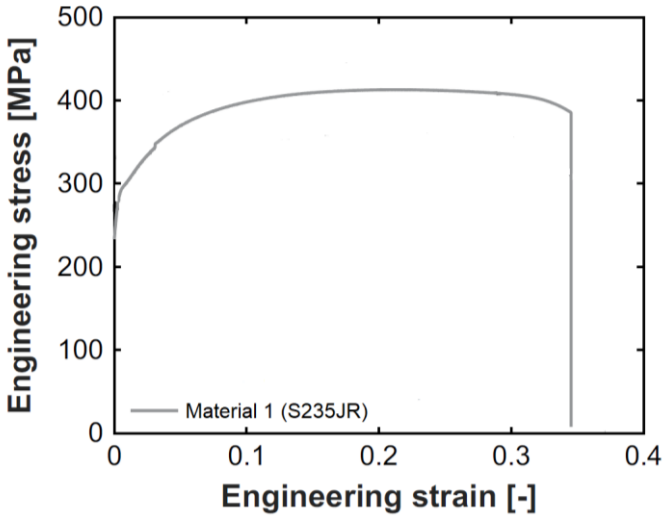
Οι Alsos και Amdahl [7] έκοψαν δύο δοκίμια από κάθε κομμάτι ελάσματος που χρησιμοποίησαν στα πειράματα, ένα κατά τη διεύθυνση έλασης και ένα κάθετα σε αυτήν, και εκτέλεσαν τεστ εφελκυσμού. Σημειώνουν, πως ο χάλυβας των ελασμάτων είναι προϊόν θερμομηχανικής έλασης και συνεπώς η ανισοτροπία ιδιοτήτων μπορεί να αμεληθεί (σε σχέση, για παράδειγμα, με προϊόντα ψυχρής έλασης). Ωστόσο, οι μηχανικές ιδιότητες τμημάτων ελασμάτων που συνοδεύονται από το ίδιο πιστοποιητικό υλικού, διαφέρουν σημαντικά (100 MPa στο όριο διαρροής, δηλαδή +30% διαφορά από την προδιαγραφή), γεγονός που, μάλλον, οφείλεται στην εισαγωγή, στην παρτίδα αυτή, ελασμάτων χάλυβα που απέτυχαν να ικανοποιήσουν, λόγω κάποιου χαρακτηριστικού, την αμέσως ανώτερη προδιαγραφή (πχ. S355JR EN10025). Οι διαφορές αυτές εισάγουν αβεβαιότητες στο πείραμα και τα αποτελέσματά του, αντικείμενο που έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές, όπως οι Hogström και Ringsberg [3]. Ο προσδιορισμός της ακριβούς πειραματικής καμπύλης είναι πολύ κρίσιμος για την μελέτη της φόρτισης έως τη θραύση, όπου η ενέργεια παραμόρφωσης που μπορεί να απορροφήσει το υλικό (το εμβαδόν κάτω από

την πραγματική καμπύλη) είναι καθοριστικής σημασίας για την πρόβλεψη της τελικής παραμόρφωσης και της μορφής αστοχίας – παρόλο που σε προβλήματα εκτός εργαστηρίου, δεν είναι πάντα γνωστή η ακριβής πειραματική καμπύλη του υλικού. Στη δημοσίευση τους, οι Alsos και Amdahl παραθέτουν, για κάθε έλασμα, πειραματική καμπύλη που αποτελεί το μέσο όρο των δύο καμπυλών - μία για κάθε διεύθυνση.

Παρατίθεται το μοντέλο υλικού για κάθε έλασμα διαδοχικά.

1. Έλασμα t = 5 mm από χάλυβα με σ_Y = 285 MPa πιστοποίησης S235JR EN10025 (Υλικό 1)

Η μέση πειραματική καμπύλη του υλικού του ελάσματος, φαίνεται με γκρι χρώμα στο Σχήμα 3-20. Το διάγραμμα αυτό ψηφιοποιείται και εντοπίζεται το όριο αντοχής που φαίνεται στην Εξ. 3-52. Έως αυτό το σημείο, η πραγματική καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης βρίσκεται από τις Εξ. 2-17 και Εξ. 2-19. Μετά από αυτό το σημείο, η πραγματική καμπύλη του μοντέλου του υλικού εξαρτάται από το χαρακτηριστικό μέγεθος του πεπερασμένου στοιχείου. Στον Πίνακας 3-2 φαίνονται οι τελικές τιμές των παραμέτρων που περιγράφουν την πραγματική καμπύλη του υλικού στην περιοχή μετά το όριο αντοχής και προκύπτουν μέσω της διαδικασίας αντίστροφης μηχανικής. Ο συμβολισμός C/P δηλώνει ότι η πραγματική καμπύλη μετά το όριο αντοχής παρεμβάλλεται μεταξύ της οριζόντιου (constant) και του εκθετικού νόμου (power law).



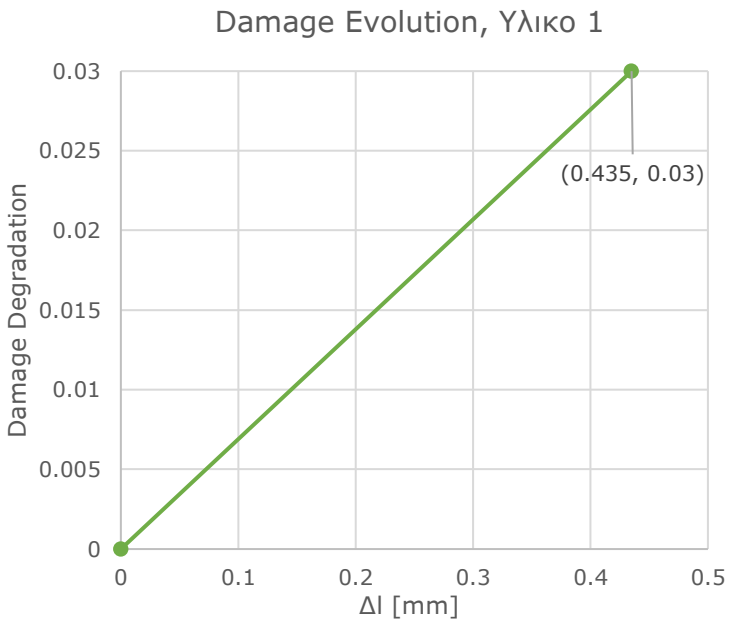
Σχήμα 3-20: Μέση πειραματική καμπύλη υλικού ελάσματος 1

$$\sigma_{eng,ult,1} = 413.310\ MPa \quad \varepsilon_{eng,ult,1} = 0.271 \qquad \text{Εξ. 3-52}$$

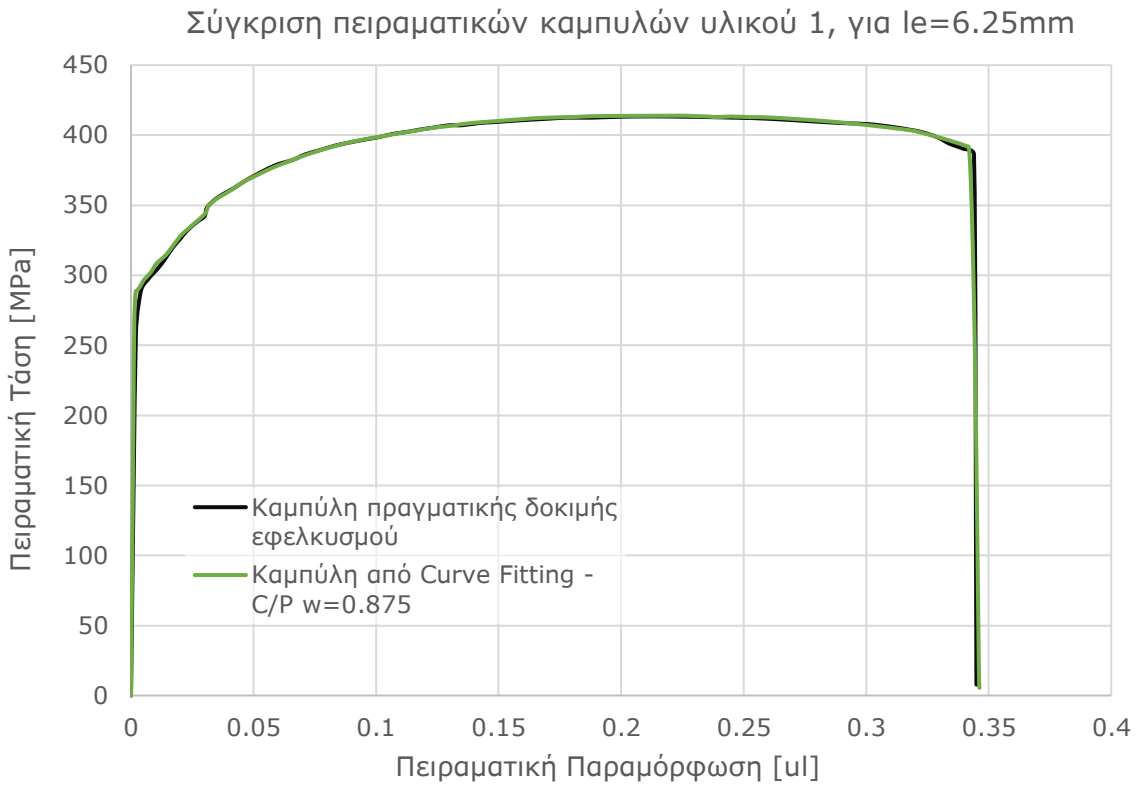
Μετά το σημείο έναρξης της ζημιάς (Damage Initiation), ακολουθεί το Damage Evolution, το οποίο ταυτίζεται για όλα τα χαρακτηριστικά μήκη στοιχείου (υποκεφάλαιο 3.2.2). Για το υλικό του ελάσματος 1, το Damage Evolution εξελίσσεται γραμμικά όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-21. Η τιμή D=0.03 είναι η μέγιστη τιμή Damage Degradation, φτάνοντας στην οποία το πεπερασμένο στοιχείο κελύφους διαγράφεται από το πλέγμα.

Πίνακας 3-2: Παράμετροι ορισμού καμπύλης υλικού ελάσματος 1 για την περιοχή από το όριο αντοχής έως την έναρξη της αστοχίας

Χαρακτηριστικό Μέγεθος Στοιχείου [mm]	Εξίσωση μετά το όριο αντοχής (1)	Πλαστική Παραμόρφωση Damage Initiation (1)
6.25	= C/P Εξ. *3-14* w=0.875, $\varepsilon_{tr,pl} > \varepsilon_{tr,pl}(\sigma_{ult})$	0.3815
10	= C/P Εξ. *3-14* w=0.75, $0.34 > \varepsilon_{tr,pl} > \varepsilon(\sigma_{ult})$ $= \sigma_{true}(0.34), \quad \varepsilon_{tr,pl} \geq 0.34$	0.3650
12.5	= C/P Εξ. *3-14* w=0.685, $0.335 > \varepsilon_{tr,pl} > \varepsilon(\sigma_{ult})$ $= \sigma_{true}(0.335), \quad \varepsilon_{tr,pl} \geq 0.335$	0.3360
15	= C/P Εξ. *3-14* w=0.65, $0.31 > \varepsilon_{tr,pl} > \varepsilon(\sigma_{ult})$ $= \sigma_{true}(0.31), \quad \varepsilon_{tr,pl} \geq 0.31$	0.3335

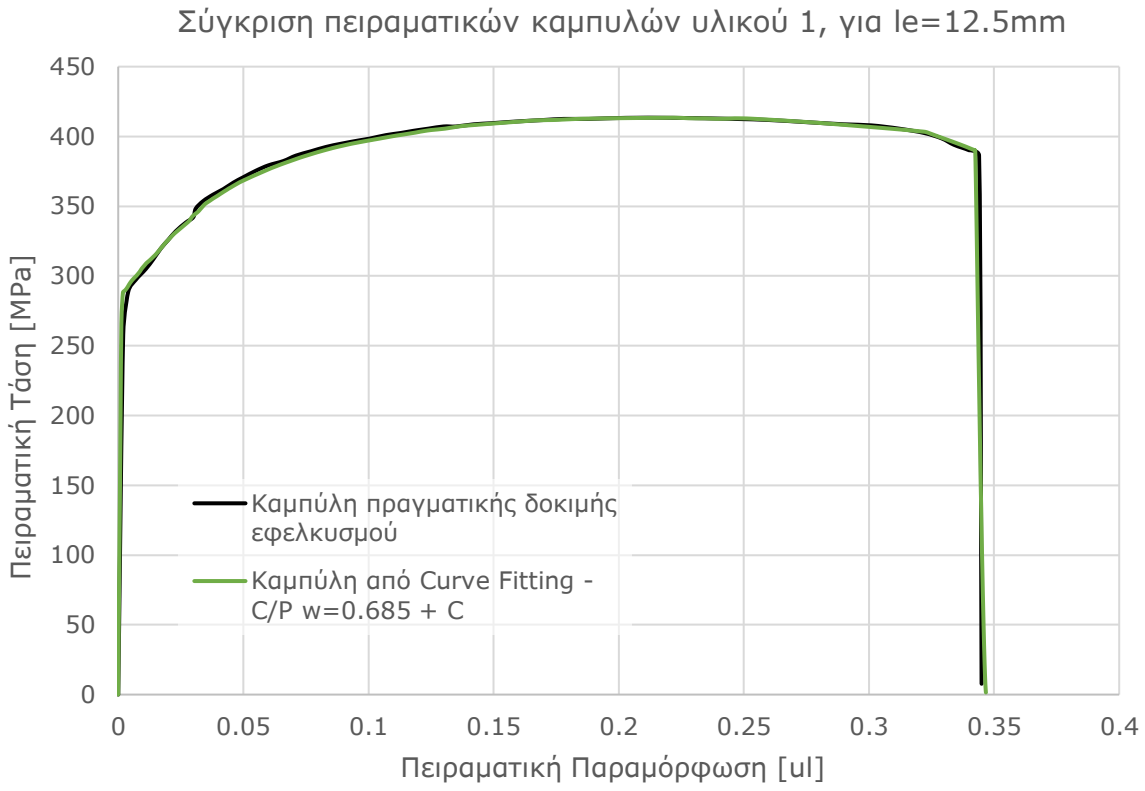


Σχήμα 3-21: Damage Evolution για το μοντέλο υλικού του ελάσματος 1

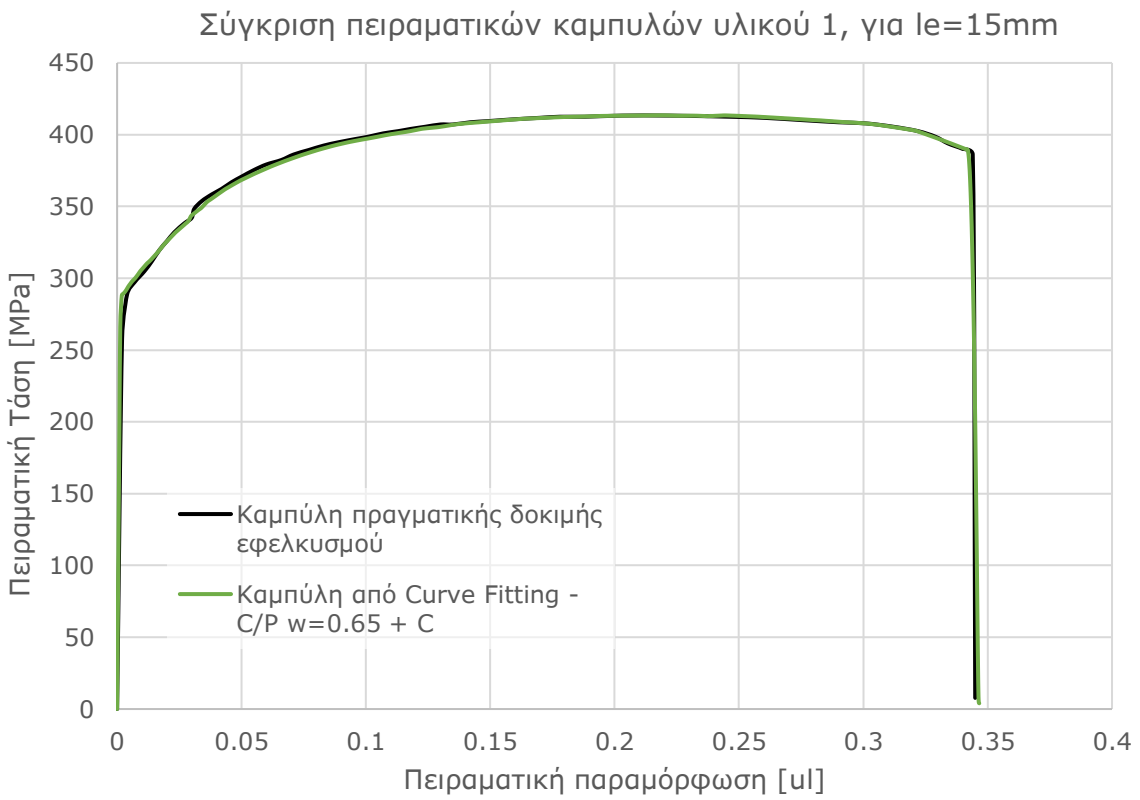


Σχήμα 3-22: Σύγκριση πειραματικών καμπυλών υλικού 1 από πραγματική δοκιμή εφελκυσμού και από την μοντελοποίηση της στο ABAQUS μετά τη διαδικασία αντίστροφης μηχανικής με le=6.25mm

Σχήμα 3-23: Σύγκριση πειραματικών καμπυλών υλικού 1 από πραγματική δοκιμή εφελκυσμού και από την μοντελοποίηση της στο ABAQUS μετά τη διαδικασία αντίστροφης μηχανικής με le=10mm



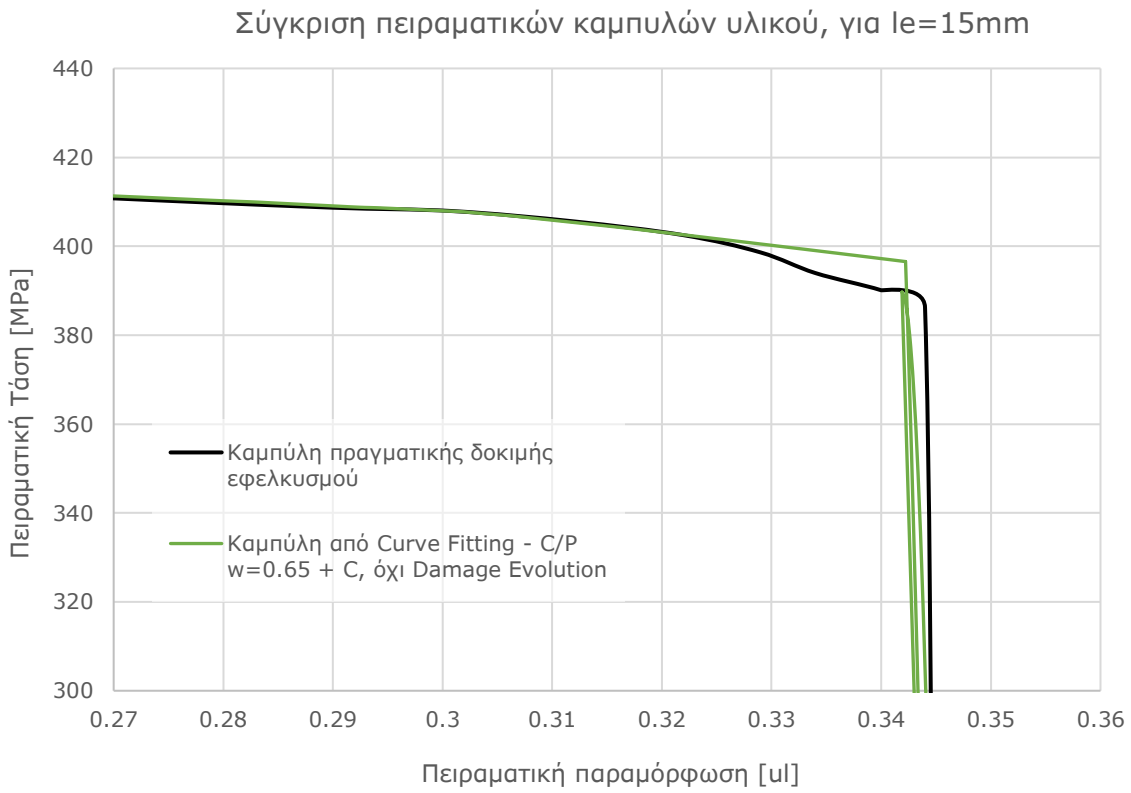
Σχήμα 3-24: Σύγκριση πειραματικών καμπυλών υλικού 1 από πραγματική δοκιμή εφελκυσμού και από την μοντελοποίηση της στο ABAQUS μετά τη διαδικασία αντίστροφης μηχανικής με le=12.5mm



Σχήμα 3-25: Σύγκριση πειραματικών καμπυλών υλικού 1 από πραγματική δοκιμή εφελκυσμού και από την μοντελοποίηση της στο ABAQUS μετά τη διαδικασία αντίστροφης μηχανικής με le=15mm

Στις παρακάτω σελίδες παρατίθεται διαγραμματικά η σύγκριση μεταξύ της πειραματικής καμπύλης του υλικού του ελάσματος 1 και των καμπυλών που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις του πειράματος εφελκυσμού στο ABAQUS, με τα διάφορα χαρακτηριστικά μεγέθη στοιχείου. Όπως φαίνεται, οι παράμετροι που ρυθμίστηκαν μέσω της διαδικασίας αντίστροφης μηχανικής αποτυπώνουν πολύ καλά τη συμπεριφορά του υλικού κατά τη φόρτιση του έως τη θραύση, καθώς η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης, που αποτελεί την έξοδο της προσομοίωσης, συμπίπτει σχεδόν απόλυτα με την πειραματική καμπύλη που δόθηκε από τους Alsos και Amdahl [7].

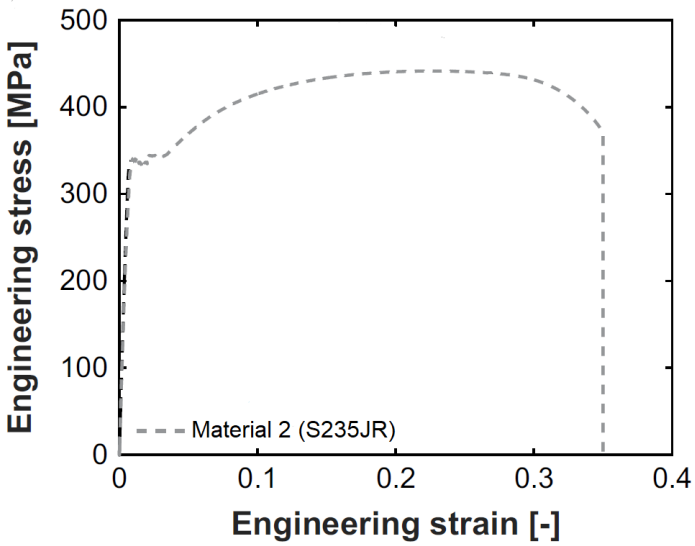
Για να πεισθεί ο αναγνώστης για τη συμβολή της ρύθμισης Damage Evolution στην ακριβή αναπαράσταση της συμπεριφοράς του υλικού κατά την όλκιμη αστοχία, παρατίθεται τμήμα του συγκριτικού διαγράμματος που φαίνεται στο Σχήμα 3-25 στην περίπτωση που δεν αξιοποιηθεί η συγκεκριμένη ρύθμιση, ενώ όλες οι άλλες παράμετροι του μοντέλου παραμένουν αναλλοίωτες (Σχήμα 3-26). Όπως φαίνεται, η κλίση της πειραματικής καμπύλης του μοντέλου υλικού, είναι μεγαλύτερη από την πραγματική πειραματική καμπύλη, ακόμη και για $\sigma = \sigma_{true}(0.31)$ (Πίνακας 3-2) και συνεπώς το μοντέλο υπερεκτιμά την απορροφούμενη ενέργεια παραμόρφωσης. Το σφάλμα δεν είναι, μεν, σημαντικό για ένα υλικό με καμπύλη σχετικά μικρής πτωτικής τάσης, όπως το υλικό 1, όμως είναι πολύ μεγαλύτερο, όταν η πτωτική τάση μετά το όριο αντοχής δεν μπορεί να αναπαρασταθεί, μόνο με την χρήση των εξισώσεων Εξ. 3-13, Εξ. *3-14*, πχ υλικό 2. Επιπλέον, η έλλειψη Damage Evolution οδηγεί στην απότομη διακοπή της καμπύλης υλικού και δημιουργεί αριθμητικές αστάθειες στη λύση κατά την αστοχία του στοιχείου (θόρυβος κοντά στο κατακόρυφο τμήμα της καμπύλης, Σχήμα 3-26).



Σχήμα 3-26: Επίδραση της απουσίας Damage Evolution στο μοντέλο υλικού: αδυναμία σύλληψης πτωτικής τάσης πραγματικής πειραματικής καμπύλης και αριθμητικές αστάθειες

2. Έλασμα t = 6 mm από χάλυβα με σ_Y = 340 MPa πιστοποίησης S235JR EN10025 (Υλικό 2)

Η μέση πειραματική καμπύλη του υλικού του ελάσματος, φαίνεται με την γκρι διακεκομμένη στο Σχήμα 3-27. Το διάγραμμα αυτό ψηφιοποιείται και εντοπίζεται το όριο αντοχής που φαίνεται στην Εξ. 3-53.



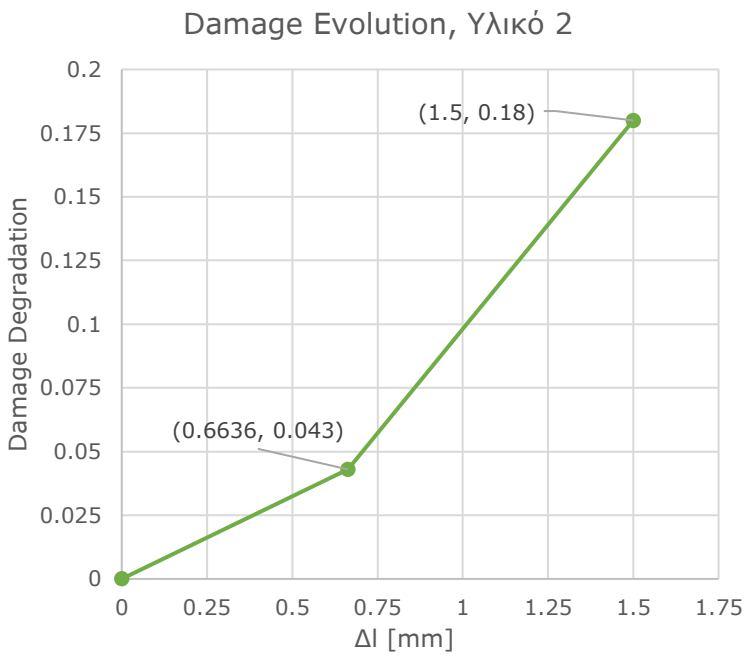
Σχήμα 3-27: Μέση πειραματική καμπύλη υλικού ελάσματος 2

$$\sigma_{eng,ult,2} = 529.947\ MPa \quad \varepsilon_{eng,ult,2} = 0.186 \qquad \text{Εξ. 3-53}$$

Στον Πίνακας 3-3 φαίνονται οι τελικές τιμές των παραμέτρων που περιγράφουν την πραγματική καμπύλη του υλικού στην περιοχή μετά το όριο αντοχής και προκύπτουν μέσω της διαδικασίας αντίστροφης μηχανικής. Ο συμβολισμός P/T δηλώνει ότι η πραγματική καμπύλη μετά το όριο αντοχής παρεμβάλλεται μεταξύ του εκθετικού νόμου (power law) και της εφαπτόμενης ευθείας στο όριο αντοχής (tangent). Για το υλικό του ελάσματος 2, το Damage Evolution εξελίσσεται δι-γραμμικά όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-28, για να μπορέσει να περιγράψει την έντονη πτωτική τάση που εμφανίζεται στην καμπύλη εφελκυσμού του συγκεκριμένου υλικού. Η τιμή D=0.18 είναι η μέγιστη τιμή Damage Degradation, φτάνοντας στην οποία το πεπερασμένο στοιχείο κελύφους διαγράφεται από το πλέγμα.

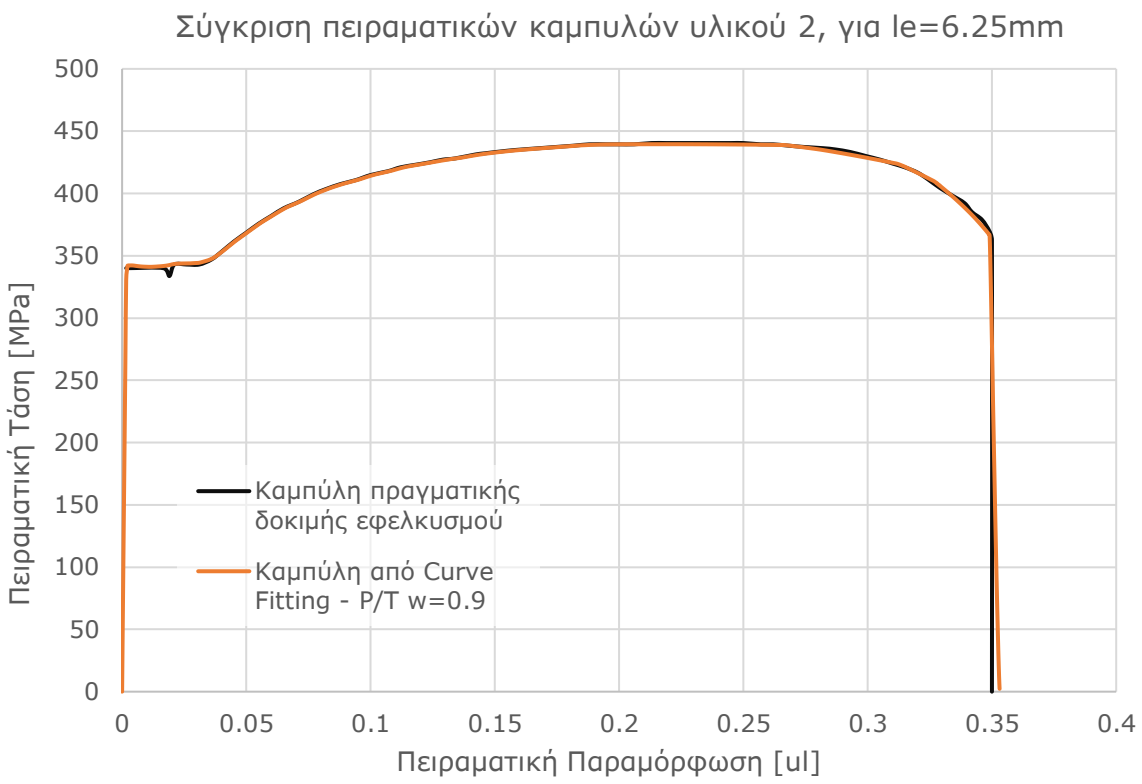
Πίνακας 3-3: Παράμετροι ορισμού καμπύλης υλικού ελάσματος 2 για την περιοχή από το όριο αντοχής έως την έναρξη της αστοχίας

Χαρακτηριστικό Μέγεθος Στοιχείου [mm]	Εξίσωση μετά το όριο αντοχής (2)	Πλαστική Παραμόρφωση Damage Initiation (2)
6.25	= P/T w=0.9 Εξ. 3-13, $\varepsilon_{tr,pl} > \varepsilon_{tr,pl}(\sigma_{ult})$	0.2600
10	= Power-law Εξ. 3-9, $\varepsilon_{tr,pl} > \varepsilon(\sigma_{ult})$	0.3060
12.5	= Power-law Εξ. 3-9, $\varepsilon_{tr,pl} > \varepsilon(\sigma_{ult})$	0.2865
15	= Power-law Εξ. 3-9, $\varepsilon_{tr,pl} > \varepsilon(\sigma_{ult})$	0.2850

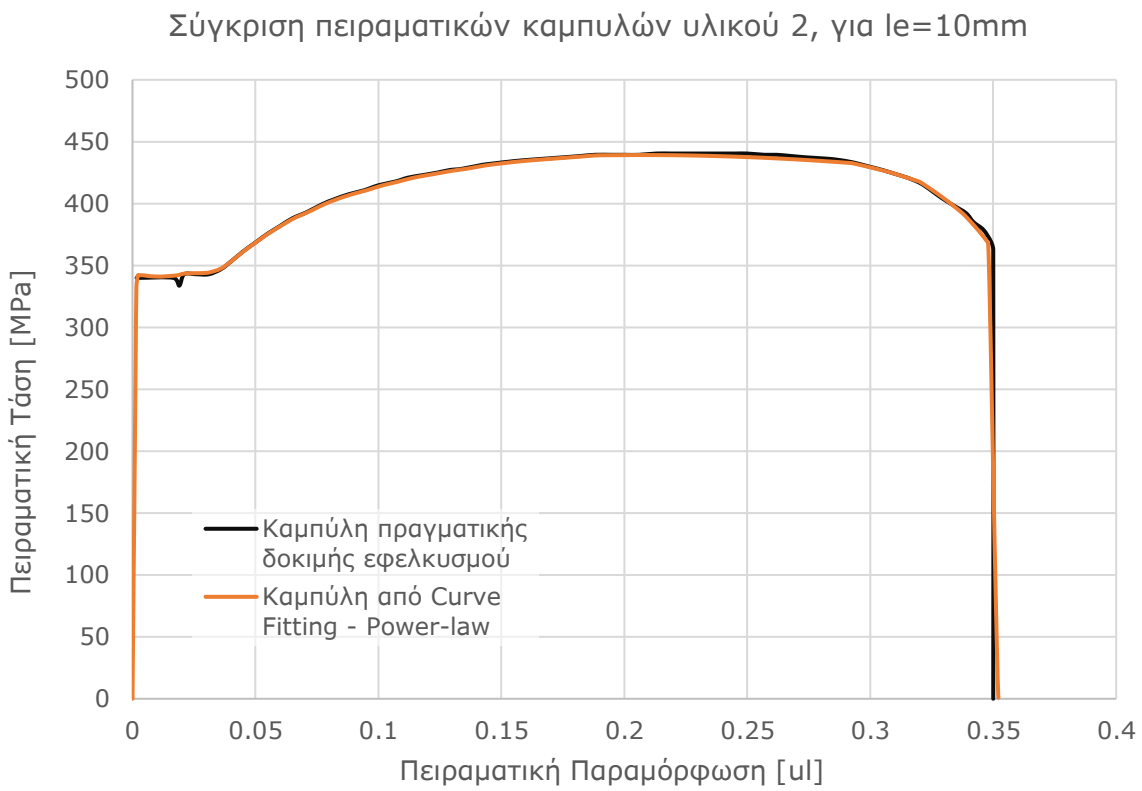


Σχήμα 3-28: Damage Evolution για το μοντέλο υλικού του ελάσματος 2

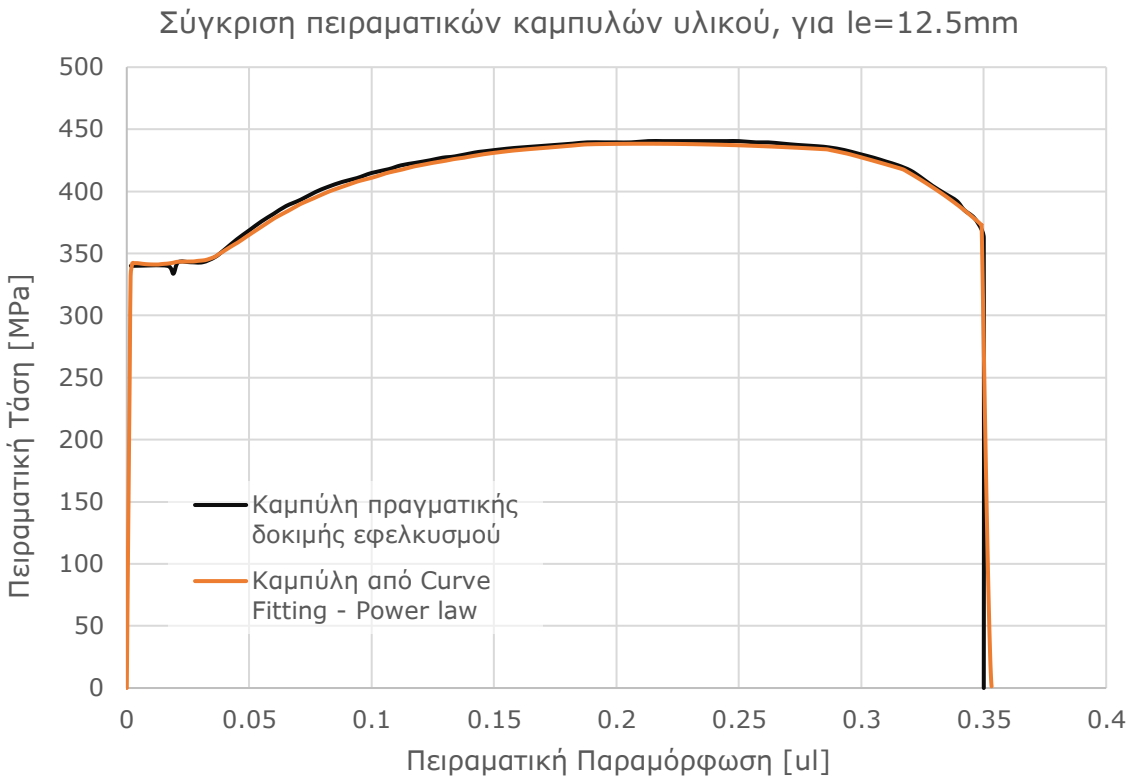
Στις παρακάτω σελίδες παρατίθεται διαγραμματικά η σύγκριση μεταξύ της πειραματικής καμπύλης του υλικού του ελάσματος 2 και των καμπυλών που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις του πειράματος εφελκυσμού στο ABAQUS, με τα διάφορα χαρακτηριστικά μεγέθη στοιχείου. Και πάλι, η συμπεριφορά του υλικού κατά την φόρτιση του έως τη θραύση αποτυπώνεται πολύ καλά με τις ρυθμιζόμενες, μέσω της διαδικασίας αντίστροφης μηχανικής, παραμέτρους.



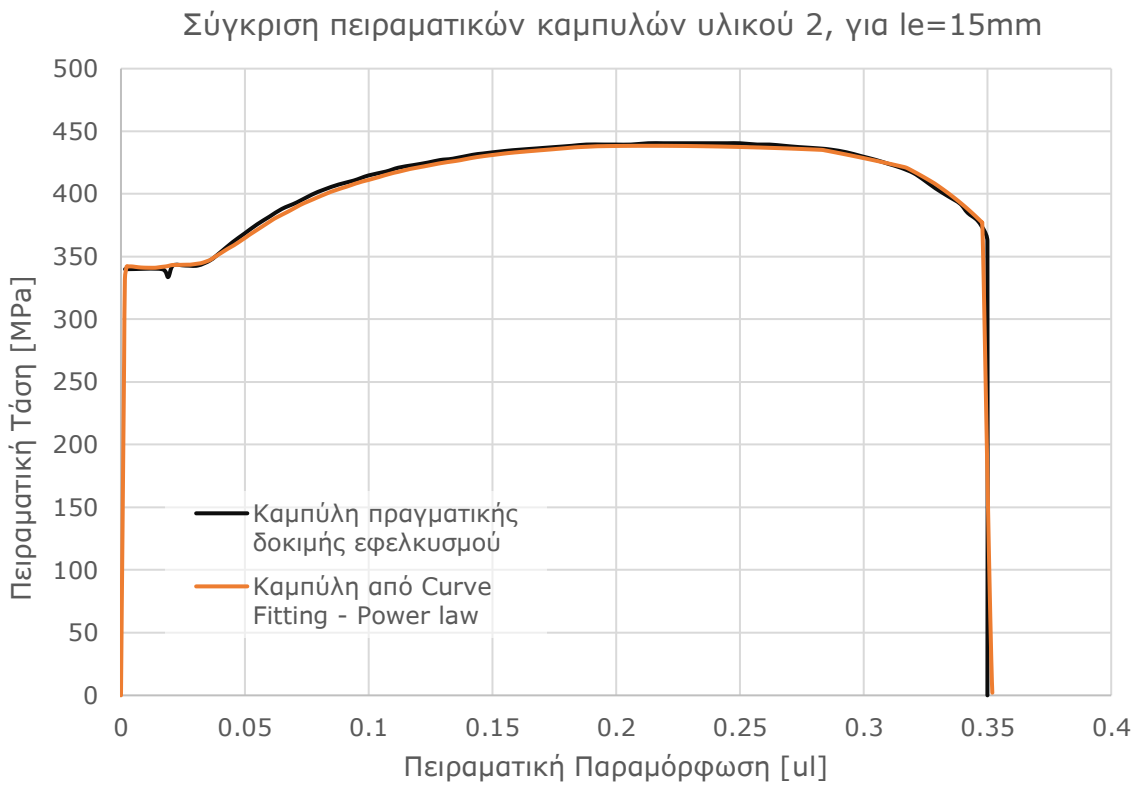
Σχήμα 3-29: Σύγκριση πειραματικών καμπυλών υλικού 2 από πραγματική δοκιμή εφελκυσμού και από την μοντελοποίηση της στο ABAQUS μετά τη διαδικασία αντίστροφης μηχανικής με le=6.25mm



Σχήμα 3-30 Σύγκριση πειραματικών καμπυλών υλικού 2 από πραγματική δοκιμή εφελκυσμού και από την μοντελοποίηση της στο ABAQUS μετά τη διαδικασία αντίστροφης μηχανικής με le=10mm



Σχήμα 3-31: Σύγκριση πειραματικών καμπυλών υλικού 2 από πραγματική δοκιμή εφελκυσμού και από την μοντελοποίηση της στο ABAQUS μετά τη διαδικασία αντίστροφης μηχανικής με le=12.5mm

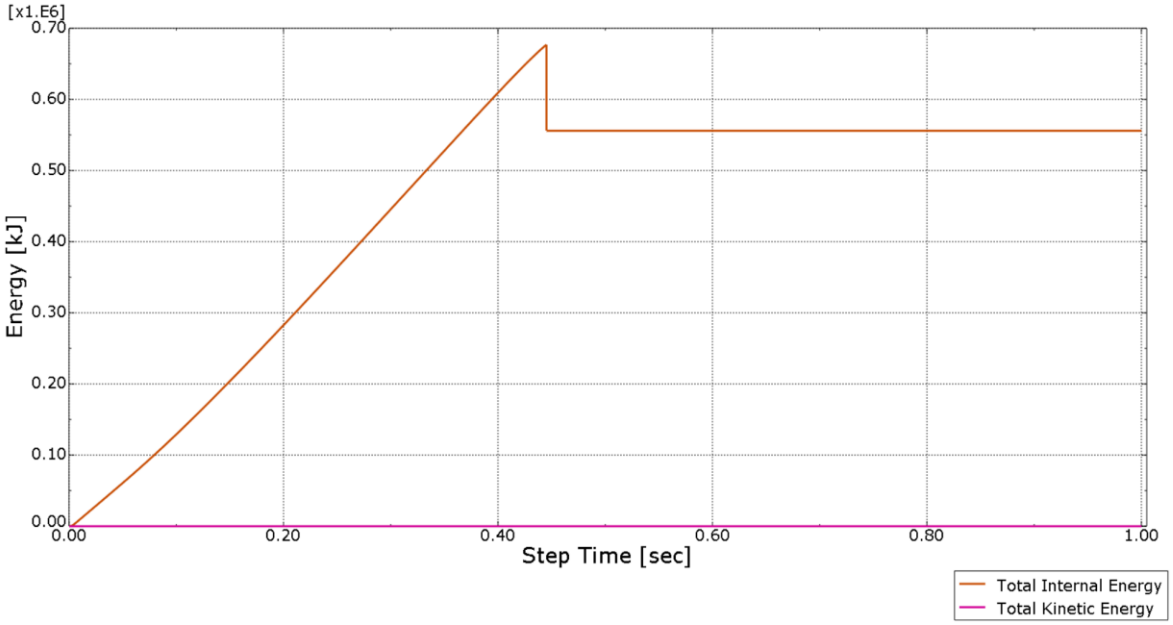


Σχήμα 3-32: Σύγκριση πειραματικών καμπυλών υλικού 2 από πραγματική δοκιμή εφελκυσμού και από την μοντελοποίηση της στο ABAQUS μετά τη διαδικασία αντίστροφης μηχανικής με le=15mm

3.4.3 Σχόλια επί των προσομοιώσεων πειράματος εφελκυσμού

Θεώρηση ψευδοστατικότητας

Στο Σχήμα 3-33 φαίνεται η σύγκριση μεταξύ της χρονικής ιστορίας της εσωτερικής ενέργειας του μοντέλου και της κινητικής ενέργειας, για την προσομοίωση που αφορά το υλικό 2, με στοιχεία χαρακτηριστικού μήκους le=15mm στην περιοχή του επιμηκυνσιομέτρου. Όπως είναι εμφανές, η ολική κινητική ενέργεια λαμβάνει σχεδόν μηδενικές τιμές, ενώ η εσωτερική ενέργεια αυξάνεται γραμμικά, καθώς το δοκίμιο παραμορφώνεται με σταθερό ρυθμό. Παρόμοια μορφή έχουν οι αντίστοιχες καμπύλες, για όλα τα μεγέθη πεπερασμένων στοιχείων και υλικά, συνεπώς, η ανάλυση του προβλήματος ως ψευδο-στατικό είναι αποδεκτή.

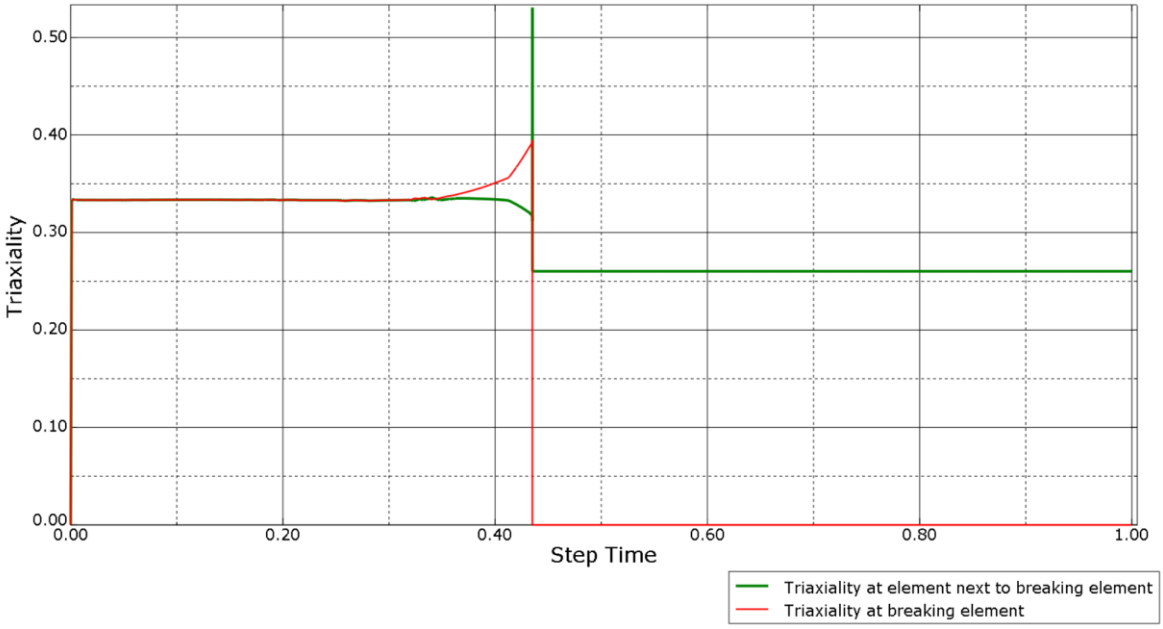


Σχήμα 3-33: Χρονική ιστορία εσωτερικής ενέργειας και κινητικής ενέργειας στην προσομοίωση πειράματος εφελκυσμού, για το υλικό 2, με le=15mm

Επίδραση τριαξονικότητας στην προσομοίωση του πειράματος εφελκυσμού

Σε σχέση με όσα περιγράφηκαν στα προηγούμενα υποκεφάλαια, υπάρχει μία έλλειψη στον ορισμό του μοντέλου του υλικού, στην προσομοίωση του πειράματος εφελκυσμού. Κατά τη συμπλήρωση του πεδίου Damage Initiation, δεν χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση του κριτηρίου αστοχίας Rice-Tracey, για τον ορισμό της καμπύλης ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης αστοχίας και τριαξονικότητας. Αποκλειστικά για τις προσομοιώσεις του πειράματος εφελκυσμού, δεν ορίζεται εξάρτηση της κρίσιμης παραμόρφωσης από την τριαξονικότητα, καθώς η τιμή της τριαξονικότητας παραμένει σχεδόν σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης και ίση με η=1/3. Αυτό αποδεικνύεται από το Σχήμα 3-34, που παρουσιάζει την χρονική μεταβολή της τριαξονικότητας σε δύο στοιχεία τα οποία βρίσκονται εκατέρωθεν του σημείου θραύσης. Η κόκκινη καμπύλη αφορά το στοιχείο που διαγράφεται από το πλέγμα, καθώς ξεπερνά την κρίσιμη ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση, και η πράσινη καμπύλη το γειτονικό σε αυτό στοιχείο. Η τριαξονικότητα παραμένει απολύτως σταθερή, όσο η παραμόρφωση

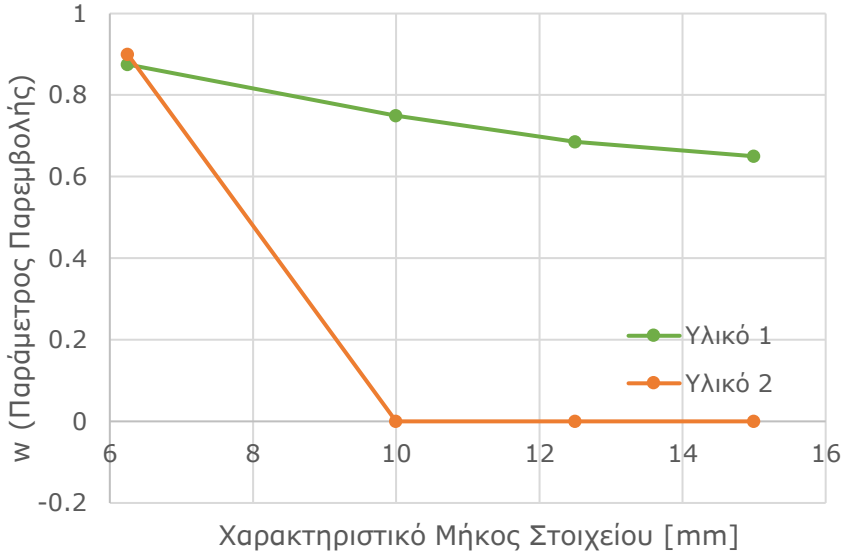
κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλο το μήκος του επιμηκυνσιομέτρου και κατόπιν αυξάνεται περιορισμένα για το στοιχείο που αργότερα θραύεται και μειώνεται (δράση-αντίδραση) για το γειτονικό του στοιχείο. Μπορεί, λοιπόν, να θεωρηθεί ότι η κρίσιμη παραμόρφωση για το Damage Initiation, που προσδιορίστηκε με την διαδικασία αντίστροφης μηχανικής, είναι αντιπροσωπευτική για τριαξονικότητα ίση με 1/3. Κατά την προσομοίωση των πειραμάτων των Alsos και Amdahl [7] η τιμή που βρέθηκε, από τη μοντελοποίηση της δοκιμής εφελκυσμού, θα χρησιμοποιηθεί για να καλιμπραριστεί το κριτήριο αστοχίας.



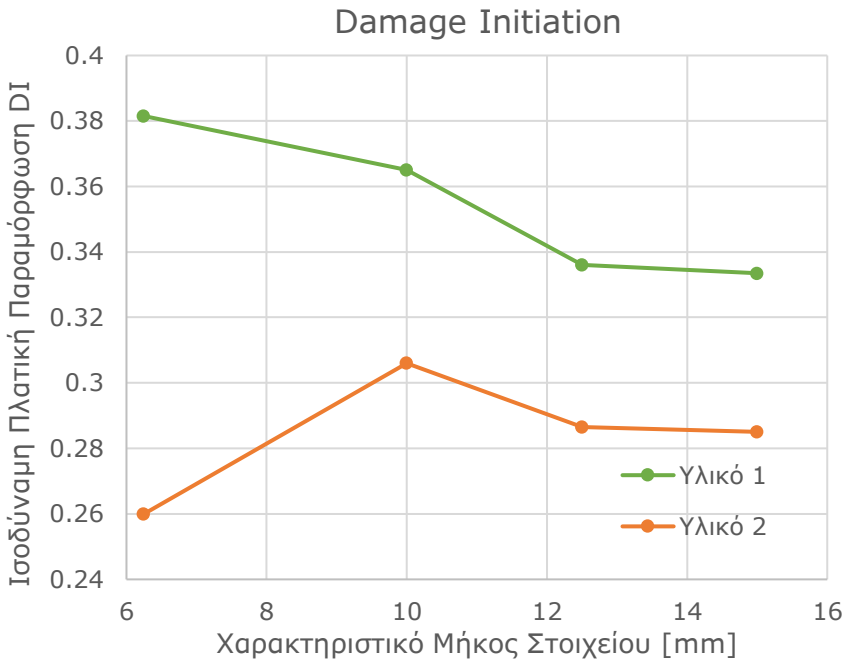
Σχήμα 3-34: Χρονική μεταβολή της τριαξονικότητας στην προσομοίωση του πειράματος εφελκυσμού

<u>Σύγκλιση</u>

Στα Σχήματα Σχήμα 3-35 και Σχήμα 3-36 παρουσιάζεται η μεταβολή της παραμέτρου παρεμβολής, w, και της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης στο damage initiation με την αύξηση του μεγέθους του υλικού. Παρατηρείται συμπεριφορά σύγκλισης στις τελικές τιμές των παραμέτρων αυτών, που απέδωσαν ακριβέστερα την πειραματική καμπύλη κάθε υλικού. Το πρώτο σημείο της καμπύλης που αφορά το υλικό 2 στο Σχήμα 3-36 δεν ακολουθεί την τάση των υπολοίπων, διότι, γι' αυτό το μήκος χαρακτηριστικού στοιχείου έχει χρησιμοποιηθεί πολύ μεγαλύτερη τιμή της παραμέτρου w (0.9 αντί για 0, στα υπόλοιπα le). Όσο αυξάνεται η τιμή της παραμέτρου w τόσο ανυψώνεται η καμπύλη του υλικού, ενώ όσο μειώνεται η τιμή της κρίσιμης ισοδύναμης παραμόρφωσης τόσο νωρίτερα ξεκινά η πτωτική τάση στην πειραματική καμπύλη. Συνεπώς, η υπερβολική αύξηση στο w απαιτεί μείωση της κρίσιμης παραμόρφωσης. Στόχος, πάντα, είναι η προσέγγιση, κατά το δυνατόν, της πειραματικής καμπύλης της πραγματικής δοκιμής εφελκυσμού.



Σχήμα 3-35: Ρύθμιση της παραμέτρου παρεμβολής, w, ανάλογα με το χαρακτηριστικό μήκος του πεπερασμένου στοιχείου



Σχήμα 3-36: Ρύθμιση της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης στο Damage Initiation, ανάλογα με το χαρακτηριστικό μήκος του πεπερασμένου στοιχείου

<u>Υπολογιστικό κόστος προσομοίωσης πειράματος εφελκυσμού</u>

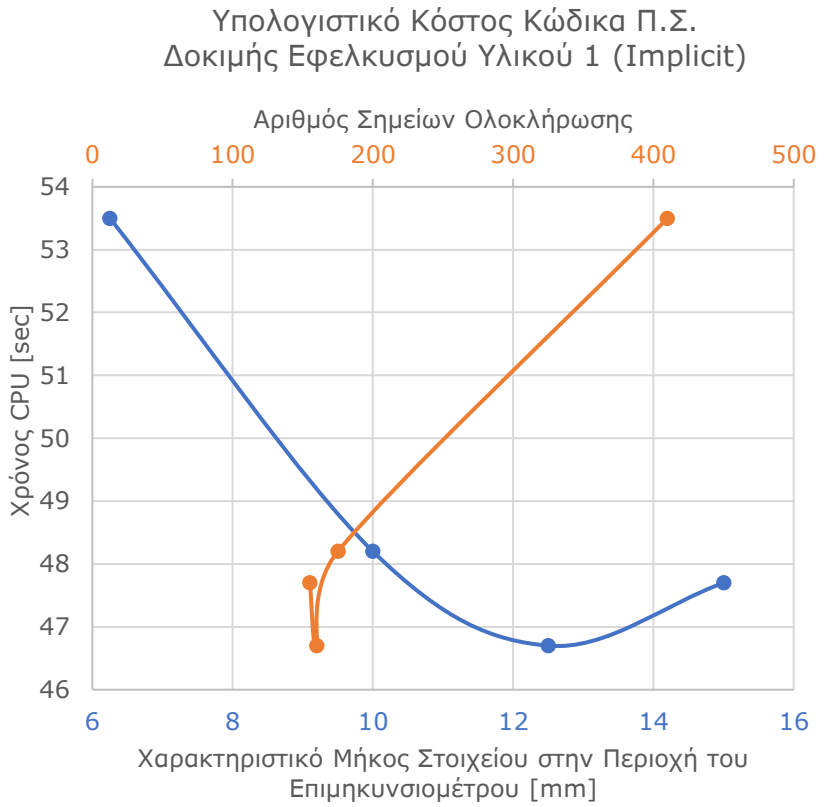
Καταληκτικά, σχολιάζεται το υπολογιστικό κόστος της προσομοίωσης της δοκιμής εφελκυσμού στο λογισμικό ABAQUS/CAE με έμμεση (implicit) μέθοδο χρονικής διακριτοποίησης. Στον Πίνακας 3-4 παρουσιάζονται κάποια μεγέθη και αναλογίες που αφορούν στον υπολογιστικό χρόνο σε σχέση με το χαρακτηριστικό μέγεθος του στοιχείου που χρησιμοποιείται στην περιοχή του επιμηκυνσιομέτρου. Στα Σχήματα Σχήμα 3-37 και Σχήμα 3-38 ο απαραίτητος χρόνος CPU φαίνεται διαγραμματικά συναρτήσει του χαρακτηριστικού μεγέθους του στοιχείου και του αριθμού των σημείων ολοκλήρωσης.

Οι ακριβείς τιμές του χρόνου έχουν μικρή σημασία, καθώς εξαρτώνται από τον αριθμό των πυρήνων στους οποίους τρέχει το πρόγραμμα και τις διαδικασίες που εκτελεί παράλληλα η CPU - γι' αυτό διαφέρει ακόμη και για διαδοχικά τρεξίματα της ίδιας προσομοίωσης. (Στην παρούσα διπλωματική, ο υπολογιστής στον οποίον έγιναν οι προσομοιώσεις διαθέτει 7-πύρηνο επεξεργαστή και 16 GB RAM.) Αυτό που πρέπει να παρατηρηθεί σε σχέση με τον υπολογιστικό χρόνο είναι η πτωτική του τάση με τη μείωση του αριθμού των στοιχείων και των σημείων ολοκλήρωσης, αφού μειώνεται ο αριθμός των εξισώσεων που λύνει το πρόγραμμα – οι εξισώσεις στατικής ισορροπίας επιλύονται στα σημεία ολοκλήρωσης (ΣΟ) κάθε στοιχείου.

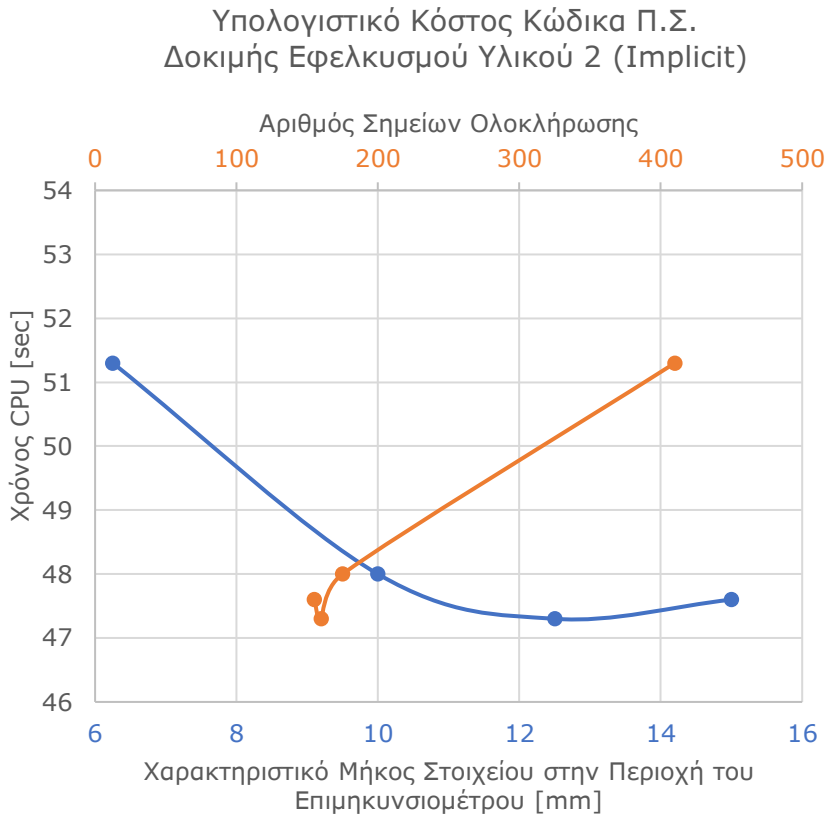
Από τον Πίνακας 3-4, παρατηρείται ακόμη ότι, ο αριθμός χρονικών βημάτων που ρυθμίζεται αυτόματα από το πρόγραμμα δεν μειώνεται με την ελάττωση του αριθμού των κόμβων. Οι μέθοδοι έμμεσης διακριτοποίησης είναι ευσταθείς άνευ όρων και γι' αυτό ο αριθμός των χρονικών βημάτων, δεν εξαρτάται από την διακριτοποίηση στο χώρο (όπως στις άμεσες μεθόδους), αλλά από την επιθυμητή ακρίβεια στη λύση. Συνεπώς, ο υπολογιστικός χρόνος που αφιερώνεται σε κάθε βήμα μειώνεται. Ακόμη, ο χρόνος που αφιερώνεται για την επίλυση των εξισώσεων σε κάθε ΣΟ έχει σχετική αύξηση (136%) - αντιδιαισθητικά- με την μείωση του αριθμού των στοιχείων. Θεωρητικά, ο λόγος αυτός θα έπρεπε να παραμένει σχεδόν σταθερός, γιατί ο υπολογιστικός χρόνος είναι ανάλογος με τον αριθμό των εξισώσεων που, ακολούθως, είναι ανάλογος με τον αριθμό των ΣΟ. Όμως, καθώς φαίνεται, η μείωση του υπολογιστικού χρόνου εξαιτίας της μείωσης του αριθμού των εξισώσεων που πρέπει να επιλύσει το πρόγραμμα, ελαττώνεται με μικρότερο ρυθμό από την ελάττωση του αριθμού των ΣΟ με τη μείωση του αριθμού των στοιχείων. Τα παραπάνω αλλάζουν, στην περίπτωση που η ανάλυση γίνεται με άμεση διακριτοποίηση, όπως θα φανεί, όταν θα παρουσιαστούν τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά για την προσομοίωση των πειραμάτων κρούσης, στο επόμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 3-4: Υπολογιστικό κόστος προσομοίωσης πειράματος εφελκυσμού ανάλογα με το χαρακτηριστικό μέγεθος στοιχείου που χρησιμοποιείται στην περιοχή του επιμηκυνσιομέτρου

Μοντελοποίηση Πειράματος Εφελκυσμού	**le [mm]**	**Χρόνος CPU [sec]**	**# Χρονικά Βήματα**	**# Σημεία Ολοκλήρωσης (ΣΟ)**	**Χρόνος CPU/ Βήμα [sec]**	**Χρόνος CPU/ ΣΟ [sec]**	**Χρόνος CPU / Βήμα/ ΣΟ [sec]**
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]=[2]/[3]	[7]=[2]/[4]	[6]=[5]/[4]
Υλικό 1	**6.25**	53.5	1009	410	5.30E-02	1.30E-01	1.29E-04
	10	48.2	1009	175	4.78E-02	2.75E-01	2.73E-04
	12.5	46.7	1009	160	4.63E-02	2.92E-01	2.89E-04
	15	47.7	1009	155	4.73E-02	3.08E-01	3.05E-04
Υλικό 2	**6.25**	51.3	1012	410	5.07E-02	1.25E-01	1.24E-04
	10	48	1009	175	4.76E-02	2.74E-01	2.72E-04
	12.5	47.3	1009	160	4.69E-02	2.96E-01	2.93E-04
	15	47.6	1009	155	4.72E-02	3.07E-01	3.04E-04



Σχήμα 3-37: Υπολογιστικός Χρόνος ανάλογα με την πυκνότητα πλέγματος για την προσομοίωση του πειράματος εφελκυσμού στο Υλικό 1



Σχήμα 3-38: Υπολογιστικός Χρόνος ανάλογα με την πυκνότητα πλέγματος για την προσομοίωση του πειράματος εφελκυσμού στο Υλικό 2

Κεφάλαιο 4ο

Προσομοίωση Πειραμάτων Κρούσης

Κεφάλαιο 4 : Προσομοίωση Πειραμάτων Κρούσης

Για την εύρεση μίας αποτελεσματικής διαδικασίας για τη ρεαλιστική μοντελοποίηση συγκρούσεων και προσαράξεων θαλασσίων κατασκευών, οι ερευνητές μελετούν, με αριθμητικές μεθόδους, πραγματικά θαλάσσια ατυχήματα ή πειράματα, τα οποία προσεγγίζουν, σε έναν βαθμό, τις πραγματικές συνθήκες σύγκρουσης. Η εύρεση μίας τέτοιας διαδικασίας μέσω της προσομοίωσης πραγματικών ατυχημάτων ενέχει πολλές δυσκολίες. Σε ένα πραγματικό πρόβλημα, δεν μπορούν να προσδιοριστούν με απόλυτη ακρίβεια οι αρχικές συνθήκες και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μπορούν να συγκριθούν με το ατύχημα μόνο όσον αφορά στην τελική παραμορφωμένη γεωμετρία των συμβαλλόμενων κατασκευών. Γι' αυτούς τους λόγους, τα πραγματικά ατυχήματα προσομοιάζονται, συνήθως, για την επαλήθευση της ήδη ανεπτυγμένης μεθοδολογίας μοντελοποίησης που έχει βασιστεί σε πειράματα. Σε αυτήν την περίπτωση, οι συνθήκες είναι ελεγχόμενες και υπάρχουν διαθέσιμα αποτελέσματα της απόκρισης της κατασκευής (καμπύλη δύναμης-μετατόπισης). Τα πειράματα που γίνονται είναι μεγάλης ή μεσαίας κλίμακας. Σε μεγάλης κλίμακας πειράματα, οι μεταλλικές κατασκευές έχουν διαστάσεις τομέων της γάστρας του πλοίου και μπορεί, επίσης, να είναι πλωτές. Η σύγκρουση γίνεται, συνήθως, με κάποια κατασκευή που προσομοιάζει τμήμα πλώρης, επίσης σε πραγματικό μέγεθος, ή βολβό πλοίου ή υποθαλάσσιο βράχο. Εξαιτίας του μεγέθους των κατασκευών και των απαιτήσεων σε εξοπλισμό, τα πειράματα μεγάλης κλίμακας είναι οικονομικά ασύμφορα και πραγματοποιούνται αρκετά σπάνια. Αντιθέτως, τα μεσαίας κλίμακας πειράματα εκτελούνται συχνότερα και εντός εργαστηρίου, αφού περιλαμβάνουν μικρότερες κατασκευές, που προσομοιάζουν τμήματα του εξωτερικού τοιχώματος του πλοίου. Η σύγκρουση γίνεται συνήθως με κάποιο λιγότερο παραμορφώσιμο διεισδυτή, ο οποίος έχει σφαιροειδή ή κωνοειδή γεωμετρία.

Το 2008, οι Alsos και Amdahl [7] δημοσίευσαν τα αποτελέσματα κάποιων πειραμάτων μεσαίας κλίμακας που εκτέλεσαν στο εργαστήριο Ναυτικής Τεχνολογίας του Νορβηγικού Πανεπιστημίου Επιστήμης και Τεχνολογίας (NTNU). Τα πειράματα περιλάμβαναν την διάτρηση τριών διατάξεων ενισχυμένων ελασμάτων από έναν διεισδυτή με σφαιροειδές άκρο, που προσομοιάζει υποθαλάσσιο βράχο, στον οποίο προσπίπτει κατακόρυφα η κατασκευή. Παρατίθενται οι καμπύλες της δύναμης αντίστασης στην παραμόρφωση του ελάσματος συναρτήσει της κατακόρυφης μετατόπισης του διεισδυτή και φωτογραφίες που απεικονίζουν τη μορφή αστοχίας σε κάθε περίπτωση. Τα πειράματα αυτά έχουν προσομοιωθεί μετέπειτα, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, από διάφορους ερευνητές. Είναι σύνηθες, για έναν μελετητή που ενδιαφέρεται να αναπτύξει μία μεθοδολογία μοντελοποίησης της συμπεριφοράς κατασκευής σε ακραία φορτία, αλλά δεν διαθέτει τους απαραίτητους πόρους για τον σχεδιασμό και εκτέλεση ενός πειράματος, να ανατρέξει στην βάση δεδομένων της βιβλιογραφίας του αντικειμένου.

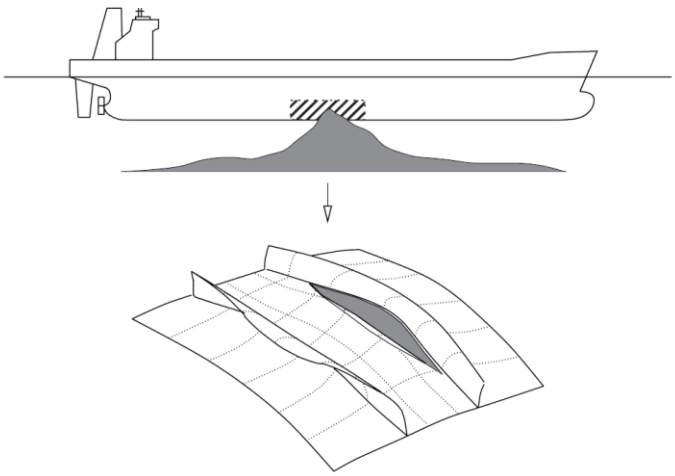
Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής, τρία από τα πειράματα των Alsos και Amdahl προσομοιώνονται, με σκοπό την εύρεση μίας αποτελεσματικής διαδικασίας μοντελοποίησης, με εστίαση στον ακριβή προσδιορισμό του μοντέλου του υλικού. Η

μεθοδολογία μοντελοποίησης της συμπεριφοράς του υλικού στη φόρτιση αναλύεται στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το μοντέλο για τα υλικά που συμμετέχουν στα πειράματα των Alsos και Amdahl ρυθμίζεται μέσω της προσομοίωσης του πειράματος εφελκυσμού παρατίθεται στο υποκεφάλαιο 3.4. Αυτό το κεφάλαιο αναφέρεται στα εν λόγω πειράματα και τη διαδικασία μοντελοποίησής τους από ερευνητές της βιβλιογραφίας και τη συγγραφέα της παρούσας μελέτης.

Στο πρώτο υποκεφάλαιο, περιγράφεται η πειραματική διαδικασία των Alsos και Amdahl και παρατίθενται τα αποτελέσματά τους. Στο υποκεφάλαιο 4.2, εξετάζεται, για λόγους σύγκρισης, η μοντελοποίηση των εν λόγω πειραμάτων από τους Alsos και Amdahl [8] και το Μαρινάτο [23] και, στο υποκεφάλαιο 4.3, ακολουθεί η παρουσίαση της προσομοίωσης και των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας. Πέρα από το μοντέλο υλικού που προσδιορίστηκε στο υποκεφάλαιο 3.4, οι προσομοιώσεις εκτελούνται με το αντίστοιχο μοντέλο που κατασκευάζεται με τις υποδείξεις των Alsos και Amdahl. Αυτό γίνεται για να βρεθεί η επίδραση του μοντέλου του υλικού στα αποτελέσματα, όταν οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρούνται σταθερές. Στο υποκεφάλαιο 4.4, γίνεται ανάλυση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης και σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των ερευνητών της βιβλιογραφίας.

4.1 Περιγραφή και αποτελέσματα των πειραμάτων κρούσης

Με τα πειράματα που σχεδιάζουν, οι Alsos και Amdahl επιχειρούν να προσομοιάσουν διάφορα σενάρια προσάραξης ενός πλοίου σε υποθαλάσσιο βράχο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-1. Θεωρείται, ότι η προσάραξη θα προκαλέσει τοπική μόνο αστοχία του ελάσματος και η έκταση της ρωγμής θα περιοριστεί μεταξύ δύο διαμήκων και εγκάρσιων ενισχύσεων.

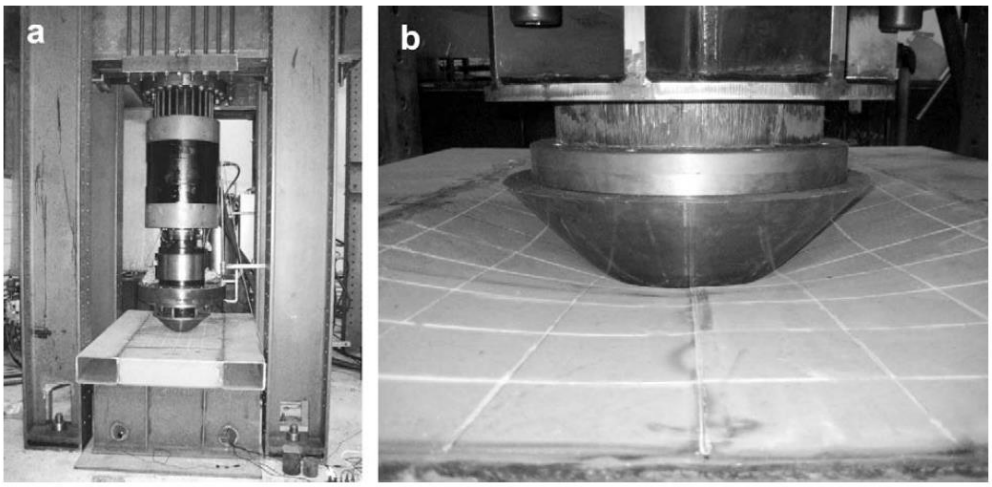


Σχήμα 4-1: Κάθετη διάτρηση εξωτερικού πυθμένα πλοίου σε υποθαλάσσιο βράχο

4.1.1 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Πειραματική διάταξη

Κάθε πείραμα περιλαμβάνει δύο συγκρουόμενα τμήματα: ένα ενισχυμένο έλασμα που προσομοιάζει ένα τμήμα του εξωτερικού πυθμένα του πλοίου και ένα διεισδυτή που προσομοιάζει το βράχο. Ο διεισδυτής, που είναι προσαρτημένος σε έναν υδραυλικό γρύλο, κινείται κατακόρυφα, προσπίπτει κάθετα στο κέντρο του ελάσματος και το διαρρηγνύει. Το ενισχυμένο έλασμα είναι συγκολλημένο περιμετρικά σε ένα ισχυρό πλαίσιο, το οποίο προσομοιάζει την παρουσία εδρών και σταθμίδων που οριοθετούν την περιοχή και θέτει την κατάλληλη οριακή συνθήκη. Ολόκληρη η κατασκευή είναι τοποθετημένη σε μία πλατφόρμα και στερεωμένη πλευρικά, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4-2.



Σχήμα 4-2: Πειραματική διάταξη Alsos και Amdahl [7] α)πλατφόρμα στήριξης και υδραυλικός γρύλος, β)διάταξη διεισδυτή-ελάσματος κατά την φόρτιση.

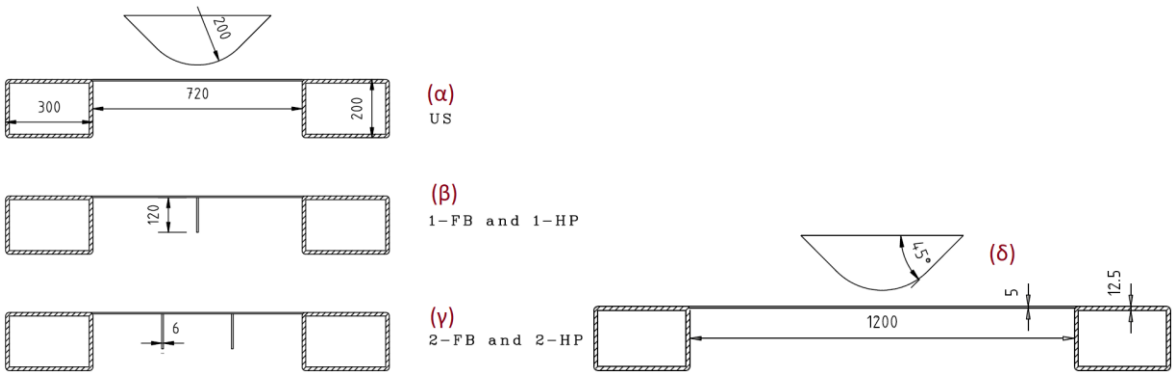
Διατάξεις και γεωμετρία συμβαλλόμενων μελών

Οι πειραματικές διατάξεις διαφέρουν ως προς τον αριθμό και το είδος των ενισχυτικών. Στην πλάκα τοποθετούνται είτε επίπεδα ενισχυτικά (flat bar) είτε βολβολάμες (bulb bar). Συναρμολογούνται διατάξεις με κανένα, ένα ή δύο διαμήκη ενισχυτικά, έτσι ώστε να ισαπέχουν μεταξύ τους και με το πλαίσιο. Κατ' αυτόν τον τρόπο, προκύπτουν πέντε συνδυασμοί ενισχυμένου ελάσματος:

- Πλάκα χωρίς ενισχυτικά (Unstiffened Plate, US)
- Πλάκα με ένα επίπεδα ενισχυτικό (1 Flat Bar Plate, 1FB)
- Πλάκα με μία βολβολάμα (1 Bulb Bar Plate, 1HP)
- Πλάκα με δύο επίπεδα ενισχυτικά (2 Flat Bar Plate, 2FB)
- Πλάκα με δύο βολβολάμες (2 Bulb Bar Plate, 2HP)

Η πλάκα έχει διαστάσεις 1200 mm X 720 mm και πάχος 5 mm. Τα επίπεδα ενισχυτικά έχουν διαστάσεις 1200 mm X 120 και πάχος 6 mm. Οι Alsos και Amdahl δεν δίνουν πληροφορίες για τις διαστάσεις που έχουν οι βολβολάμες. Το πλαίσιο, στο οποίο είναι

συγκολλημένη περιμετρικά η πλάκα, αποτελείται από τέσσερις κοιλοδοκούς ορθογωνικής διατομής με διαστάσεις 300 mm X 200 mm με πάχος 12.5 mm. Ο διεισδυτής έχει κωνικό σχήμα με άνοιγμα 90 μοιρών και σφαιροειδές άκρο με ακτίνα 200 mm. Στο Σχήμα 4-3 παρουσιάζεται η διαμήκης τομή της κατασκευής (δ), η εγκάρσια τομή ανάλογα με την διάταξη (α-US, β-1FB, γ-2FB) (αριστερά) και η γεωμετρία του διεισδυτή.



Σχήμα 4-3: Γεωμετρία ενισχυμένου ελάσματος και διεισδυτή. Εγκάρσια τομή (αριστερά) και διαμήκης τομή (δεξιά) [7]

Στην παρούσα εργασία προσομοιώνονται τρία από τα πέντε πειράματα, που διαφέρουν ως προς τον αριθμό των ενισχυτικών. Το κάθε ένα από τα τρία αντιπροσωπεύει ένα διαφορετικό σενάριο σχετικής θέσης πρόσπτωσης του βράχου ως προς την ενίσχυση, αφού ο διεισδυτής ευθυγραμμίζεται πάντα με το κέντρο του ελάσματος και αλλάζει κάθε φορά η διάταξη των ενισχυτικών. Επιλέγεται να μοντελοποιηθούν μόνο οι διατάξεις με τα επίπεδα ενισχυτικά, αφού δεν υπάρχουν επαρκείς πληροφορίες για τις διαστάσεις που έχουν οι βολβολάμες. Στο εξής, λοιπόν, θα γίνεται αναφορά μόνο στα πειράματα που ενδιαφέρουν και έχουν κωδικούς: US, 1FB και 2FB.

Υλικά συμβαλλόμενων μελών

Τα υλικά της πλάκας και των ενισχυτικών είναι τα δύο υλικά που αναφέρθηκαν στο εδάφιο 3.4.2. Η πλάκα είναι κατασκευασμένη από το υλικό 1 (S235JR EN10025, σ_Y = 285 MPa) και τα επίπεδα ενισχυτικά από το υλικό 2 (S235JR EN10025, σ_Y = 340 MPa). Το πλαίσιο είναι κατασκευασμένο από χάλυβα υψηλής αντοχής (S355NH EN10210, σ_Y = 285 MPa) του οποίου η πειραματική καμπύλη μονοαξονικού εφελκυσμού φαίνεται στο Σχήμα 3-27 με μαύρο χρώμα.

Οριακές συνθήκες

Τα μέλη που απαρτίζουν το ενισχυμένο έλασμα είναι όλα συγκολλημένα μεταξύ τους. Οι κοιλοδοκοί που αποτελούν το πλαίσιο είναι κατάλληλα συγκολλημένες μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-2. Η πλάκα είναι συγκολλημένη στο πλαίσιο και τα ενισχυτικά είναι συγκολλημένα στην πλάκα. Το πλαίσιο ακουμπά πάνω σε μία πλατφόρμα και σφηνώνεται μεταξύ τεσσάρων πυλώνων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-2.

Ταχύτητα φόρτισης

Κατά την διάρκεια του πειράματος, ελέγχεται ο ρυθμός μετατόπισης του διεισδυτή και διατηρείται σταθερός στα 10 mm/min. Η ταχύτητα αυτή είναι αρκετά μικρή, ώστε να μην δημιουργηθούν έντονα δυναμικά φαινόμενα.

Καταγραφή μετρήσιμων μεγεθών

Η δύναμη αντίστασης που ασκείται στο διεισδυτή από το ενισχυμένο έλασμα και η κατακόρυφη μετατόπισή του μετράται στο άκρο του διεισδυτή. Η τιμή της μετατόπισης μετράται, ακόμη, από έναν μετατροπέα που είναι τοποθετημένος στο δάπεδο κάτω από το έλασμα, ώστε να μην υπάρχει σφάλμα μέτρησης εξαιτίας κάποιας παραμόρφωσης του άκρου του διεισδυτή. Επιπλέον, δύο κάμερες τραβούν λήψεις κάθε 5 sec, κατά την εκτέλεση του πειράματος.

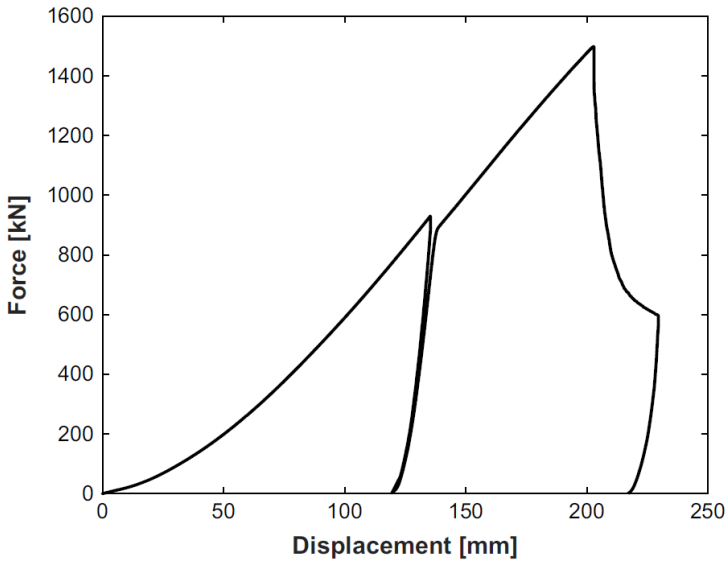
Το πείραμα σταματά μετά από 230 mm κατακόρυφης μετατόπισης του διεισδυτή. Επειδή ο υδραυλικός γρύλος έχει μέγιστη διαδρομή 150 mm, το πείραμα γίνεται σε δύο στάδια. Η κάθοδος διακόπτεται περίπου στα 130 mm, ο γρύλος κατεβαίνει χαμηλότερα και, μετά από λίγα λεπτά, το πείραμα συνεχίζεται. Συνεπώς, το ενισχυμένο έλασμα ανακάμπτει ελαστικά και έπειτα η δύναμη επανέρχεται περίπου στα προηγούμενα επίπεδα. Αυτά θα φανούν στις πειραματικές καμπύλες που παρουσιάζονται στο επόμενο εδάφιο.

4.1.2 Αποτελέσματα πειραμάτων

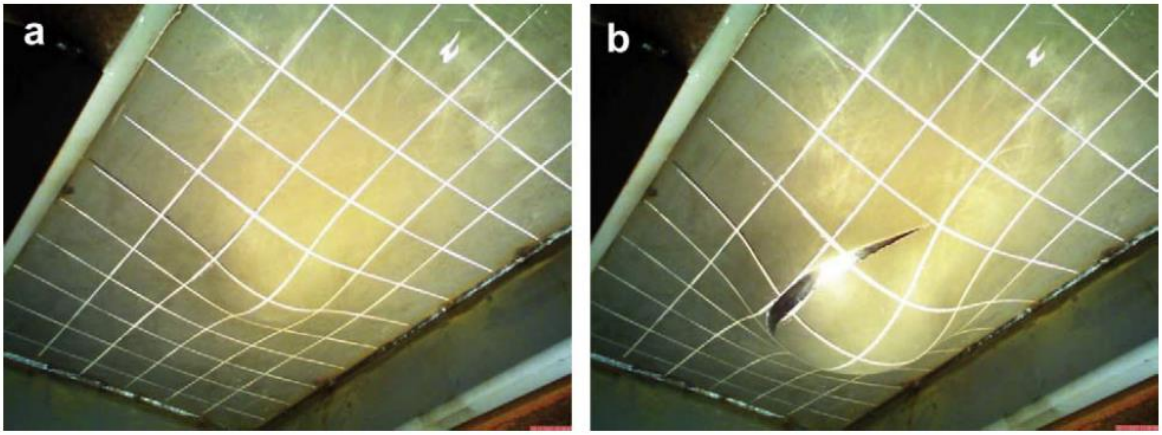
Πλάκα χωρίς ενισχυτικά (US)

Στο Σχήμα 4-4 φαίνεται η καμπύλη δύναμης-μετατόπισης που εκφράζει την απόκριση της κατασκευής στη φόρτιση και στο Σχήμα 4-5 φαίνεται η παραμόρφωση της πλάκας πριν τη θραύση (α) και η έκταση της ρωγμής μετά το πέρας του πειράματος (β). Η πτώση και επάνοδος της δύναμης που παρατηρείται στην καμπύλη απόκρισης οφείλεται στην διακοπή της πειραματικής διαδικασίας, λόγω του περιορισμού που έθετε η μέγιστη διαδρομή του υδραυλικού γρύλου, όπως εξηγήθηκε στο προηγούμενο εδάφιο.

Οι ερευνητές σχολιάζουν ότι η αντίσταση στην παραμόρφωση γίνεται κυρίως με μεμβρανικές τάσεις στην εγκάρσια διεύθυνση, εξαιτίας του λόγου πλευρών της πλάκας (μήκος/ πλάτος = 1200/720 = 5/3). Γι’ αυτό το λόγο, η ρωγμή εξελίσσεται στην διαμήκη διεύθυνση -κάθετα στις μέγιστες τάσεις- και οι μεμβρανικές δυνάμεις αναδιανέμονται στην άλλη διεύθυνση.



Σχήμα 4-4: Καμπύλη απόκρισης της πλάκας χωρίς ενισχυτικά [7]



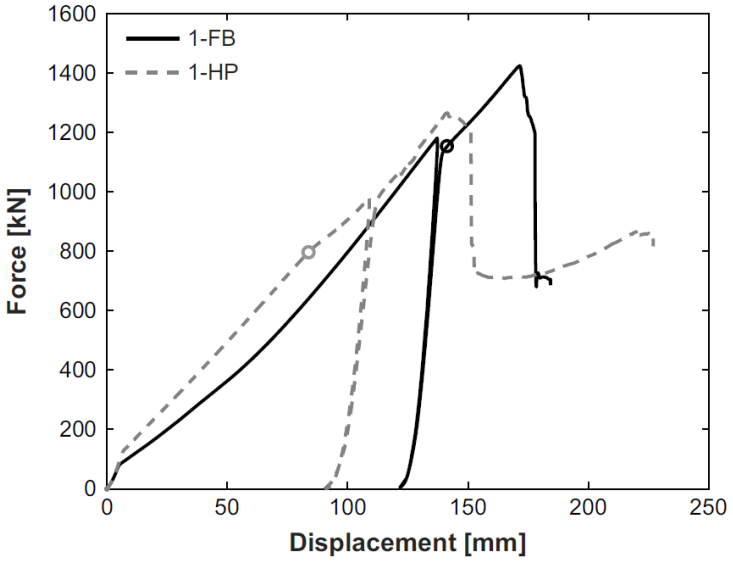
Σχήμα 4-5: Παραμόρφωση της πλάκας χωρίς ενισχυτικά πριν (α) και μετά (β) τη θραύση [7]

<u>Πλάκα με ένα επίπεδο ενισχυτικό (1FB)</u>

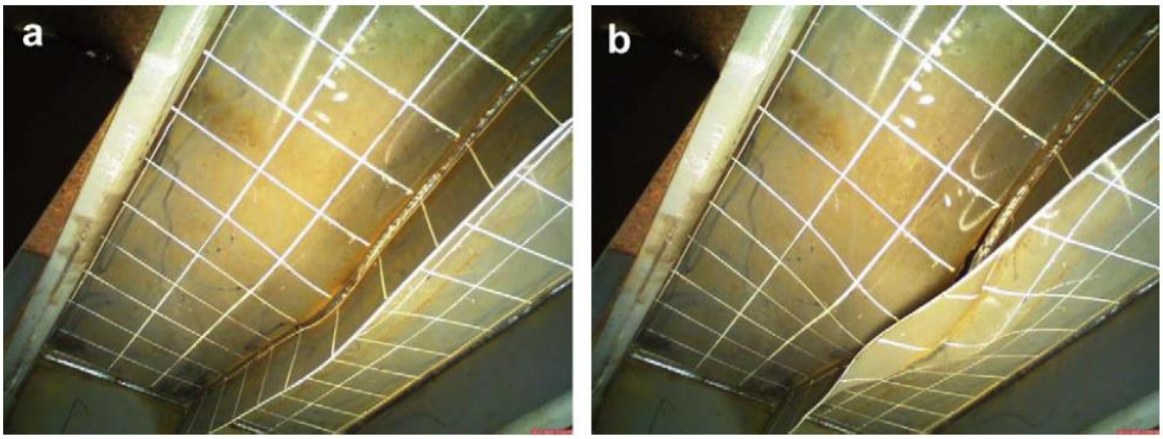
Στο Σχήμα 4-6, με μαύρο χρώμα, φαίνεται η καμπύλη δύναμης-μετατόπισης που εκφράζει την απόκριση της κατασκευής στη φόρτιση και στο Σχήμα 4-7 φαίνεται η παραμόρφωση της πλάκας πριν τη θραύση (α) και η έκταση της ρωγμής μετά το πέρας του πειράματος (β). Είναι εμφανής, πάλι, η ιδιομορφία που δημιουργείται εξαιτίας της ενδιάμεσης αποφόρτισης της κατασκευής.

Σε αυτήν τη διαμόρφωση, η δύναμη που ασκεί ο διεισδυτής στην πλάκα με την επαφή είναι συνευθειακή με τον άξονα του ενισχυτικού, που είναι τοποθετημένο επί του διαμήκους άξονα συμμετρίας της κατασκευής (Σχήμα 4-3β). Το ενισχυτικό αντιστέκεται στην παραμόρφωση της πλάκας μέσω καμπτικών και διατμητικών δυνάμεων. Το επίπεδο ενισχυτικό υφίσταται στρεπτικό λυγισμό (tripping) σχετικά νωρίς και έπειτα δεν συνεισφέρει ιδιαίτερα στην αντίσταση σε παραμόρφωση της κατασκευής. Η ένωση του ελάσματος της πλάκας με το ενισχυτικό δημιουργεί συγκέντρωση τάσης, λόγω γεωμετρικής ασυνέχειας. Η θραύση ξεκινά στο σημείο αυτό και διαδίδεται κατά μήκος

του πόδα της συγκόλλησης που συνδέει την πλάκα με το ενισχυτικό (Σχήμα 4-7β) και το φορτίο αναδιανέμεται στη διαμήκη διεύθυνση. Οι ερευνητές τονίζουν πως το έλασμα διατηρεί μεγάλο κομμάτι της αρχικής του αντοχής μετά τη θραύση, αφού όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-6, η πτώση της δύναμης αντίστασης εξαιτίας της θραύσης είναι μόνο 50%.



Σχήμα 4-6: Καμπύλη απόκρισης της πλάκας με ένα επίπεδο ενισχυτικό [7].



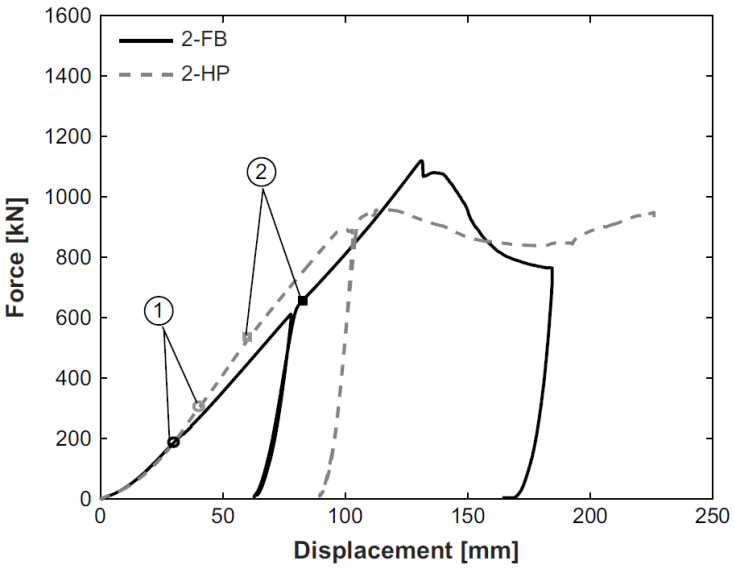
Σχήμα 4-7: Παραμόρφωση της πλάκας με ένα επίπεδο ενισχυτικό πριν (α) και μετά (β) τη θραύση [7].

<u>Πλάκα με δύο επίπεδα ενισχυτικά (2FB)</u>

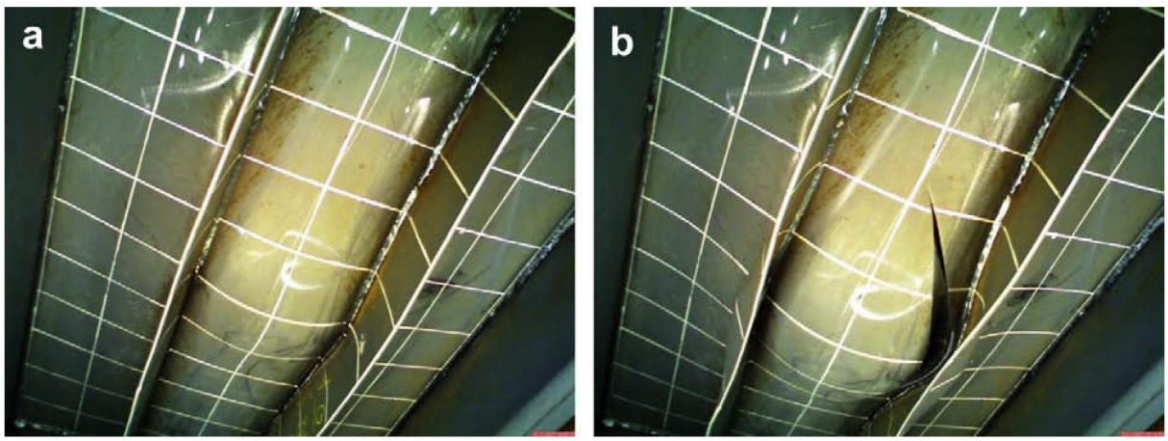
Στο Σχήμα 4-8, με μαύρο χρώμα, φαίνεται η καμπύλη δύναμης-μετατόπισης που εκφράζει την απόκριση της κατασκευής στη φόρτιση και στο Σχήμα 4-9 φαίνεται η παραμόρφωση της πλάκας πριν τη θραύση (α) και η έκταση της ρωγμής μετά το πέρας του πειράματος (β).

Σε αυτήν τη διαμόρφωση, ο διεισδυτής προσπίπτει στο μέσο των δύο ενισχυτικών, τα οποία ισαπέχουν μεταξύ τους και με το πλαίσιο (Σχήμα 4-3γ). Τα επίπεδα ενισχυτικά υφίστανται αρχικά λυγισμό κολώνας (beam bending), όταν ο διεισδυτής έχει κατέρθει

κατά περίπου 20 mm (σημείο 1, Σχήμα 4-8) και έπειτα στρεπτικό λυγισμό (tripping), στο σημείο 2 του Σχήμα 4-8. Η θραύση ξεκινά στην ένωση πλάκας και ενισχυτικού και διαδίδεται αρχικά κατά μήκος της συγκόλλησης και έπειτα διαγώνια με κατεύθυνση προς το απέναντι ενισχυτικό (Σχήμα 4-9β). Συγκριτικά με τη διαμόρφωση US, η παρουσία των ενισχυτικών οδηγεί σε συγκέντρωση της παραμόρφωσης σε μία πιο περιορισμένη ζώνη. Επιπλέον, καθώς η ρωγμή διαδίδεται εξίσου σε μία περιορισμένη ζώνη, η εναπομείνουσα αντοχή της κατασκευής είναι υψηλή. Οι μελετητές αιτιολογούν την επιβράδυνση του ρυθμού διάδοσης της ρωγμής, μετά την έναρξη της θραύσης, με την αναδιανομή των μεμβρανικών τάσεων στη διαμήκη διεύθυνση.



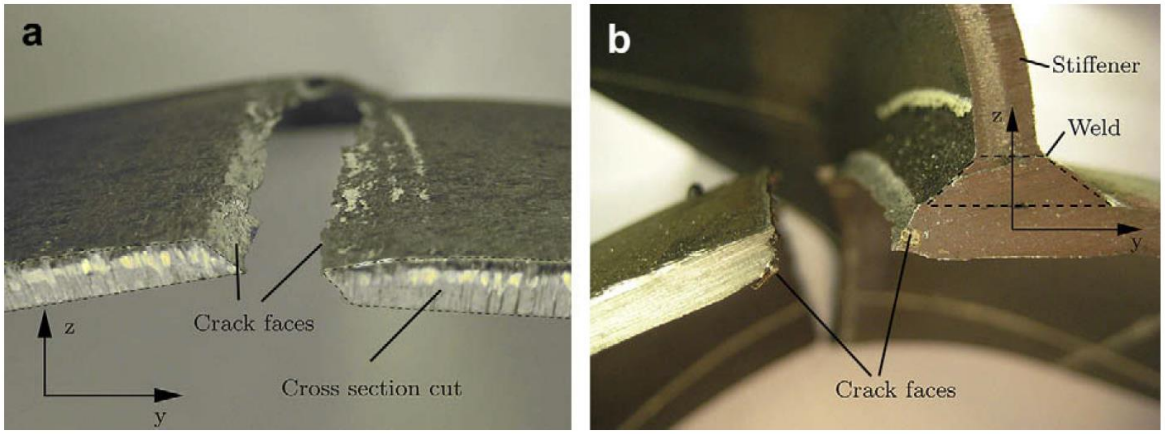
Σχήμα 4-8: Καμπύλη απόκρισης της πλάκας με δύο επίπεδα ενισχυτικά. Τα σημεία (1) και (2) αναφέρονται στην εμφάνιση λυγισμού κολώνας και στρεπτικού λυγισμού αντίστοιχα, στα ενισχυτικά [7].



Σχήμα 4-9: Παραμόρφωση της πλάκας με δύο επίπεδα ενισχυτικά πριν (α) και μετά (β) τη θραύση [7].

Μακροσκοπικές παρατηρήσεις των ερευνητών

Οι ερευνητές έστρεψαν το ενδιαφέρον τους στην περιοχή της θραύσης του ελάσματος, για να αναγνωρίσουν τους μηχανισμούς θραύσης που λειτούργησαν, μέσω της μορφολογίας της επιφάνειας. Στο Σχήμα 4-10 παρουσιάζονται φωτογραφίες από την περιοχή της θραύσης στην περίπτωση της πλάκας χωρίς ενισχυτικά (α) και της ενισχυμένης πλάκας με ένα επίπεδο ενισχυτικό (β). Στην περίπτωση της πλάκας χωρίς ενισχυτικά, παρατηρείται εκλέπτυνση της διατομής του ελάσματος σε μία ευρεία περιοχή και τοπικός λαιμός γύρω από την περιοχή της θραύσης. Στην περίπτωση των ενισχυμένων ελασμάτων, υπάρχει τάση για δημιουργία λαιμού και μεγάλη πλαστικοποίηση της περιοχής γύρω από την ρωγμή, γεγονός που δικαιολογείται από τις μεγάλες συγκεντρώσεις τάσεων που προκαλούν τα ενισχυτικά. Οι Alsos και Amdahl παρατηρούν ότι η επιφάνεια θραύσης κατά το πάχος είναι λοξή και σχολιάζουν ότι αυτό μαρτυρά τη δημιουργία αστάθειας λόγω μεγάλων διατμητικών τάσεων.



Σχήμα 4-10: Διατομή ελάσματος στην περιοχή της θραύσης στην διαμόρφωση α) US, β) 1FB

Συγκεντρωτικά σχόλια

Συγκρίνοντας τις καμπύλες απόκρισης των διαφόρων πειραμάτων, οι ερευνητές συμπεραίνουν ότι η αύξηση του αριθμού των ενισχυτικών αυξάνει τη δυσκαμψία του ελάσματος, όμως ταυτόχρονα περιορίζει τη μέγιστη αντοχή του. Η δημιουργία γεωμετρικών ασυνεχειών από τα ενισχυτικά προκαλεί συγκεντρώσεις τάσεων στις περιοχές γύρω από τη συγκόλληση και δεν επιτρέπει την ομοιόμορφη παραμόρφωση του ελάσματος, όπως γίνεται στο μη ενισχυμένο έλασμα, το οποίο έχει την πιο όλκιμη συμπεριφορά. Ωστόσο, καθώς η έκταση της ρωγμής περιορίζεται σε μία σχετικά μικρότερη περιοχή, στην περίπτωση των ενισχυμένων ελασμάτων, οι μεμβρανικές τάσεις αναδιανέμονται στη διαμήκη διεύθυνση και η εναπομείνουσα αντοχή της κατασκευής είναι μεγαλύτερη.

Οι ερευνητές συμπεραίνουν ότι τα πειραματικά ευρήματα μπορούν να αξιοποιηθούν, κατά το σχεδιασμό της μεταλλικής κατασκευής του κελύφους του πλοίου, ως εξής. Όταν είναι επιθυμητή η μεγιστοποίηση της αντοχής της κατασκευής και η αποφυγή γρήγορης θραύσης σε περίπτωση ατυχήματος, τότε ο σχεδιαστής μπορεί να

εστιάσει στην όλκιμη συμπεριφορά, με την τοποθέτηση μικρότερης ενίσχυσης στο έλασμα (συμπεριφορά US). Όταν ενδιαφέρει η διατήρηση της αντοχής του ελάσματος μετά τη θραύση, τότε ο σχεδιασμός εστιάζει στην αύξηση της δυσκαμψίας του ελάσματος με την ισχυροποίηση της ενίσχυσης. Στην ίδια λογική, μία νέα σχολή σχεδιασμού προβλέπει την δημιουργία αδύναμων σημείων στα δομικά στοιχεία, ώστε η αστοχία να γίνει ελεγχόμενα χωρίς να θέτει σε κίνδυνο την συνολική ακεραιότητα της κατασκευής.

4.2 Μοντελοποίηση των πειραμάτων από ερευνητές της βιβλιογραφίας

Σε αυτό το υποκεφάλαιο, θα παρουσιαστεί η διαδικασία μοντελοποίησης των πειραμάτων των Alsos και Amdahl [7] του εδαφίου 4.1.1, όπως περιγράφεται σε δύο βιβλιογραφικές πηγές της παρούσας εργασίας: τη δημοσίευση των Alsos και Amdahl [8] και τη διδακτορική διατριβή του Μαρινάτου [23]. Τα αποτελέσματα της παρούσας δουλειάς, που παρατίθενται στο εδάφιο 4.3.2, αξιολογούνται μέσω της σύγκρισης τους με τα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο εδάφιο 4.1.2 και με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των πειραμάτων από τους ερευνητές αυτούς, που παρουσιάζονται στο εδάφιο 4.2.2.

4.2.1 Παράμετροι μοντελοποίησης

Είναι σημαντικό, για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, να είναι γνωστές οι παράμετροι που τα έχουν επηρεάσει. Γι’ αυτό το λόγο μελετάται ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιήθηκαν τα πειράματα από τους Alsos [8] και Μαρινάτο [23] και ο τρόπος ρύθμισης των παραμέτρων της προσομοίωσης.

<u>Χρονική Διακριτοποίηση</u>

Και οι δύο μελετητικές ομάδες χρησιμοποιούν τη μέθοδο της άμεσης χρονικής διακριτοποίησης (Explicit Analysis). Όπως αναφέρθηκε στο 0 οι Alsos και Amdahl δουλεύουν στο λογισμικό LS-DYNA και ο Μαρινάτος στο λογισμικό ABAQUS/CAE.

<u>Μοντέλο υλικού</u>

Όπως αναλύθηκε στο 0, το μοντέλο του υλικού συντίθεται από την καμπύλη του υλικού και το κριτήριο θραύσης. Η μεθοδολογία εύρεσης του μοντέλου του υλικού από τους Alsos-Amdahl και Μαρινάτο περιγράφεται στα εδάφια 3.2.1 (καμπύλη υλικού) και 3.3.2 (κριτήριο θραύσης) του προηγούμενου κεφαλαίου.

Χωρική διακριτοποίηση

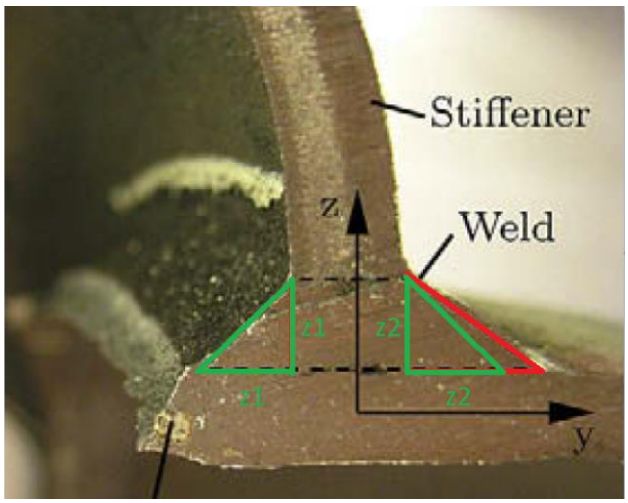
Και οι δύο ομάδες χρησιμοποιούν πεπερασμένα στοιχεία τύπου Belytschko-Lin-Tsay της βιβλιοθήκης Explicit, τα οποία έχουν τις ιδιότητες που αναλύθηκαν στο υποκεφάλαιο 3.1 του προηγούμενου κεφαλαίου. Το μοντέλο του κάθε πειραματικού δοκιμίου (US, 1FB, 2FB) διακριτοποιείται με πεπερασμένα στοιχεία τριών χαρακτηριστικών μεγεθών: le=5, 10, 18 mm.

Μοντελοποίηση συγκολλήσεων

Η διαδικασία της συγκόλλησης έχει ποικίλες επιδράσεις στα μέλη της μεταλλικής κατασκευής. Μερικές από αυτές είναι:

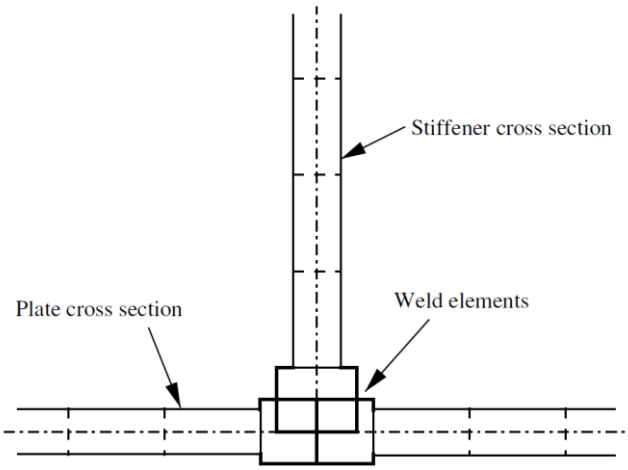
- η μεταβολή των χημικών και μηχανικών ιδιοτήτων στην περιοχή της συγκόλλησης και γύρω από αυτήν, λόγω της ανάμειξης διαφορετικών μετάλλων και της επιβολής θερμικού φορτίου,
- η δημιουργία παραμενουσών τάσεων και παραμορφώσεων σε όλη την έκταση των ελασμάτων, εξαιτίας της επιβολής θερμικού φορτίου,
- η αύξηση του πάχους των ελασμάτων στην περιοχή της ραφής, όταν χρησιμοποιείται μέταλλο προσθήκης.

Οι Alsos και Amdahl δεν δίνουν πληροφορίες για την διαδικασία συγκόλλησης (δηλαδή τη μέθοδο, το ηλεκτρόδιο, τη θερμική κατεργασία μετά την συγκόλληση και άλλες πληροφορίες) που ακολουθήθηκε κατά την κατασκευή της πειραματικής διάταξης. Αναφέρουν μόνο ότι γίνεται γωνιακή συγκόλληση (fillet weld) και ο πόδας κυμαίνεται μεταξύ 5 και 7 mm [7]. Πόδας ονομάζεται το μήκος της πλευράς του ορθογώνιου ισοσκελούς τριγώνου που εγγράφεται στην διατομή της ραφής συγκόλλησης [] (z1 και z2 για τις δύο γωνιακές συγκολλήσεις στο Σχήμα 4-11).



Σχήμα 4-11: Εγκάρσια τομή του δοκιμίου 1FB στην περιοχή της συγκόλλησης [7] και ορισμός πόδα συγκόλλησης. Η περιοχή της ραφής συγκόλλησης περιγράφεται με κόκκινο χρώμα και το ισοσκελές εγγεγραμμένο τρίγωνο φαίνεται με πράσινο. Z1 και Z2 είναι ο πόδας της αριστερής και δεξιάς συγκόλλησης αντίστοιχα. Η διαφορά του κόκκινου με το πράσινο τρίγωνο φανερώνει το πλεονάζον μέταλλο συγκόλλησης στη διατομή της ραφής.

Οι ερευνητές της βιβλιογραφίας αμελούν το μηχανικό και θερμικό φαινόμενο της συγκόλλησης και αποτυπώνουν στο μοντέλο μόνο την αλλαγή του πάχους των ελασμάτων στην περιοχή της ραφής. Οι ραφές συγκόλλησης αντιπροσωπεύονται από μία σειρά στοιχείων με αυξημένο πάχος δίπλα στη συμβολή των ελασμάτων πλάκας και ενισχυτικού (weld elements), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-12. Το πάχος της πλάκας αυξάνεται τοπικά κατά 2 mm και το πάχος του ενισχυτικού αυξάνεται κατά 4 mm. Η προσαύξηση του πάχους ισομοιράζεται στις δύο πλευρές των ελασμάτων.



Σχήμα 4-12: Μοντελοποίηση συγκόλλησης μεταξύ πλάκας και ενισχυτικού, με την αύξηση του πάχους των γειτονικών, στη συμβολή των ελασμάτων, πεπερασμένων στοιχείων [8].

Ατέλειες

Ατέλεια στην προσομοίωση θεωρείται οποιαδήποτε μη γνωστή απόκλιση από την ιδανική συνθήκη και μπορεί να αφορά τις ιδιότητες του υλικού, την γεωμετρία των κατασκευαστικών στοιχείων, το φορτίο.

Οι γεωμετρικές ατέλειες είναι σχεδόν αναπόφευκτες σε οποιαδήποτε κατασκευή και μπορεί να οφείλονται στην διαδικασία κατασκευής και συναρμολόγησης, στις συνθήκες αποθήκευσης, στην διαδικασία της συγκόλλησης κ.α. Οι Alsos-Amdahl εισάγουν, στις προσομοιώσεις των πειραμάτων, δύο ατέλειες οι οποίες προκαλούν ασυμμετρία στη λύση.

- Θεωρεί ότι η εγκάρσια τομή του ενισχυτικού έχει ημιτονοειδή μορφή με πλάτος ημιτόνου ίσο με 0.1% του πλάτους του επίπεδου ενισχυτικού, δηλαδή 120mm*0.1%=0.12mm.
- Ακόμη, θεωρεί ότι το άκρο του διεισδυτή δεν προσπίπτει ακριβώς στο κέντρο του ελάσματος της πλάκας, αλλά σε μία θέση που απέχει 5 mm από αυτό, κατά το εγκάρσιο.

Ο Μαρινάτος δεν αναφέρει αν εισάγει ατέλειες στην προσομοίωση του.

Οριακές Συνθήκες

Το μοντέλο, όπως έχει προσομοιωθεί, είναι συμμετρικό ως προς τον εγκάρσιο άξονα που διέρχεται από το κέντρο του ελάσματος της πλάκας. Οι Alsos-Amdahl έχουν

μοντελοποιήσει το μισό συμμετρικό κατασκευαστικό στοιχείο, συμπεριλαμβάνοντας το στιβαρό πλαίσιο που περιβάλλει την πλάκα, και χρησιμοποιούν συνθήκη συμμετρίας κατά τον εγκάρσιο άξονα που αναφέρθηκε. Ο Μαρινάτος δεν αναφέρεται στη συνθήκη συμμετρίας, όμως δεν έχει συμπεριλάβει το περιφερειακό πλαίσιο στο μοντέλο των πειραμάτων. Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεών του, φαίνεται πως έχει ορίσει συνθήκη πάκτωσης στην περίμετρο της πλάκας, γεγονός που δεν απέχει πολύ από την πραγματικότητα, όπως αναφέρθηκε στο εδάφιο 4.1.1.

Μοντελοποίηση επαφής

Για τη μοντελοποίηση της επαφής, οι Alsos-Amdahl χρησιμοποιούν την ρουτίνα "surface to surface contact" του LS-DYNA ενώ ο Μαρινάτος την επιλογή General Contact του ABAQUS/Explicit, αναγνωρίζοντας την επαφή μεταξύ όλων των επιφανειών ("all with self"). Και οι δύο ερευνητές θεωρούν συντελεστή τριβής ίσο με 0.3, μία τιμή που είναι αντιπροσωπευτική για χάλυβα, χωρίς λιπαντικά, έλαια ή υγρασία στην επιφάνειά του.

Ταχύτητα διεισδυτή

Οι Alsos-Amdahl δεν αναφέρουν την ταχύτητα που έχει ο διεισδυτής στην προσομοίωσή τους. Ο Μαρινάτος αυξάνει την ταχύτητα που προβλέπεται από το πείραμα (10mm/min) σε 3m/sec στην προσομοίωσή του, ώστε να μειώσει τον υπολογιστικό χρόνο, φροντίζοντας ταυτόχρονα να μην επηρεάζονται τα αποτελέσματα του από επιδράσεις της αδράνειας. Αυτό ελέγχεται με την σύγκριση της συνολικής κινητικής ενέργειας σε σχέση με την ενέργεια παραμόρφωσης, όπως αναφέρθηκε στο 3.4.2. Ο Μαρινάτος σημειώνει πως η επιλεχθείσα ταχύτητα οδηγεί σε αποδεκτή τιμή κινητικής ενέργειας ίση με το 1% της ενέργειας παραμόρφωσης (ένα σύνηθες όριο είναι το 5%).

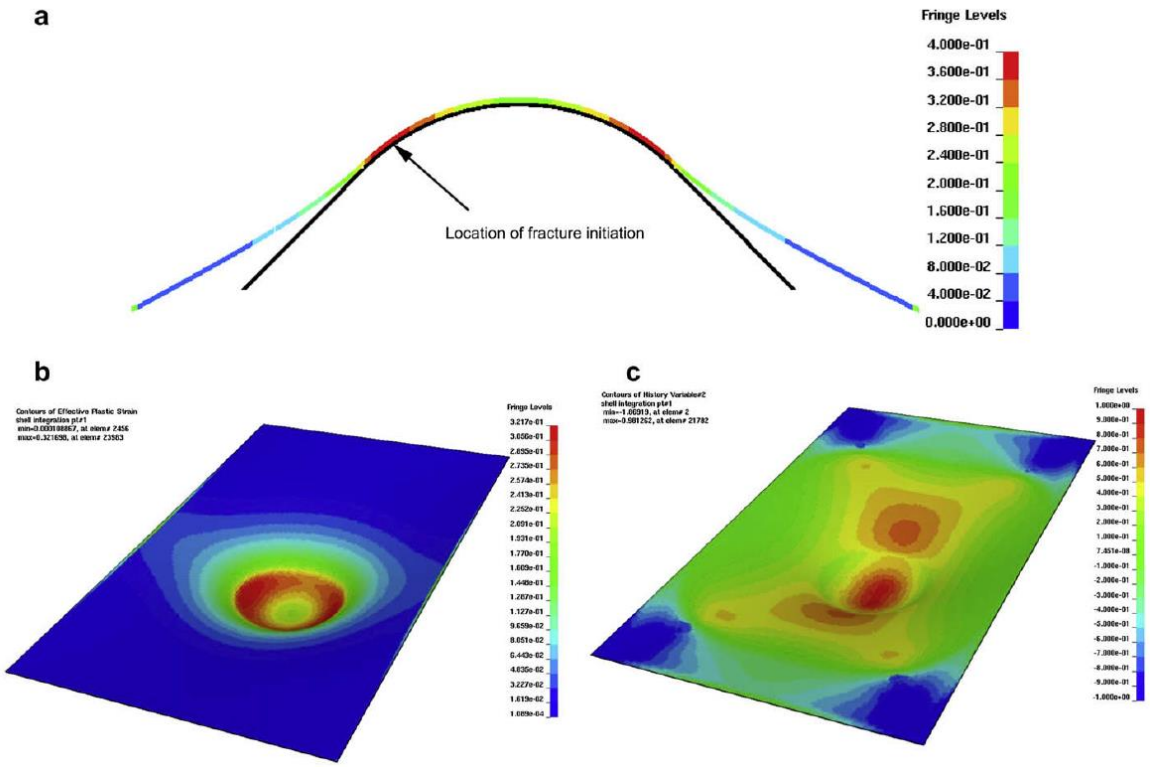
4.2.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης των πειραμάτων των Alsos και Amdahl [8] στα οποία έχει χρησιμοποιηθεί το κριτήριο RTCL και του Μαρινάτου στα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί τα κριτήρια RTCL και Ισοδύναμης Πλαστικής Παραμόρφωσης [23]. Η διαλογή αυτή έγινε γιατί είναι σκόπιμο τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης να συγκριθούν με τα αποτελέσματα των άλλων ερευνητών που προέκυψαν με παρόμοια διαδικασία μοντελοποίησης

Πλάκα χωρίς ενισχυτικά (US)

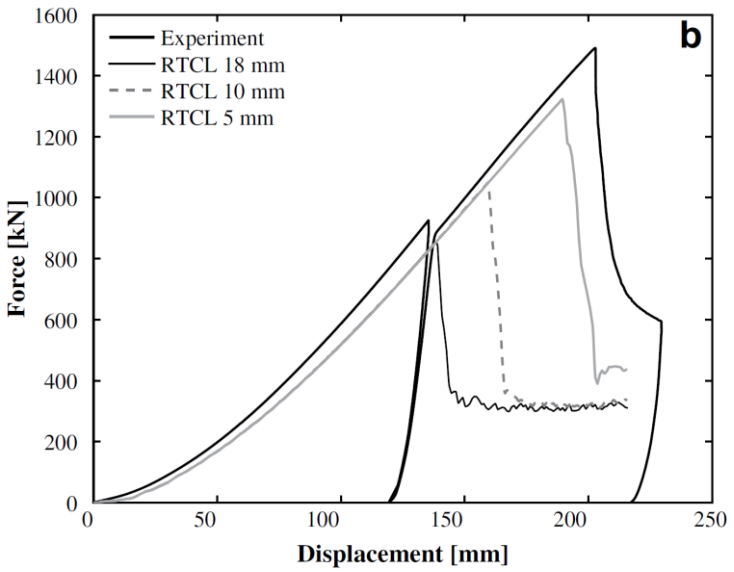
Ενδεχομένως, το αριθμητικό μοντέλο των Alsos και Amdahl να μην κατάφερε να αποτυπώσει τη μορφή αστοχίας του φυσικού μοντέλου, καθώς οι μελετητές δεν παραθέτουν το ανάλογο σχήμα στη δημοσίευσή τους. Στο Σχήμα 4-13 α, β φαίνεται η κατανομή ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης η οποία μαρτυρά τις περιοχές έναρξης αστοχίας. Στην πορεία της προσομοίωσης, φαίνεται να δημιουργούνται δύο ρωγμές, σε

αντίθεση με το πείραμα όπου μία και μόνο ρωγμή διαδίδεται (Σχήμα 4-5). Οι «ατέλειες» του φυσικού μοντέλου οδηγούν σε ασυμμετρία της παραμόρφωσης και μορφής αστοχίας του ελάσματος με τρόπο που το αριθμητικό μοντέλο δεν μπορεί να περιγράψει.



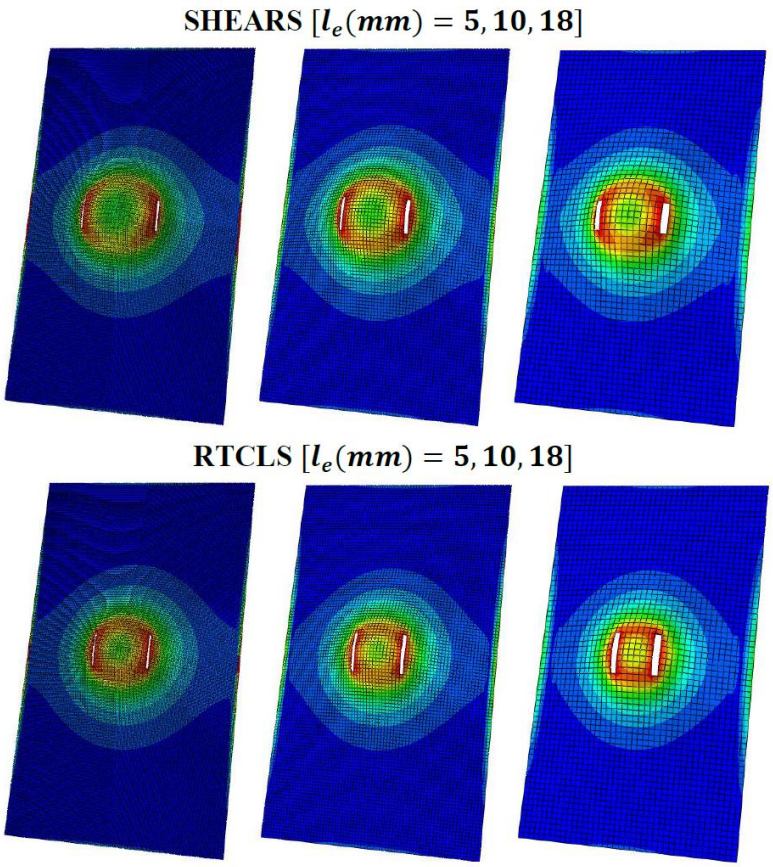
Σχήμα 4-13: Μορφή αστοχίας αριθμητικού μοντέλου US των Alsos-Amdahl [8] α) κατανομή ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης στη διατομή του ελάσματος, β) κατανομή ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης στην επιφάνεια του ελάσματος, γ) κατανομή λόγου παραμορφώσεων στην επιφάνεια του ελάσματος

Στο Σχήμα 4-14 παρουσιάζονται οι καμπύλες απόκρισης του αριθμητικού μοντέλου των Alsos και Amdahl που είναι διακριτοποιημένο με τρία χαρακτηριστικά μεγέθη πεπερασμένων στοιχείων. Όπως φαίνεται, η πύκνωση του πλέγματος αυξάνει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Αξίζει να σημειωθεί, ότι δεν υπάρχουν συγκεντρώσεις παραμορφώσεων λόγω ασυνεχειών στην πλάκα, τις οποίες το αραιότερο πλέγμα δεν μπορεί να συλλάβει αποτελεσματικά. Συνεπώς, η αύξηση της ακρίβειας της καμπύλης απόκρισης οφείλεται στην αύξηση της τιμής της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης αστοχίας, για το στοιχείο μικρότερου μεγέθους, όπως συζητήθηκε στο υποκεφάλαιο 3.2.



Σχήμα 4-14: Καμπύλη απόκρισης αριθμητικού μοντέλου US των Alsos-Amdahl [8]

Στο Σχήμα 4-15 παρουσιάζεται η μορφή αστοχίας που προβλέπουν έξι αριθμητικές προσομοιώσεις του Μαρινάτου ανάλογα με το μέγεθος του στοιχείου και το κριτήριο αστοχίας. Ο μελετητής αντιμετώπισε την ίδια δυσκολία με τους Alsos και Amdahl στην πρόβλεψη της μορφής αστοχίας, η οποία δεν ήταν απολύτως ακριβής για κανέναν συνδυασμό παραμέτρων.

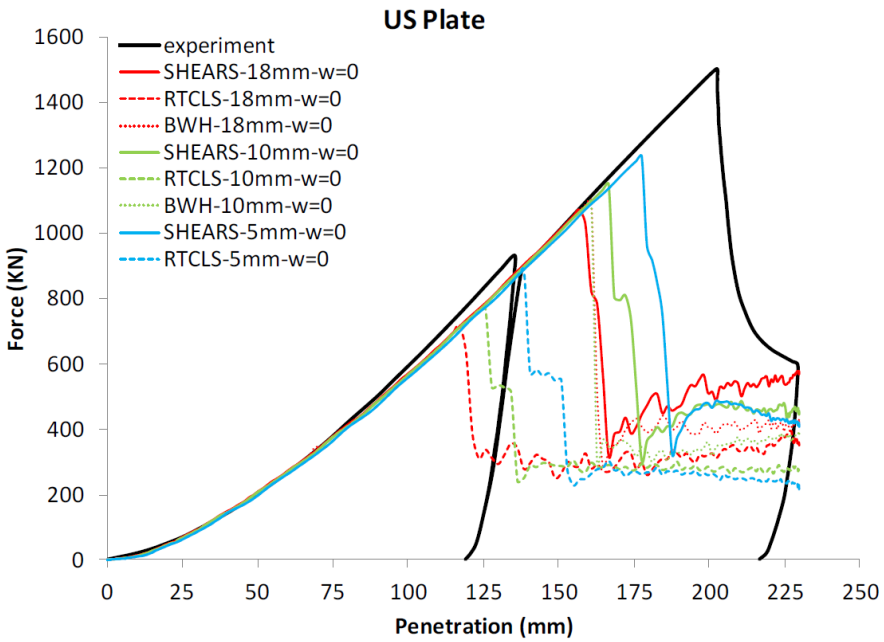


Σχήμα 4-15: Μορφή αστοχίας αριθμητικού μοντέλου US του Μαρινάτου [23]

Στο Σχήμα 4-14 παρουσιάζονται οι καμπύλες απόκρισης των αριθμητικών μοντέλων του Μαρινάτου για τη διαμόρφωση US. Όπως φαίνεται, τα ακριβέστερα αποτελέσματα προκύπτουν με τη μείωση του μεγέθους του στοιχείου και με το Κριτήριο Ισοδύναμης Πλαστικής Παραμόρφωσης θραύσης. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η μείωση του μεγέθους του στοιχείου συνοδεύεται από αύξηση της κρίσιμης ισοδύναμης παραμόρφωσης του μοντέλου υλικού. Ίδια επίδραση έχει και η εφαρμογή του Κριτηρίου Ισοδύναμης Πλαστικής Παραμόρφωσης θραύσης σε σχέση με το RTCL. Το Κριτήριο Ισοδύναμης Πλαστικής Παραμόρφωσης ρυθμίζεται με βάση το πείραμα εφελκυσμού. Στην περιοχή τριαξονικότητας 1/3<η<2/3, η καμπύλη ισοδύναμης παραμόρφωσης θραύσης – τριαξονικότητας είναι φθίνουσα, συνεπώς το RTCL προβλέπει κρίσιμη παραμόρφωση μικρότερη από αυτή του μονοαξονικού εφελκυσμού, όπως αποδεικνύεται στην Εξ. 4-1.

$$\varepsilon_{RTCL} = \varepsilon_{cr}\left(\eta > \frac{1}{3}\right) < \varepsilon_{cr}\left(\eta = \frac{1}{3}\right) = \varepsilon_{cr,uniaxial\ tension} = \varepsilon_{SHEARS} \qquad \text{Εξ. 4-1}$$

Πάρα ταύτα, ούτε το κριτήριο θραύσης BWH (Σχήμα 4-14), που βασίζεται στην τάση και όχι στην κρίσιμη παραμόρφωση, καταφέρνει να προβλέψει τη μέγιστη δύναμη αντίδρασης της πλάκας.



Σχήμα 4-16: Καμπύλη απόκρισης αριθμητικού μοντέλου US του Μαρινάτου [23]

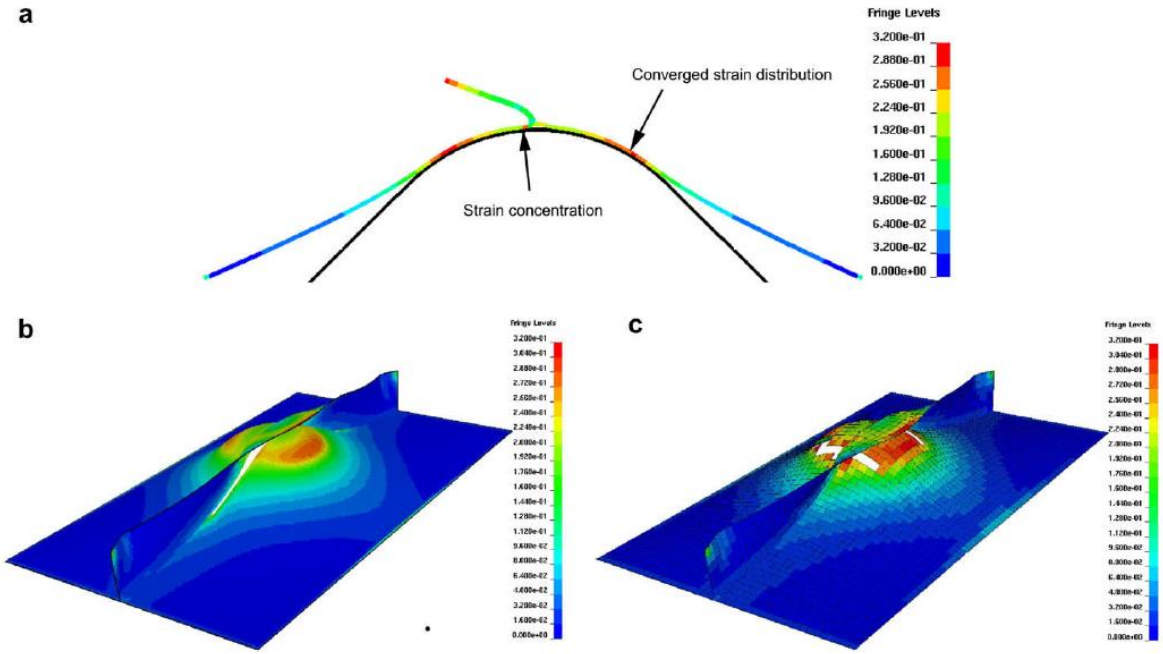
Όπως φάνηκε, το φυσικό μοντέλο έχει μεγαλύτερη αντοχή από τα αριθμητικά μοντέλα των ερευνητών. Υπάρχει, πιθανότητα, το πλαίσιο που περιβάλει την πλάκα να μπορεί να παραλάβει κάποιες μικρές παραμορφώσεις οι οποίες να κάνουν τη διαφορά στην απόκριση της κατασκευής.

Πλάκα με ένα επίπεδο ενισχυτικό (1FB)

Στο αριθμητικό μοντέλο της διαμόρφωσης ενισχυμένου ελάσματος 1FB, εμφανίζονται δύο είδη περιοχών με υψηλή ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση (Σχήμα 4-17α):

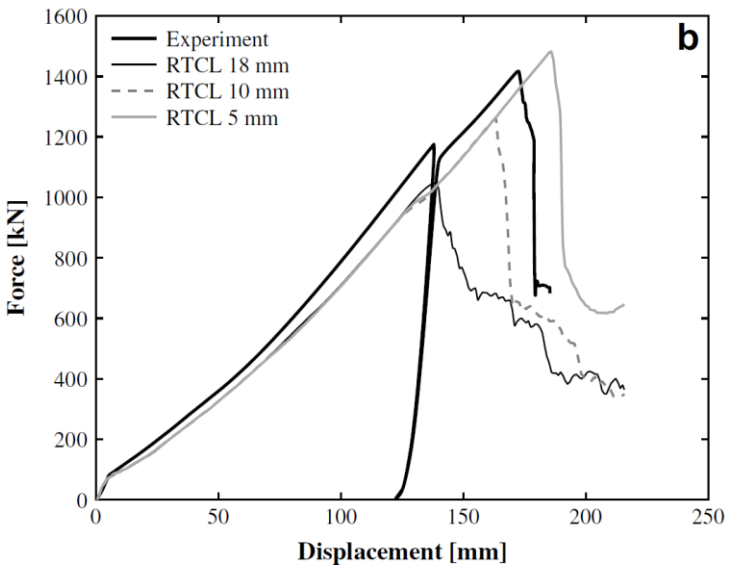
1. Σημεία εντός της περιοχής ομοιόμορφης εκλέπτυνσης της διατομής, που ο Alsos αποκαλεί "Converged strain distribution",
2. Σημεία συγκέντρωσης τάσης και παραμόρφωσης κοντά στη γεωμετρική ασυνέχεια της ένωσης της πλάκας με το ενισχυτικό.

Η μορφή αστοχίας που προβλέπει το αριθμητικό μοντέλο των Alsos και Amdahl φαίνεται στο Σχήμα 4-17 β, γ για διακριτοποίηση με πυκνό και αραιότερο πλέγμα. Η ρωγμή στο φυσικό μοντέλο δημιουργείται και διαδίδεται στην περιοχή δίπλα από την ένωση πλάκας και ενισχυτικού εξαιτίας συγκέντρωσης τάσης. Η συγκέντρωση αυτή, δεν συλλαμβάνεται από τα μεγαλύτερα πεπερασμένα στοιχεία και, καθώς το λογισμικό δεν μπορεί να διακρίνει μεταξύ των περιοχών 1 και 2, η μορφή αστοχίας του πειράματος δεν προκύπτει σε μοντέλο με αραιό πλέγμα.



Σχήμα 4-17: Μορφή αστοχίας αριθμητικού μοντέλου 1FB των Alsos-Amdahl [8] α) κατανομή ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης στη διατομή του ενισχυμένου ελάσματος, β) κατανομή ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης στην επιφάνεια του ελάσματος για πυκνό πλέγμα, β) κατανομή ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης στην επιφάνεια του ελάσματος για αραιό πλέγμα

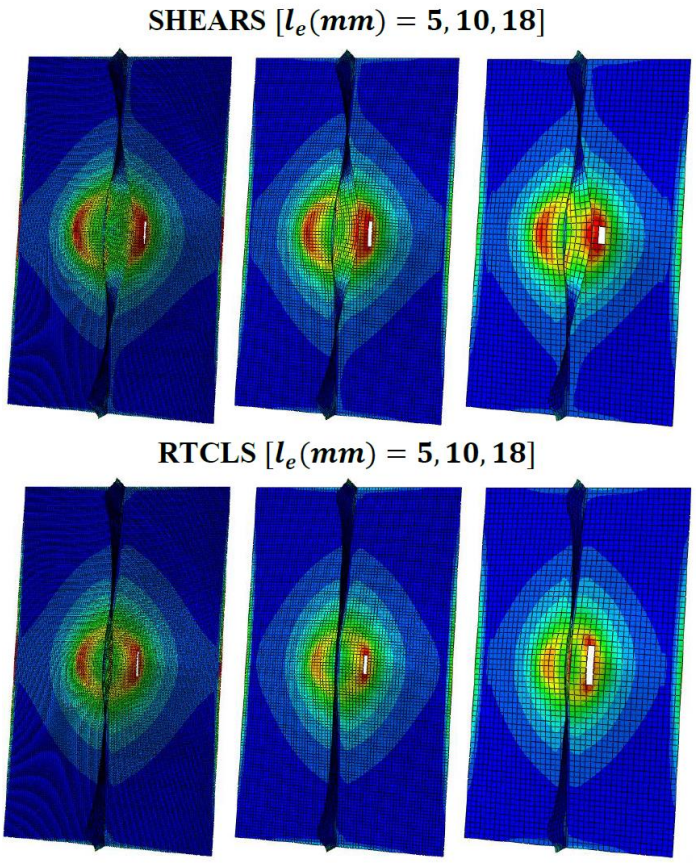
Στο Σχήμα 4-18 παρουσιάζονται οι καμπύλες απόκρισης του αριθμητικού μοντέλου των Alsos και Amdahl οι οποίες παρουσιάζουν την ίδια τάση ανάλογα με το μέγεθος του στοιχείου, όπως και για το μοντέλο US. Σε αυτήν την περίπτωση όμως, η μεγάλη διασπορά των αποτελεσμάτων συνοδεύεται και από πρόβλεψη διαφορετικών μορφών αστοχίας ανάλογα με το πλέγμα.



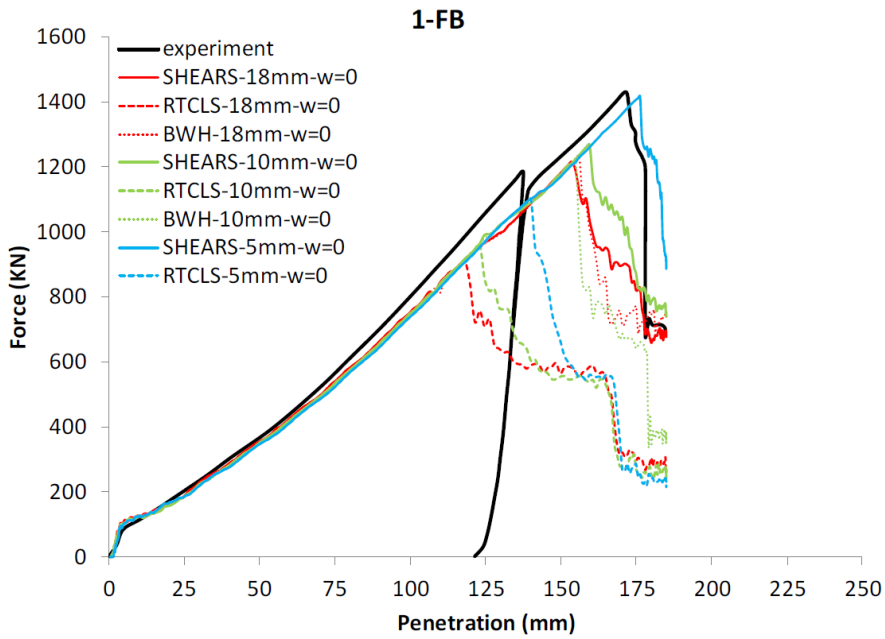
Σχήμα 4-18: Καμπύλη απόκρισης αριθμητικού μοντέλου 1FB των Alsos-Amdahl [8]

Στο Σχήμα 4-19, φαίνεται ότι κανένας συνδυασμός μεγέθους στοιχείου και κριτηρίου θραύσης, από τον Μαρινάτο, δεν ήταν κατάλληλος για την πρόβλεψη της αστοχίας του ενισχυμένου ελάσματος 1FB κοντά στην περιοχή της συγκόλλησης, όπως εμφανίστηκε στο φυσικό μοντέλο. Η συγκέντρωση τάσεων κοντά στην ένωση δεν εμφανίζεται στα αποτελέσματα, και τα μοντέλα ρηγματώνονται στην περιοχή ομοιόμορφης εκλέπτυνσης της διατομής.

Οι καμπύλες απόκρισης του αριθμητικού μοντέλου 1FB για διάφορα μεγέθη στοιχείων και κριτήρια θραύσης ακολουθούν την ίδια τάση με αυτές του μοντέλου US (Σχήμα 4-20). Καθώς η μορφή αστοχίας όλων των προσομοιώσεων είναι ίδια, οι παράγοντες που οδηγούν σε αύξηση της τιμής της ισοδύναμης παραμόρφωσης θραύσης συντελούν και στην προσέγγιση της καμπύλης απόκρισης του αριθμητικού σε αυτή του φυσικού μοντέλου.



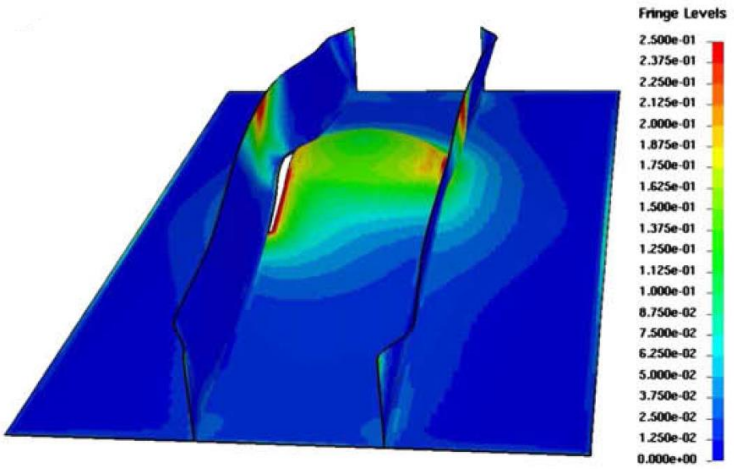
Σχήμα 4-19: Μορφή αστοχίας αριθμητικού μοντέλου 1FB του Μαρινάτου [23]



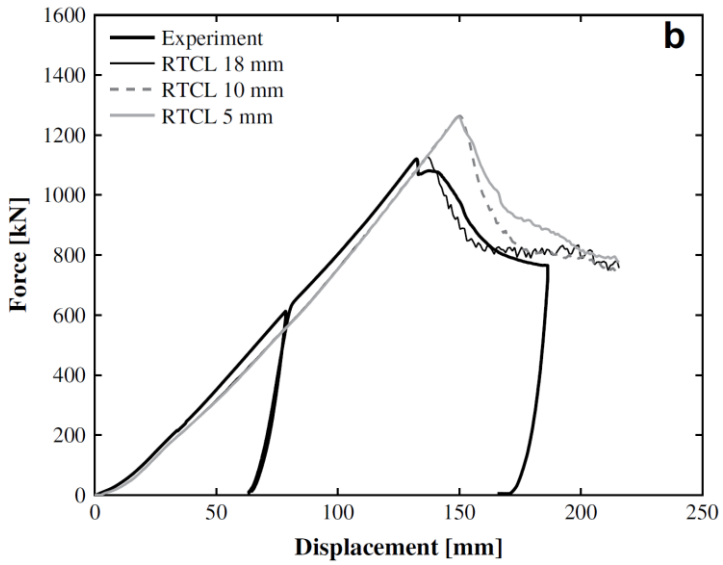
Σχήμα 4-20: Καμπύλη απόκρισης αριθμητικού μοντέλου 1FB του Μαρινάτου [23]

Πλάκα με δύο επίπεδα ενισχυτικά (2FB)

Η αριθμητική προσομοίωση έχει μεγαλύτερη επιτυχία, στην περίπτωση της ενίσχυσης της πλάκας με δύο επίπεδα ελάσματα. Γι' αυτήν την διαμόρφωση, η περιοχή εμφάνισης θραύσης για το US (1) και η περιοχή συγκέντρωσης τάσης (2) συμπίπτουν, με αποτέλεσμα η μορφή αστοχίας να προβλέπεται επιτυχώς και οι καμπύλες απόκρισης να προσεγγίζουν καλύτερα την πειραματική. Τα Σχήμα 4-21 και Σχήμα 4-22 αφορούν τις προσομοιώσεις των Alsos και Amdahl και τα Σχήμα 4-23 και Σχήμα 4-24 του Μαρινάτου. Όπως φαίνεται από τις καμπύλες, η επίδραση του μεγέθους του στοιχείου είναι ακόμη εμφανής αλλά αισθητά μικρότερη σε σχέση με τις άλλες διαμορφώσεις. Αυτό αιτιολογείται, επίσης, από την σύμπτωση των δύο περιοχών αυξημένων παραμορφώσεων και από την πρόβλεψη της ρεαλιστικής μορφής αστοχίας, για όλα τα χρησιμοποιούμενα μεγέθη στοιχείων.

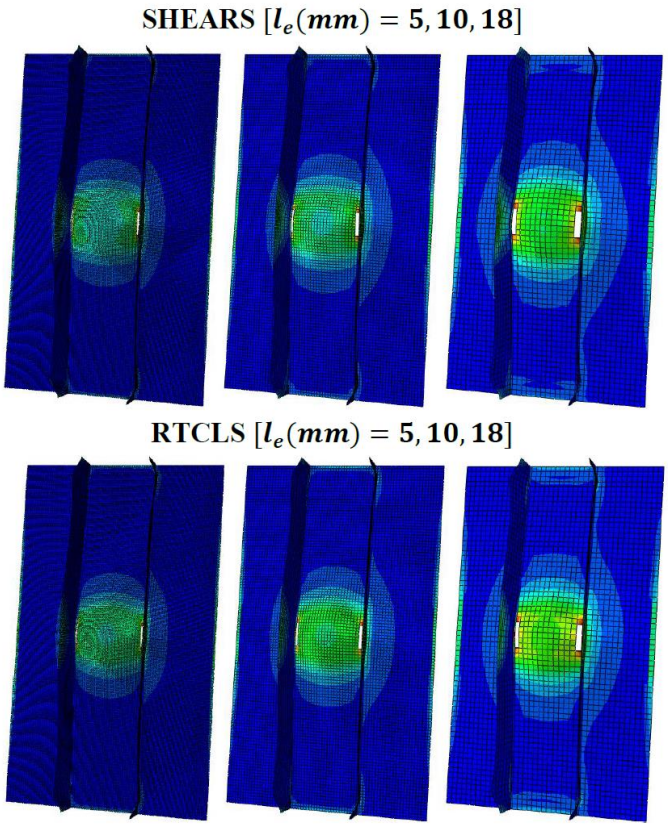


Σχήμα 4-21: Μορφή αστοχίας αριθμητικού μοντέλου 2FB των Alsos-Amdahl [8] και κατανομή ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης στην επιφάνεια του ελάσματος

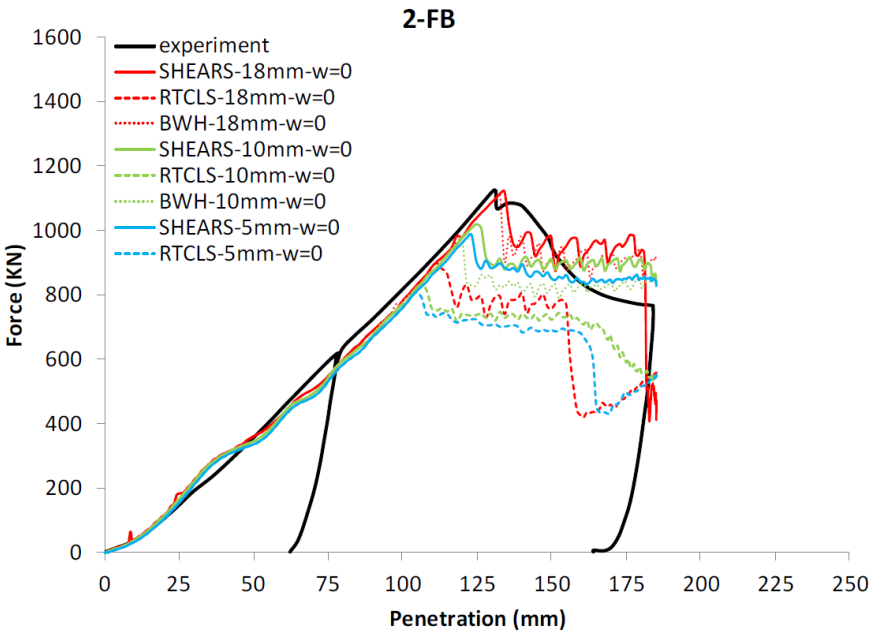


Σχήμα 4-22: Καμπύλη απόκρισης αριθμητικού μοντέλου 2FB των Alsos-Amdahl [8]

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4-23, υπάρχουν δύο συμμετρικά σημεία έναρξης ρωγμής στα αριθμητικά μοντέλα του Μαρινάτου. Όπως αναφέρθηκε στο εδάφιο 4.2.1, ο ερευνητής δεν διευκρινίζει εάν έχει εισάγει ατέλειες στη γεωμετρία και στη φόρτιση. Πιθανώς, λοιπόν, η φαινομενική συμμετρικότητα της λύσης να οφείλεται στην συμμετρικότητα του προβλήματος, όπως αυτό έχει οριστεί στο λογισμικό.



Σχήμα 4-23: Μορφή αστοχίας αριθμητικού μοντέλου 2FB του Μαρινάτου [23]



Σχήμα 4-24: Καμπύλη απόκρισης αριθμητικού μοντέλου 2FB του Μαρινάτου [8]

4.3 Μοντελοποίηση των πειραμάτων κρούσης στην παρούσα μελέτη

Σε αυτό το υποκεφάλαιο, περιγράφεται η διαδικασία και τα αποτελέσματα της αριθμητικής μοντελοποίησης των πειραμάτων που περιγράφηκαν στο εδάφιο 4.1.1 και αφορούν την παρούσα μελέτη.

4.3.1 Παράμετροι μοντελοποίησης

Μία αριθμητική προσομοίωση δεν μπορεί ποτέ να αναπαραστήσει πλήρως το πραγματικό γεγονός, λόγω υποθέσεων και απλοποιήσεων που γίνονται κατά την κατασκευή του αριθμητικού μοντέλου και, ως εκ τούτου, επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά του. Σε όλες τις αριθμητικές προσομοιώσεις, είναι σημαντική η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο εμπλέκονται και επηρεάζουν τα αποτελέσματα οι διάφορες παράμετροι. Στις παρακάτω παραγράφους περιγράφεται ο τρόπος κατασκευής του αριθμητικού μοντέλου στο ABAQUS, μέσω της ρύθμισης των παραμέτρων που το συνθέτουν.

<u>Χρονική Διακριτοποίηση</u>

Για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος που περιλαμβάνει επαφή μεταξύ δύο σωμάτων, η προτιμώμενη μέθοδος χρονικής διακριτοποίησης είναι η άμεση (explicit), όπως αναφέρθηκε στο εδάφιο 3.4.1. Η χρήση της μεθόδου αυτής βοηθά στην εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου σε μη γραμμικά προβλήματα. Η ρύθμιση μη γραμμικής γεωμετρίας (Edit Step> Nlgeom On), ώστε το πρόγραμμα να μην θεωρήσει αριθμητικό σφάλμα τις μεγάλες παραμορφώσεις των στοιχείων σε κάθε χρονικό βήμα, είναι αυτόματα επιλεγμένη στην ανάλυση με άμεση μέθοδο.

Η άμεση μέθοδος είναι εν γένει σταθερή υπό προϋποθέσεις, δηλαδή η σύγκλισή της εξαρτάται από το μέγεθος του χρονικού βήματος. Επιλέγεται ο αυτόματος τρόπος ρύθμισης του χρονικού βήματος και η αρχική εκτίμηση του ευσταθούς βήματος εκτιμάται βάσει του μέσου μεγέθους του στοιχείου, καθώς δεν υπάρχει μεγάλη διακύμανση του l_e. Το λογισμικό ABAQUS εφαρμόζει την άμεση μέθοδο των κεντρικών διαφορών η οποία είναι σταθερή για μέγεθος χρονικού βήματος όσο φαίνεται στην Εξ. 4-2, όπου $\omega_{\max}$ και $\zeta_{\max}$ είναι η μέγιστη ιδιοσυχνότητα του συστήματος και η κρίσιμη απόσβεση αυτής, αντίστοιχα.

$$\Delta t_{ευσταθές} \leq \frac{2}{\omega_{max}}\left(\sqrt{1+\zeta_{max}^2}-\zeta_{max}\right) \qquad \text{Εξ. 4-2}$$

Προσεγγιστικά μπορεί να θεωρηθεί ότι η μέθοδος είναι ευσταθής, όταν το χρονικό βήμα είναι μικρότερο από το χρόνο που χρειάζεται ένα ηχητικό κύμα να διέλθει μέσα από ένα πεπερασμένο στοιχείο (Εξ. 4-3).

$$\Delta t_{\varepsilon\upsilon\sigma\tau\alpha\theta\acute{\varepsilon}\varsigma} \approx \frac{l_{min}}{c_{dw}} \qquad \text{Εξ. 4-3}$$

L_{min} είναι η μικρότερη πλευρά πεπερασμένου στοιχείου στο πλέγμα και c_{dw} είναι η ταχύτητα ενός κύματος διαστολής μέσω του υλικού (ιδιότητα του υλικού).

Χωρική διακριτοποίηση

Για την προσομοίωση των πειραμάτων χρησιμοποιούνται στοιχεία Belytschko-Lin-Tsay της βιβλιοθήκης Explicit (τετρακομβικά στοιχεία κελύφους, μειωμένης ολοκλήρωσης, με πέντε στρώσεις κατά το πάχος), με διπλή ακρίβεια. Το πάχος που ανατίθεται στα στοιχεία κελύφους ταυτίζεται με το πάχος του ελάσματος από το εκάστοτε υλικό, όπως έχει αναλυθεί. Οι προσομοιώσεις εκτελούνται για χαρακτηριστικό μέγεθος πεπερασμένων στοιχείων, le= 6.25mm, 10mm, 12.5mm και 15mm.

Μοντέλο Υλικού

Ο διεισδυτής μοντελοποιείται στο λογισμικό ως τρισδιάστατο άκαμπτο κέλυφος. Θεωρείται, δηλαδή, ότι δεν παραλαμβάνει παραμορφώσεις, επομένως δεν είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων του υλικού του (3D analytic rigid shell).

Το μοντέλο του ενισχυμένου ελάσματος (χωρίς το πλαίσιο) αποτελείται από δύο χάλυβες, όπως αναφέρεται στο εδάφιο 4.1.1. Οι παράμετροι του μοντέλου των υλικών αυτών παρατίθενται στο υποκεφάλαιο 3.4. Στο μοντέλο των υλικών που εισάγεται στην κύρια προσομοίωση, λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της τριαξονικότητας στο κριτήριο θραύσης, η οποία διαφέρει σε κάθε περιοχή του μοντέλου και σε κάθε χρονική στιγμή. Η διαδικασία περιγράφτηκε στο εδάφιο 3.3.4. Χρησιμοποιείται το κριτήριο Rice-Tracey (Εξ. 3-34) και ελέγχεται η επίδραση της μεταβολής της τιμής της παραμέτρου c_{hm} στα αποτελέσματα -χρησιμοποιούνται τιμές 3/2 και 2. Το κριτήριο καλιμπράρεται, όπως εξηγήθηκε, με την τιμή της ισοδύναμης παραμόρφωσης εκκίνησης αστοχίας σε συνθήκες μονοαξονικού εφελκυσμού, η οποία αναγράφεται στους πίνακες Πίνακας 3-2 και Πίνακας 3-3 για το χάλυβα 1 και το χάλυβα 2, αντίστοιχα, και για κάθε μέγεθος στοιχείου. Τελικά, εφαρμόζεται μία σχέση της μορφής Εξ. 3-47. Οι κρίσιμες τιμές ισοδύναμης παραμόρφωσης του κριτηρίου αστάθειας για κάθε υλικό και μέγεθος στοιχείου φαίνονται στον Πίνακας 4-1 και Πίνακας 4-2. Για c_{hm}=0, το κριτήριο αστοχίας μεταπίπτει στο Κριτήριο Ισοδύναμης Πλαστικής Παραμόρφωσης.

Πίνακας 4-1: Ισοδύναμη παραμόρφωση Damage Initiation του μοντέλου υλικού, για κάθε έλασμα και μέγεθος πεπερασμένου στοιχείου, συναρτήσει της τριαξονικότητας, με βάση τη σχέση Rice-Tracey και με c_{hm}=2

Σχέση Rice Tracey με c_{hm} = 2								
le [mm]	**6.25**		**10**		**12**		**15**	
Έλασμα	**Πλάκα**	**FB**	**Πλάκα**	**FB**	**Πλάκα**	**FB**	**Πλάκα**	**FB**
η								
-1/3	0.3815	0.2600	0.3650	0.3060	0.3360	0.2865	0.3335	0.2850
1/3	**0.3815**	**0.2600**	**0.3650**	**0.3060**	**0.3360**	**0.2865**	**0.3335**	**0.2850**
0.4	0.3339	0.2275	0.3194	0.2678	0.2941	0.2507	0.2919	0.2494
0.5	0.2734	0.1863	0.2615	0.2193	0.2408	0.2053	0.2390	0.2042
0.6	0.2238	0.1525	0.2141	0.1795	0.1971	0.1681	0.1956	0.1672
0.7	0.1832	0.1249	0.1753	0.1470	0.1614	0.1376	0.1602	0.1369
0.8	0.1500	0.1022	0.1435	0.1203	0.1321	0.1127	0.1311	0.1121
0.9	0.1228	0.0837	0.1175	0.0985	0.1082	0.0922	0.1074	0.0918
1	0.1006	0.0685	0.0962	0.0807	0.0886	0.0755	0.0879	0.0751

Πίνακας 4-2: Ισοδύναμη παραμόρφωση Damage Initiation του μοντέλου υλικού, για κάθε έλασμα και μέγεθος πεπερασμένου στοιχείου, συναρτήσει της τριαξονικότητας, με βάση τη σχέση Rice-Tracey και με c_{hm}=1.5

Σχέση Rice Tracey με c_{hm} = 1.5								
le [mm]	**6.25**		**10**		**12**		**15**	
Έλασμα	**Πλάκα**	**FB**	**Πλάκα**	**FB**	**Πλάκα**	**FB**	**Πλάκα**	**FB**
η								
-1/3	0.3815	0.2600	0.3650	0.3060	0.3360	0.2865	0.3335	0.2850
1/3	**0.3815**	**0.2600**	**0.3650**	**0.3060**	**0.3360**	**0.2865**	**0.3335**	**0.2850**
0.4	0.3452	0.2353	0.3303	0.2769	0.3040	0.2592	0.3018	0.2579
0.5	0.2971	0.2025	0.2843	0.2383	0.2617	0.2231	0.2597	0.2220
0.6	0.2557	0.1743	0.2447	0.2051	0.2252	0.1920	0.2236	0.1910
0.7	0.2201	0.1500	0.2106	0.1765	0.1939	0.1653	0.1924	0.1644
0.8	0.1894	0.1291	0.1813	0.1520	0.1669	0.1423	0.1656	0.1415
0.9	0.1631	0.1111	0.1560	0.1308	0.1436	0.1225	0.1425	0.1218
1	0.1403	0.0956	0.1343	0.1126	0.1236	0.1054	0.1227	0.1048

Κράμα μοντέλου υλικού παρούσας εργασίας και μελέτης Alsos-Amdahl [8]

Όπως έχει γίνει κατανοητό, ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι το μοντέλο του υλικού. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της παρούσας μελέτης συγκρίνονται με τα πειραματικά, αλλά και με τα αποτελέσματα άλλων ερευνητών. Καθώς και οι μελετητές της βιβλιογραφίας εστιάζουν κυρίως στο μοντέλο του υλικού στις προσομοιώσεις τους, είναι σκόπιμη η εύρεση της επίδρασης των υπολοίπων παραμέτρων μοντελοποίησης στα

αποτελέσματα. Γι αυτό το λόγο, έχει ενδιαφέρον να εξετασθεί το αποτέλεσμα μίας προσομοίωσης στην οποία όλες οι παράμετροι ρυθμίζονται με τον τρόπο που περιγράφεται στο παρόν εδάφιο, με εξαίρεση το μοντέλο του υλικού (όπως αυτό αναφέρθηκε παραπάνω). Δημιουργείται ένα μοντέλο υλικού της πλάκας που βασίζεται στην μεθοδολογία των Alsos και Amdahl και εισάγεται στις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας. Η διαφορά που θα έχει η καμπύλη απόκρισης και η μορφή αστοχίας της προσομοίωσης αυτής με τα αποτελέσματα των Alsos και Amdahl θα οφείλεται κυρίως στη ρύθμιση των παραμέτρων πέραν του μοντέλου υλικού.

Μετά το όριο αντοχής, η πραγματική καμπύλη υλικού ακολουθεί τον εκθετικό νόμο με σταθερές υλικού, όπως παρατίθενται στην Εξ. 4-4.

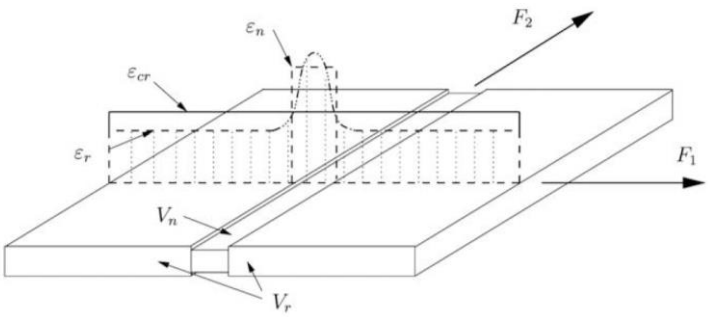
$$K_{plate} = 740\ MPa, n_{plate} = 0.24$$
$$K_{FB} = 760\ MPa, n_{FB} = 0.225$$

Εξ. 4-4

Από την μοντελοποίηση των πειραμάτων εφελκυσμού που εκτελεί ο Alsos [8], βρίσκει με τη μέθοδο αντίστροφης μηχανικής ότι για χαρακτηριστικό μήκος στοιχείου ίσο με το πάχος του υλικού ή ισοδύναμη παραμόρφωση στο σημείο δημιουργίας λαιμού είναι:

$$\varepsilon_{n,plate}(le = t = 5mm) = 0.71$$

Εξ. 4-5



Σχήμα 4-25: Απλοποιημένη αναπαράσταση της διαδικασίας για την παραγωγή της κρίσιμης ισοδύναμης παραμόρφωσης του στοιχείου κελύφους [8]

Όπως αναφέρθηκε στο εδάφιο 3.2.1, οι Alsos και Amdahl εισάγουν την επίδραση του μεγέθους του στοιχείου στην τιμή της ισοδύναμης παραμόρφωσης αστοχίας. Γίνεται η υπόθεση, ότι ο λαιμός που θα σχηματιστεί θα έχει διαστάσεις t x t. Η κρίσιμη ισοδύναμη παραμόρφωση αστοχίας του στοιχείου, ε_{cr}, είναι ο ζυγισμένος, με τον όγκο, μέσος όρος της ισοδύναμης παραμόρφωσης εντός, ε_n, και εκτός, ε_r, του λαιμού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-25. Με τη δημιουργία λαιμού η ισοδύναμη παραμόρφωση στο υπόλοιπο στοιχείο παραμένει σταθερή και ίση με την παραμόρφωση στο όριο αντοχής, ε_{cr}=n. Επομένως, με την έκφραση των όγκων V_r και V_n συναρτήσει των διαστάσεων του στοιχείου, η εξίσωση εύρεσης της κρίσιμης ισοδύναμης παραμόρφωσης σε συνθήκες μονοαξονικού εφελκυσμού είναι η Εξ. 4-6.

$$\varepsilon_{cr}(l_e) = n + (\varepsilon_n - n) * \frac{t}{l_e} \qquad \text{Εξ. 4-6}$$

Η ισοδύναμη παραμόρφωση αστοχίας είναι, πέρα από συνάρτηση του μεγέθους του στοιχείου, εξαρτώμενη από την τιμή της τριαξονικότητας. Οι Alsos και Amdahl χρησιμοποιούν το κριτήριο RTCL στη μελέτη τους, το οποίο καλιμπράρουν με την ισοδύναμη παραμόρφωση αστοχίας σε συνθήκες μονοαξονικού εφελκυσμού. Η σταθερά c_{RT} έχει τεθεί από τους ερευνητές ίση με 3/2, όπως στο αρχικό μοντέλο των Rice Tracey. Έτσι, συμπληρώνεται ο Πίνακας 4-3 με τις τιμές ισοδύναμης παραμόρφωσης αστάθειας, με παρόμοιο τρόπο όπως και προηγουμένως.

Πίνακας 4-3: Ισοδύναμη παραμόρφωση Damage Initiation του μοντέλου υλικού του Alsos, για κάθε έλασμα και μέγεθος πεπερασμένου στοιχείου, συναρτήσει της τριαξονικότητας, με βάση τη σχέση Rice-Tracey και με cRT=1.5

Σχέση Rice Tracey με c_{hm} = 1.5 (Μοντέλο Υλικού Alsos)								
le [mm]	**6.25**		**10**		**12**		**15**	
Έλασμα	**Πλάκα**	**FB**	**Πλάκα**	**FB**	**Πλάκα**	**FB**	**Πλάκα**	**FB**
η								
-0.33333	0.6160	0.6906	0.4750	0.5160	0.4280	0.4578	0.3967	0.4190
0.3333	**0.6160**	**0.6906**	**0.4750**	**0.5160**	**0.4280**	**0.4578**	**0.3967**	**0.4190**
0.4	0.5574	0.6249	0.4298	0.4669	0.3873	0.4142	0.3589	0.3791
0.5	0.4797	0.5378	0.3699	0.4019	0.3333	0.3565	0.3089	0.3263
0.6	0.4129	0.4629	0.3184	0.3459	0.2869	0.3069	0.2659	0.2809
0.7	0.3554	0.3984	0.2741	0.2977	0.2469	0.2641	0.2289	0.2417
0.8	0.3059	0.3429	0.2359	0.2562	0.2125	0.2273	0.1970	0.2081
0.9	0.2633	0.2952	0.2030	0.2205	0.1829	0.1957	0.1695	0.1791
1	0.2266	0.2541	0.1747	0.1898	0.1575	0.1684	0.1459	0.1541

Όπως αναφέρθηκε στο εδάφιο 3.2.1, οι Alsos και Amdahl αμελούν το τμήμα της καμπύλης υλικού μετά την έναρξη της αστάθειας. Συνεπώς, το στοιχείο απομακρύνεται από το πλέγμα αμέσως μετά το Damage Initiation. Αυτό γίνεται, στην παρούσα εργασία, με τη ρύθμιση ενός πολύ σύντομου Damage Evolution – η μεταβλητή Damage Degradation φτάνει τη μέγιστη τιμή της για απειροστή περαιτέρω επιμήκυνση του στοιχείου.

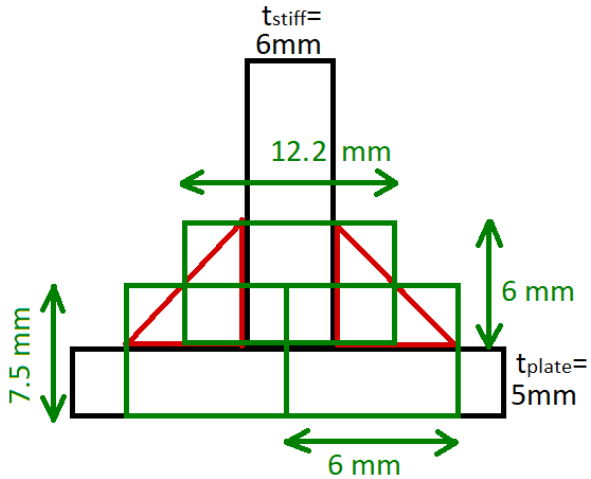
Μοντελοποίηση συγκολλήσεων

Αρχικά, μοντελοποιείται η αλλαγή της διατομής του ενισχυμένου ελάσματος, εξαιτίας της παρουσίας του μετάλλου προσθήκης. Για τη μοντελοποίηση της ραφής, μία σειρά στοιχείων πλάτους 6 mm, που γειτνιάζουν με τη συμβολή των ελασμάτων, δέχεται προσαύξηση πάχους. Στην παρούσα εργασία, η προσαύξηση του πάχους στο ενισχυτικό ισομοιράζεται στις δύο πλευρές του ελάσματος, ενώ η προσαύξηση του πάχους της

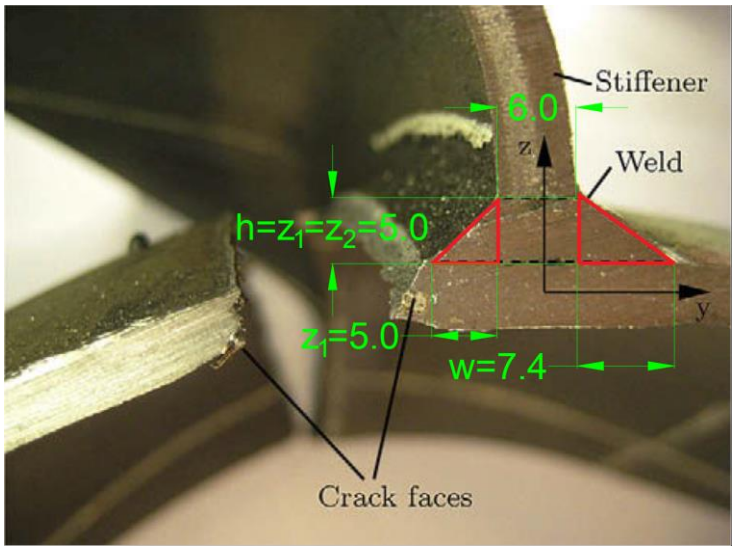
πλάκας τοποθετείται μόνο από την πλευρά στην οποία γίνεται η ραφή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-26. Για την τιμή της προσαύξησης, δεν παίζει ρόλο μόνο η τιμή του πόδα, όπως ορίστηκε στο εδάφιο 4.1.1, αλλά οι διαστάσεις της ραφής. Στο Σχήμα 4-27 μετρούνται οι διαστάσεις των ραφών συγκόλλησης που απεικονίζονται στη φωτογραφία του Σχήμα 4-10β. Όπως φαίνεται, το κορδόνι στη δεξιά πλευρά του ενισχυτικού έχει πλεονάζον μέταλλο συγκόλλησης καθώς η μία πλευρά του είναι 5 mm και η άλλη 7.4 mm. Συνεπώς, η προσαύξηση του πάχους του ενισχυτικού ισούται με το μισό του ύψους της ραφής, h, και η προσαύξηση του πάχους της πλάκας ισούται με το μισό του αθροίσματος των πλατών των δύο ραφών, z_1 και w. Τελικά, το πάχος της σειράς στοιχείων που αντιπροσωπεύουν τη ραφή υπολογίζεται από την Εξ. 4-7.

$$t_{weld,plate} = t_{plate} + \frac{z_1 + w}{2} = 5 + \frac{5 + 7.4}{2} = 12.2$$
$$t_{weld,stiff} = t_{stiff} + \frac{z_2}{2} = 6 + \frac{5}{2} = 7.5$$

Εξ. 4-7



Σχήμα 4-26: Προσομοίωση της ραφής συγκόλλησης, στην παρούσα εργασία. Τα γειτονικά, στην ένωση, στοιχεία έχουν αυξημένο πάχος (t+ σε σχέση με το αντίστοιχο t)



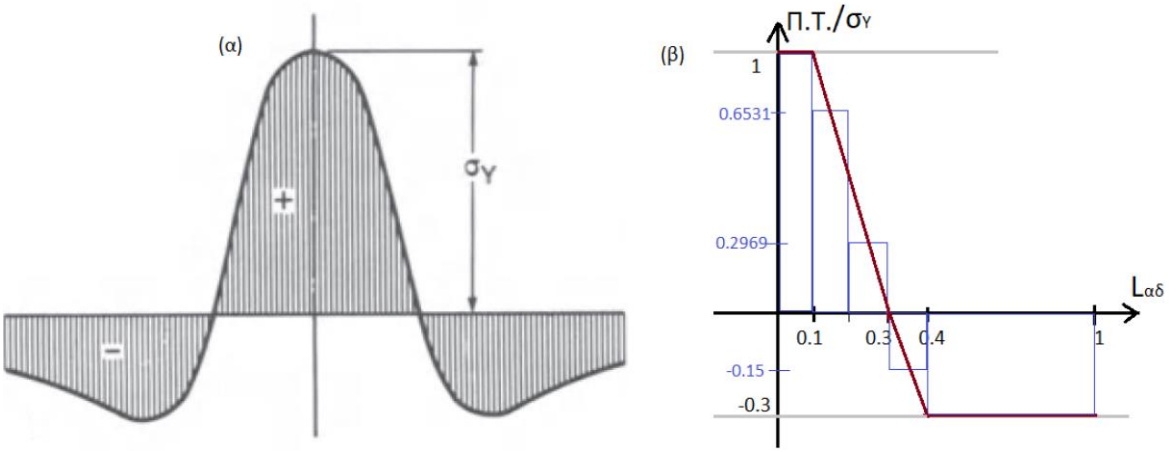
Σχήμα 4-27: Μέτρηση διαστάσεων ραφής γωνιακής συγκόλλησης από εγκάρσια τομή του πειραματικού δοκιμίου 1FB στην περιοχή της συγκόλλησης

Ακόμη διερευνάται η επιρροή που έχει το θερμικό φαινόμενο της συγκόλλησης στα αποτελέσματα, μέσω της εισαγωγής μίας κατανομής παραμενουσών τάσεων στο έλασμα της πλάκας και του ενισχυτικού. Ο έλεγχος αυτός έγινε στο μοντέλο της διαμόρφωσης 1FB, γιατί σε αυτό το μοντέλο το φορτίο του διεισδυτή εφαρμόζεται απευθείας πάνω στην περιοχή της συγκόλλησης (Σχήμα 4-3β). Το θερμικό αποτύπωμα της συγκόλλησης στα ελάσματα μοντελοποιείται, στην παρούσα εργασία, με μία κατανομή παραμενουσών τάσεων. Οι παραμένουσες τάσεις δημιουργούνται ως αποτέλεσμα κάθε διαδικασίας συγκόλλησης, εξαιτίας της τοπικής τήξης του μετάλλου. Το τελικό τους μέγεθος εξαρτάται από τα μέταλλα προσθήκης και βάσης, τη διαδικασία και τις συνθήκες συγκόλλησης, τη συγκράτηση και τις διαστάσεις των τεμαχίων την εφαρμογή προθέρμανσης ή θερμικής/μηχανικής επεξεργασίας μετά τη συγκόλληση [28]. Κατά τη στερεοποίηση του λουτρού τήξης, το μέταλλο συγκόλλησης συρρικνώνεται και ασκεί εφελκυστικές τάσεις στη γειτονική περιοχή, η οποία είναι ψυχρότερη και αντιστέκεται λόγω της υψηλότερης αντοχής της [29]. Οι τάσεις στη γειτονική της συγκόλλησης περιοχή είναι εφελκυστικές, της τάξης του ορίου διαρροής του μετάλλου και στο υπόλοιπο έλασμα θλιπτικές, ώστε να επιφέρουν ισορροπία [30].

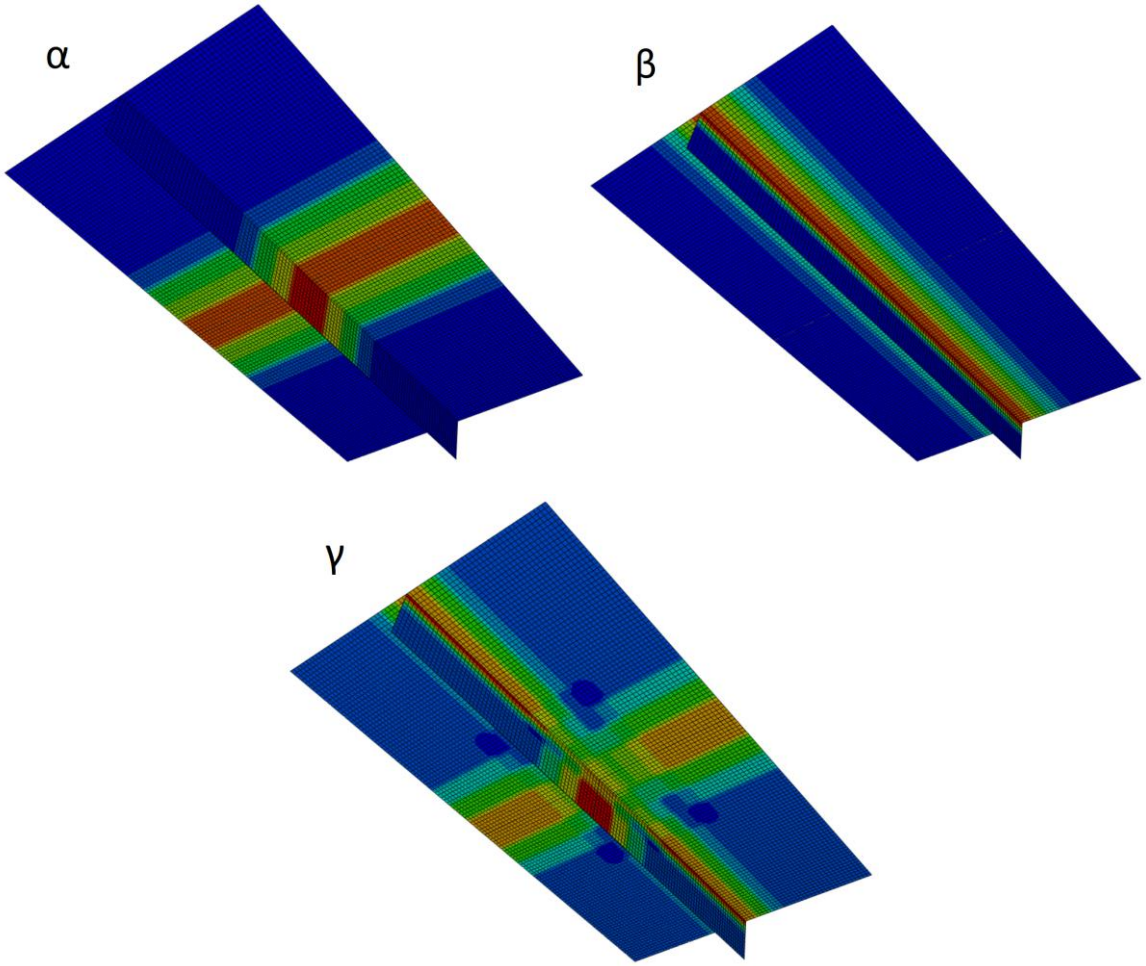
Η κατανομή των παραμενουσών τάσεων, στη διαμήκη και εγκάρσια διεύθυνση του ελάσματος, μπορεί να αναπαρασταθεί από μία καμπύλη Gauss (Σχήμα 4-28α) της οποίας η μέγιστη τιμή βρίσκεται πάνω στη συγκόλληση. Σε λεπτά ελάσματα, η κατανομή παραμενουσών τάσεων κατά το πάχος μπορεί να αμεληθεί [31]. Στο μοντέλο 1FB:

- Για το έλασμα της πλάκας, η διαμήκης παραμένουσα τάση μεγιστοποιείται στον εγκάρσιο άξονα συμμετρίας και η εγκάρσια παραμένουσα τάση μεγιστοποιείται στο διαμήκη άξονα συμμετρίας.
- Για το έλασμα του ενισχυτικού, η διαμήκης παραμένουσα τάση μεγιστοποιείται στον εγκάρσιο άξονα συμμετρίας και η εγκάρσια παραμένουσα τάση μεγιστοποιείται στο άνω άκρο (ένωση με το έλασμα της πλάκας).

Στο λογισμικό ABAQUS, η εισαγωγή των παραμενουσών τάσεων γίνεται από το "Load" module με την εντολή "Create Predefined Field" (Step>Initial, Category>Mechanical, Types for selected step>Stress). Σταθερή τιμή τάσης μπορεί να ανατεθεί σε τμήματα της γεωμετρίας ή σε ομάδες πεπερασμένων στοιχείων. Για να γίνει αυτό, η συνεχής καμπύλη Gauss (Σχήμα 4-28α) μετατρέπεται στο ραβδόγραμμα του Σχήμα 4-28β. Ο άξονας των τεταγμένων παριστά την τιμή της παραμένουσας τάσης αδιαστατοποιημένης με το όριο διαρροής και ο άξονας των τετμημένων παριστά το αδιαστατοποιημένο μήκος. Για τις διαμήκεις παραμένουσες τάσεις, ο άξονας των τετμημένων είναι x/(L/2) και για τις εγκάρσιες παραμένουσες τάσεις, ο άξονας των τετμημένων είναι y/(B/2). Τα εύρη των περιοχών μέγιστης και ελάχιστης παραμένουσας τάσης, καθώς και το ύψος της μέγιστης θλιπτικής παραμένουσας τάσης είναι ενδεικτικά. Παρόμοιες κατανομές για διάφορα υλικά περιλαμβάνονται στη βιβλιογραφία [32]. Το πλέγμα της πλάκας και των ενισχυτικών χωρίζεται κατάλληλα σε ομάδες πεπερασμένων στοιχείων σε κάθε μία από τις οποίες αντιστοιχεί ένα ζεύγος διαμήκους και εγκάρσιας τάσης. Στο Σχήμα 4-29 α, β και γ φαίνονται με χρωματική απεικόνιση οι κατανομές των παραμενουσών τάσεων που εισήχθησαν στο μοντέλο του ενισχυμένου ελάσματος 1FB με τον τρόπο που αναφέρθηκε πιο πριν.



Σχήμα 4-28: (α) Κατανομή Gauss παραμενουσών τάσεων [Rad]. (β) Αδιάστατη κατανομή παραμενουσών τάσεων που εισήχθησε στα πεπερασμένα στοιχεία. Η τετμημένη Lαδ είναι η εκάστοτε διάσταση μήκους αδιαστατοποιημένη με το μισό της μέγιστης τιμής της.



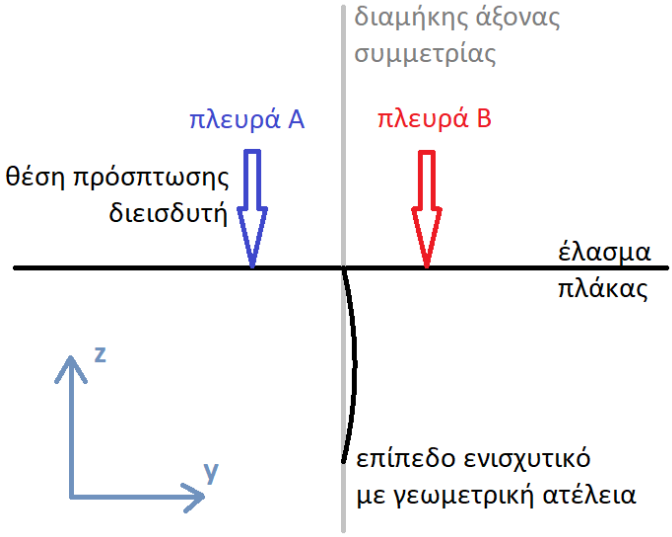
Σχήμα 4-29: Παραμένουσες τάσεις. α) διατμητική συνιστώσα, β)εγκάρσια συνιστώσα, γ)ισοδύναμη τάση κατά Mises

Στα εδάφια 4.3.2 και 4.4, όπου παρατίθενται τα αποτελέσματα, θα φανεί ότι οι παραμένουσες τάσεις δεν επηρεάζουν δραστικά το αποτέλεσμα, όσον αφορά στην καμπύλη απόκρισης και τη μορφή αστοχίας. Αυτό συμβαίνει γιατί οι τάσεις που αναπτύσσονται λόγω της εξωτερικής φόρτισης οδηγούν το υλικό βαθιά στην πλαστική περιοχή και εξουδετερώνουν τις παραμένουσες τάσεις, καθώς η διαρροή του υλικού διευκολύνει την ανακατανομή του τασικού πεδίου. Οι παραμένουσες τάσεις έχουν μεγαλύτερες συνέπειες όταν οι τάσεις λόγω της εξωτερικής φόρτισης είναι ελαστικές.

Γεωμετρικές ατέλειες

Οι γεωμετρικές ατέλειες που υποτέθηκαν στο μοντέλο είναι αυτές που πρότειναν οι Alsos και Amdahl, δηλαδή, ατέλεια στην ευθύτητα του ενισχυτικού κατά το εγκάρσιο και απόκλιση της θέση πρόπτωσης του διεισδυτή από το κέντρο του ελάσματος της πλάκας (βλ. 4.2.1). Το μοντέλο της ενισχυμένης πλάκας είναι συμμετρικό ως προς τον εγκάρσιο άξονα που διέρχεται από το κέντρο του ελάσματος της πλάκας. Η εισαγωγή ατελειών εισάγει ασυμμετρία ως προς τον διαμήκη άξονα που διέρχεται από το κέντρο της πλάκας, σε σχέση με το ιδανικό μοντέλο. Ιδιαιτέρως, στην περίπτωση του μοντέλου 1FB, πρέπει να διερευνηθεί η επιρροή που έχει στην απόκριση η σχετική θέση πρόσπτωσης του διεισδυτή ως προς την αρχική ατέλεια του ενισχυτικού. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-30, αν η αρχική ατέλεια (κύρτωση της διατομής) του ενισχυτικού είναι τέτοια ώστε αυτό αυθόρμητα τείνει να λυγίσει προς τα δεξιά, τότε διακρίνονται δύο περιπτώσεις:

a) Ο διεισδυτής βρίσκεται στην αντίθετη πλευρά με την κύρτωση του ενισχυτικού, δηλαδή τείνει να το λυγίσει αντίθετα, απ' ότι η αρχική του ατέλεια
b) Ο διεισδυτής βρίσκεται στην ίδια πλευρά με την κύρτωση του ενισχυτικού, δηλαδή τείνει να το λυγίσει σύμφωνα με την αρχική του ατέλεια.



Σχήμα 4-30: Δύο περιπτώσεις φόρτισης του μοντέλου 1FB, ανάλογα με τη σχετική θέση των ατελειών

Η φόρτιση των μοντέλων US και 2FB είναι εξίσου ασύμμετρη ως προς τον διαμήκη άξονα, όμως η γεωμετρία της ενισχυμένης πλάκας είναι συμμετρική. Συνεπώς, η τοποθέτηση του σημείου πρόσπτωσης του διεισδυτή στα θετικά ή στα αρνητικά του άξονα χ (Σχήμα 4-30) παράγει δύο συμμετρικές λύσεις.

Οριακές Συνθήκες

Εξαιτίας των περιορισμών που επιβάλλει η γεωμετρία και η στήριξη του άκαμπτου πλαισίου που περιβάλλει το ενισχυμένο έλασμα, εφαρμόστηκε συνθήκη πάκτωσης στην περιφέρεια της πλάκας. Το πιθανότερο είναι ότι το πλαίσιο δεν παραλαμβάνει σημαντικές παραμορφώσεις και συνεπώς η αντικατάστασή του με μία οριακή συνθήκη συμβάλλει στην εξοικονόμηση πολύτιμου υπολογιστικού χρόνου.

Ακόμη, μοντελοποιήθηκε το μισό συμμετρικό μοντέλο για εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου και εφαρμόστηκε συνθήκη συμμετρίας στο εγκάρσιο επίπεδο που διέρχεται από το κέντρο του ενισχυμένου ελάσματος. Η συνθήκη συμμετρίας εκφράζεται από την Εξ. 4-8, όπου u_1 είναι η διαμήκης μετατόπιση και r_2, r_3 είναι οι δύο στροφές εκτός επιπέδου συμμετρίας.

$$u_1 = r_2 = r_3 = 0 \qquad \text{Εξ. 4-8}$$

Σε κάθε περίπτωση, εξαιτίας της μη γραμμικότητας, ελέγχεται εάν η μοντελοποίηση ολόκληρου του ενισχυμένου ελάσματος οδηγεί σε λύσεις που δεν μπορούν να προβλεφθούν από την θεώρηση της συμμετρίας.

Η οριακή συνθήκη που θεωρείται, επιπλέον, αφορά τον περιορισμό της κίνησης του διεισδυτή αποκλειστικά στην κατακόρυφη διεύθυνση. Ο ορισμός της οριακής συνθήκης στο άκαμπτο κέλυφος τίθεται σε ένα σημείο αναφοράς. Το σημείο αναφοράς τίθεται στο κατώτερο σημείο του σφαιροειδούς άκρου του διεισδυτή. Αρχικά, γίνεται ένα rigid body constraint, ώστε η κίνηση του άκαμπτου κελύφους να ταυτίζεται με την κίνηση του σημείου αναφοράς, χωρίς παραμορφώσεις. Κατόπιν, τίθεται η οριακή συνθήκη $u_{1,2} = r_{1,2,3} = 0$ στο σημείο αναφοράς.

Μοντελοποίηση επαφής

Η επαφή είναι στην ουσία μία οριακή συνθήκη, σύμφωνα με την οποία η απόσταση των επιφανειών πρέπει να είναι θετική ή μηδενική. Η ρύθμιση της επαφής στο ABAQUS γίνεται από το Module “Create Interaction” και την εντολή Create Interaction. Εκεί ρυθμίζεται ο τύπος της επαφής σε General Contact και επιλέγεται το πεδίο “All with self”, ώστε να αναγνωρίζεται η επαφή μεταξύ όλων των επιφανειών στο μοντέλο – μεταξύ διαφορετικών τεμαχίων και μεταξύ διαφορετικών σημείων του ίδιου τεμαχίου. Ακόμη, πρέπει να εισαχθεί ο συντελεστής τριβής μεταξύ των επιφανειών, η τιμή του οποίου θεωρείται ίση με 0.3 για χάλυβες χωρίς λιπαντικά και υγρασία. Αυτή ορίζεται στο πεδίο “Friction Coefficient” το οποίο βρίσκεται στο παράθυρο: “Create Interaction Property> Contact> Mechanical> Tangential Behavior” και “Friction formulation>Penalty”.

Ταχύτητα διεισδυτή

Για την εφαρμογή του φορτίου πρέπει, αρχικά, να δημιουργηθεί ένα Step, δηλαδή ένα υπολογιστικό βήμα το οποίο διαρκεί συγκεκριμένο χρόνο (όχι χρονικό βήμα που σχετίζεται με τη διακριτοποίηση). Σε κάθε Step ο χρήστης μπορεί να διαφοροποιεί τα φορτία, τις αλληλεπιδράσεις των σωμάτων, τις οριακές συνθήκες, κ.α.. Στην παρούσα ανάλυση απαιτείται μόνο ένα Step στο οποίο εφαρμόζεται το φορτίο (Impact-Step) μετά το υπάρχον αρχικό βήμα (αφόρτιστη κατάσταση, Initial Step) από το Module Step με την εντολή "Create Step>Dynamic, Explicit". Το εξωτερικό φορτίο εφαρμόζεται μέσω της βύθισης του διεισδυτή η οποία εισάγεται με την αλλαγή της οριακής συνθήκης στο σημείο αναφοράς του. Η μετατόπιση u_2 τίθεται από μηδενική (στο initial step) σε μέγιστη (impact step). Η μέγιστη τιμή της μετατόπισης του διεισδυτή λαμβάνεται από τις καμπύλες απόκρισης κάθε φυσικού μοντέλου που παραθέτουν οι Alsos και Amdahl [7] (Σχήμα 4-4, Σχήμα 4-6, Σχήμα 4-8). Για να εφαρμοστεί το φορτίο σταδιακά και όχι ακαριαία πρέπει να αποδοθεί η κατάλληλη ιδιότητα στο Step, από το Amplitude>Smooth Step. Εκεί συμπληρώνεται ο πίνακας " Time vs Amplitude", όπου ορίζεται ο ρυθμός επιβολής του φορτίου. Στην παρούσα εφαρμογή το Step Time τίθεται ίσο με 0.1 επομένως, σε αυτό το χρόνο, τίθεται Amplitude=1, δηλαδή ο διεισδυτής φτάνει τη μέγιστη βύθιση με το πέρας του Step και η ταχύτητα του είναι σταθερή. Η ταχύτητα του διεισδυτή προκύπτει ως u_2/step time και είναι γύρω στα 2 m/sec. Είναι φανερό, ότι η προσομοίωση του πειράματος έχει επιταχυνθεί σε σχέση με το πείραμα (10mm/min), χωρίς όμως βλάβη της θεώρησης της ψευδο-στατικότητας. Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, γίνεται ο έλεγχος της κινητικής ενέργειας ως ποσοστό της συνολικής ενέργειας παραμόρφωσης.

Ρυθμίσεις Job

Για την εκτέλεση της προσομοίωσης συντάσσεται το αρχείο job (Module Job>Create Job) με ανάλυση ABAQUS/Explicit και διπλή ακρίβεια στους υπολογισμούς (Full Precision).

Έξοδοι (Field Outputs και History Outputs)

Όπως αναφέρθηκε και στο εδάφιο 3.4.1, για να λειτουργήσει η εντολή διαγραφής των πεπερασμένων στοιχείων που έχουν αστοχήσει, πρέπει οπωσδήποτε να επιλεχθούν οι μεταβλητές "Failure/Fracture> SDEG" και "State/Field/User/Time> STATUS" στα Field Output Requests. Ακόμη, ζητείται η αναπαράσταση των τάσεων και παραμορφώσεων σε όλο το μοντέλο, για την καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Για την καλύτερη εποπτεία της εξέλιξης της θραύσης, ζητείται η χρονική ιστορία της τιμής της τριαξονικότητας, της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης και των μεταβλητών Damage Degradation και SDEG, στο πεπερασμένο στοιχείο στο οποίο γίνεται η έναρξη της ρωγμής (αφού εντοπιστεί μετά από ένα πρώτο τρέξιμο). Για την εύρεση της καμπύλης απόκρισης του ενισχυμένου ελάσματος χρειάζεται να αποθηκευθεί η χρονική ιστορία της κατακόρυφης μετατόπισης και δύναμης στο σημείο αναφοράς που βρίσκεται στο άκρο του διεισδυτή.

Εύρεση καμπύλης απόκρισης

Η καμπύλη απόκρισης του εκάστοτε μοντέλου ενισχυμένου ελάσματος είναι η χρονική ιστορία της δύναμης απόκρισης συναρτήσει της χρονικής ιστορίας της κατακόρυφης μετατόπισης του διεισδυτή, F(u(t)). Όταν μοντελοποιείται το μισό συμμετρικό έλασμα, η δύναμη απόκρισης πρέπει να διπλασιαστεί για την εύρεση της καμπύλης απόκρισης.

4.3.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων και σχολιασμός

Σε αυτό το εδάφιο, παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των πειραμάτων του εδαφίου 4.1.1, που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής.

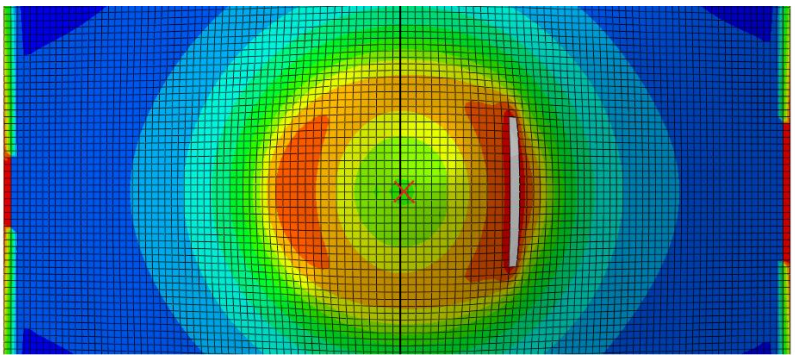
Πλάκα χωρίς ενισχυτικά (US)

Γίνονται 12 κύριες προσομοιώσεις του πειράματος κρούσης της πλάκας χωρίς ενισχυτικά (US), σε τρεις τετράδες:

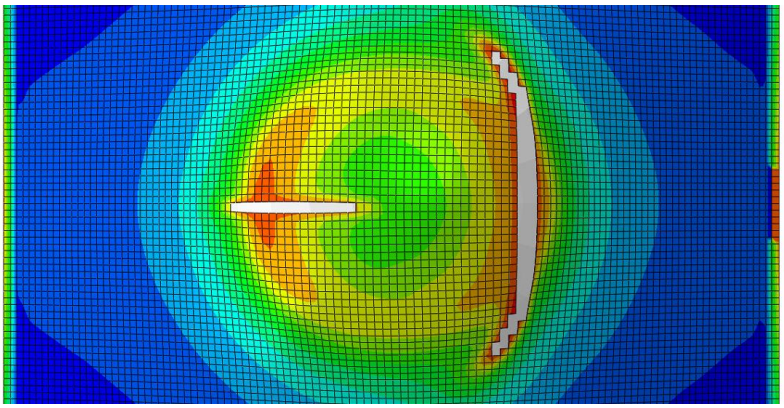
I. 4 προσομοιώσεις (διαφορετικά l_e) με το μοντέλο υλικού που παρουσιάζεται στα 3.4.2, 4.3.1 και με c_{hm}=1.5,
II. 4 προσομοιώσεις (διαφορετικά l_e) με το μοντέλο υλικού που παρουσιάζεται στα 3.4.2, 4.3.1 και με c_{hm}=0 (δηλαδή Κριτήριο Ισοδύναμης Πλαστικής Παραμόρφωσης Θραύσης),
III. 4 προσομοιώσεις (διαφορετικά l_e) με το μοντέλο υλικού που παρουσιάζεται στα [8] και 4.3.1.

Στις περισσότερες προσομοιώσεις η ρωγμή ξεκίναγε από το σημείο που φαίνεται στο Σχήμα 4-31. Σημειώνεται ότι ο διεισδυτής προσπίπτει 5 mm δεξιά (κατά πως φαίνεται στο Σχήμα 4-31) του διαμήκους άξονα συμμετρίας του ελάσματος, συνεπώς το δεξί τμήμα υφίσταται ελαφρώς μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Είναι λογικό, λοιπόν, η ρωγμή να ξεκινά σε εκείνη την πλευρά.

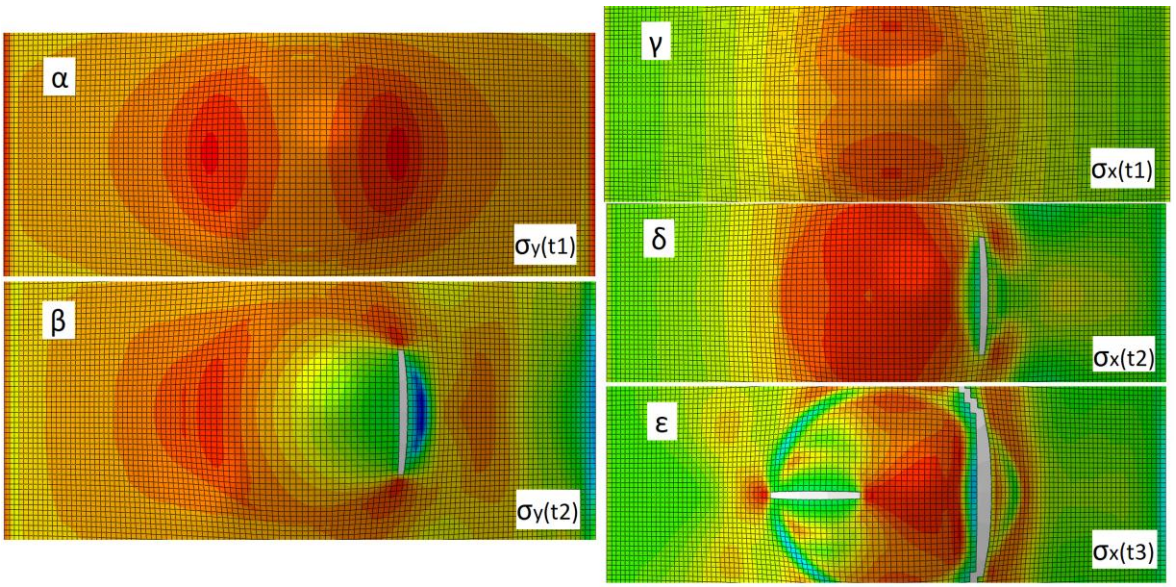
Επειδή ο λόγος μήκους προς πλάτος του ελάσματος είναι 5/3, οι εγκάρσιες μεμβαρικές τάσεις και παραμορφώσεις, που αναπτύσσονται από την βύθιση του σφαιρικού άκρου του διεισδυτή, είναι μεγαλύτερες από τις διαμήκεις και γι' αυτό το λόγο, η πρώτη ρωγμή ξεκινά και διαδίδεται κατά την διαμήκη διεύθυνση του ελάσματος (κάθετα στις εγκάρσιες τάσεις). Μετά τη ρήξη της συνέχειας του ελάσματος, οι τάσεις αναδιανέμονται στη διαμήκη διεύθυνση και γι' αυτό αναπτύσσεται μία δεύτερη ρωγμή κάθετη στην πρώτη, η οποία ξεκινά στην απέναντι πλευρά του ελάσματος, όπου επίσης οι παραμορφώσεις είναι υψηλές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-32. Στο Σχήμα 4-33 φαίνονται οι κατανομές εγκάρσιων (α,β) και διαμήκων (γ,δ,ε) τάσεων πριν και μετά τη δημιουργία των ρωγμών. Όπως είναι εμφανές από τα β και δ, η δημιουργία της διαμήκους ρωγμής χαλαρώνει τις εγκάρσιες και εντείνει τις διαμήκεις μεμβρανικές τάσεις.



Σχήμα 4-31: Μορφή έναρξης ρωγμής στις περισσότερες προσομοιώσεις κρούσης της διαμόρφωσης US. Με χρώματα φαίνονται οι ισοϋψείς πλαστικής παραμόρφωσης. Η μαύρη γραμμή αντιπροσωπεύει τον διαμήκη άξονα συμμετρίας του ελάσματος και το κόκκινο σημάδι τη θέση πρόσπτωσης του διεισδυτή.

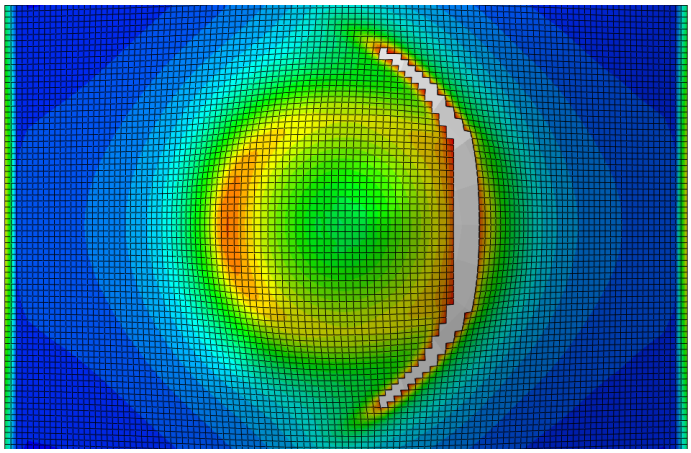


Σχήμα 4-32: Δημιουργία δεύτερης ρωγμής κάθετης στην πρώτη, σε πολλές προσομοιώσεις εξαιτίας διαμήκων μεμβρανικών τάσεων



Σχήμα 4-33: Κατανομές τάσεων στο αριθμητικό μοντέλο US πριν και μετά την έναρξη των δύο ρωγμών. α, β) κατανομή εγκάρσιων τάσεων πριν και μετά την έναρξη της πρώτης ρωγμής, αντίστοιχα. γ, δ, ε) κατανομή διαμήκων τάσεων πριν τη ρηγμάτωση, μετά την έναρξη της πρώτης ρωγμής και μετά την έναρξη της δεύτερης ρωγμής, αντίστοιχα.

Όπως αναφέρεται στο εδάφιο 4.1.2, στην πραγματικότητα δεν αναπτύσσεται εγκάρσια ρωγμή, παρά την πρόβλεψή της της από σχεδόν όλα τα μοντέλα. Το μοναδικό μοντέλο, εκ των 12, που κάνει ακριβή πρόβλεψη της μορφής αστοχίας (Σχήμα 4-5) έχει χαρακτηριστικό μήκος στοιχείου 6.25 mm και Κριτήριο Θραύσης Ισοδύναμης Πλαστικής Παραμόρφωσης (c_{hm}=0). Η μορφή της ρηγμάτωσης αυτής της προσομοίωσης φαίνεται στο Σχήμα 4-34.



Σχήμα 4-34: Μορφή αστοχίας μοντέλου US με le=6.25mm και chm=0

Στα Σχήματα Σχήμα 4-35 και Σχήμα 4-36 παρουσιάζονται οι καμπύλες απόκρισης των διάφορων μοντέλων, κατά ομάδες. Στο Σχήμα 4-35 παρουσιάζονται οι καμπύλες απόκρισης των προσομοιώσεων με το μοντέλο υλικού της παρούσας εργασίας και c_{hm} με τιμές 1.5 και 0 – δηλαδή κριτήριο Rice-Tracey και Κριτήριο Ισοδύναμης Πλαστικής Παραμόρφωσης (ομάδες I και II). Στο Σχήμα 4-36 παρουσιάζονται οι καμπύλες απόκρισης των προσομοιώσεων με c_{hm}=1.5 και με δύο μοντέλα υλικού: το μοντέλο που εισηγήθηκε η παρούσα εργασία και το μοντέλο που προκύπτει βάσει των υποδείξεων των Alsos και Amdahl [8], όπως περιγράφτηκε στο εδάφιο 4.3.1 (ομάδες I και III). Όπως φαίνεται, η μείωση του μεγέθους του στοιχείου και του συντελεστή c_{hm} αυξάνει την αντοχή του μοντέλου της πλάκας. Οι προσομοιώσεις της ομάδας III έχουν μεγαλύτερη αντοχή, γιατί η ισοδύναμη παραμόρφωση αστοχίας είναι μεγαλύτερη, όπως φαίνεται από την σύγκριση των Πίνακας 4-2 και Πίνακας 4-3. Πάρα ταύτα, η πρόβλεψη για τη μορφή αστοχίας, αυτής της ομάδας, δεν είναι ακριβέστερη από τις υπόλοιπες.

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα, έχουν γίνει ακόμη δύο προσομοιώσεις:

1) Προσομοίωση με χαρακτηριστικό μέγεθος στοιχείου l_e=12.5mm αλλά μοντέλο υλικού που αντιστοιχεί σε l_e=6.25mm, με c_{hm}=0,
2) Προσομοίωση με χαρακτηριστικό μέγεθος στοιχείου l_e=6.25mm, μοντέλο υλικού σύμφωνα με τους Alsos και Amdahl που αντιστοιχεί σε l_e=5mm (με c_{hm}=1.5)

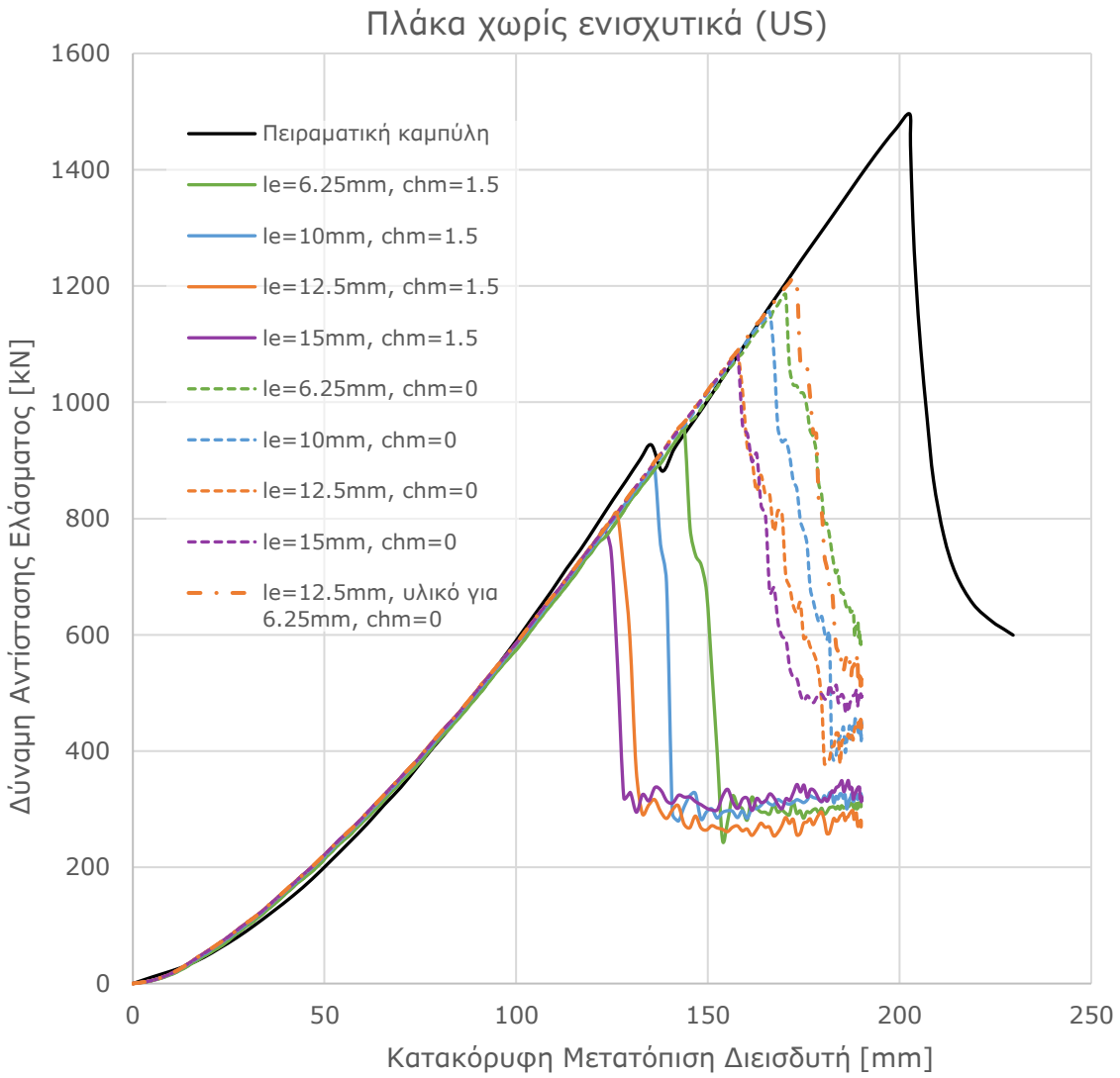
Και στις δύο περιπτώσεις, φαίνεται ότι το αριθμητικό μοντέλο έχει μεγαλύτερη αντοχή, όταν χρησιμοποιείται μοντέλο υλικού που αντιστοιχεί σε μικρότερο μέγεθος στοιχείου, η καμπύλη απόκρισης προσεγγίζει καλύτερα την πειραματική και η μορφή αστοχίας είναι πιο ακριβής.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι η μέγιστη δύναμη αντίστασης παρουσιάζεται ακριβώς πριν τη δημιουργία της πρώτης (διαμήκους) ρωγμής, επομένως η δημιουργία και ανάπτυξη της δεύτερης ρωγμής δεν επηρεάζει την μέγιστη αντοχή, αλλά την εναπομείνουσα.

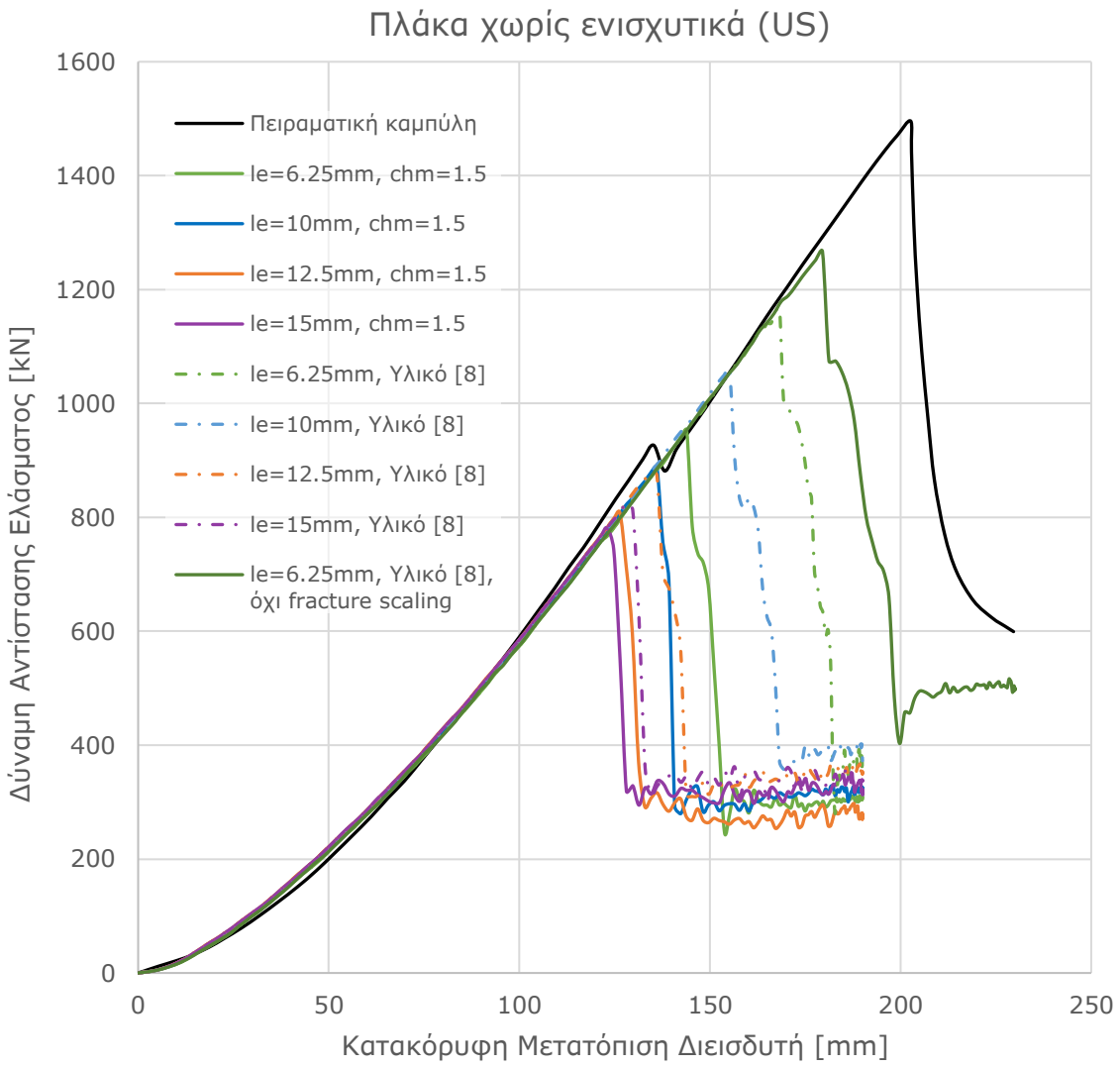
Στον Πίνακας 4-4 συγκεντρώνονται όλα τα αριθμητικά μοντέλα του πειράματος κρούσης της πλάκας χωρίς ενισχυτικά. Υπολογίζεται η μέγιστη δύναμη αντίστασης κάθε αριθμητικού μοντέλου ως ποσοστό της μέγιστης δύναμης αντίστασης του φυσικού μοντέλου και παρουσιάζεται η τελική μορφή αστοχίας που προβλέπει. Το ακριβέστερο μοντέλο από άποψη μορφής αστοχίας και καμπύλης απόκρισης, συνδυαστικά, είναι το μοντέλο με l_e=6.25mm της ομάδας I. Όπως παρατηρείται, η μορφή της ρωγμής δεν είναι συμμετρική ως προς τον εγκάρσιο άξονα συμμετρίας της πλάκας σε όλες τις προσομοιώσεις. Η μη συμμετρικότητα της λύσης προκαλείται μετά την έναρξη της αστοχίας, κατά τη διάδοση της ρωγμής, και δεν οφείλεται σε κάποια ασυμμετρία του αριθμητικού μοντέλου, αλλά σε αριθμητικό σφάλμα του προγράμματος.

Καθώς δεν υπάρχει γεωμετρική ασυνέχεια, λόγω έλλειψης ενισχυτικών σε αυτήν την πειραματική διάταξη, και οι οριακές συνθήκες είναι μακριά από την περιοχή μέγιστης φόρτισης, δεν δημιουργούνται συγκεντρώσεις τάσεων και παραμορφώσεων. Αντιθέτως, η περιοχή με τις μεγαλύτερες τάσεις και παραμορφώσεις είναι ιδιαίτερα ευρεία- μεγάλος δακτύλιος γύρω από το σημείο πρόσπτωσης του διεισδυτή (Σχήμα 4-31). Όπως παρατηρήθηκε από τους Alsos και Amdahl [7], η αστοχία του ελάσματος US δεν συμβαίνει μετά από δημιουργία εντοπισμένου λαιμού, αλλά ομοιόμορφη εκλέπτυνση της διατομής (Σχήμα 4-10α). Ωστόσο, τα μοντέλα υλικού έχουν προκύψει μέσω της προσομοίωσης του πειράματος εφελκυσμού, όπου ο μηχανισμός όλκιμης θραύσης είναι διαφορετικός. Στην προκειμένη περίπτωση, όπου ο λαιμός είναι διαδεδομένος, η τροποποίηση της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης θραύσης, με την μεταβολή του μεγέθους του στοιχείου, δημιουργεί μεγάλη διασπορά στις καμπύλες δύναμης-μετατόπισης. Οι Alsos και Amdahl [8] αποφασίζουν να μην χρησιμοποιήσουν «fracture scaling law» στο αριθμητικό μοντέλο US. Γενικεύοντας αυτήν την ιδέα, το fracture scaling law θα μπορούσε να εφαρμοστεί στις περιοχές στις οποίες προβλέπεται ότι θα δημιουργηθεί συγκέντρωση τάσεων, όπως συμβολές ελασμάτων, και όχι στις περιοχές μακριά από αυτές.

Στο Σχήμα 4-37, φαίνεται η σύγκλιση που συναντάται στην κρίσιμη τιμή πλαστικής παραμόρφωσης και στη μέγιστη δύναμη αντίστασης για τα αριθμητικά μοντέλα των ομάδων I, II και III, αντίστοιχα.

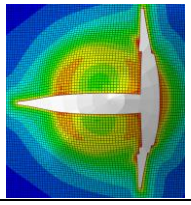
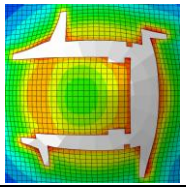
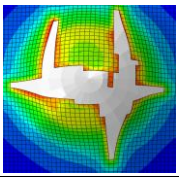
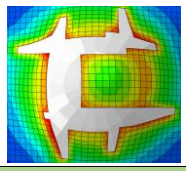
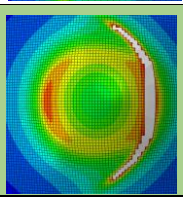
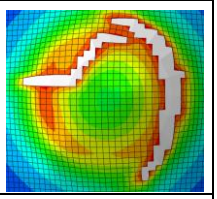
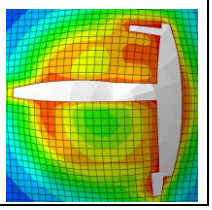


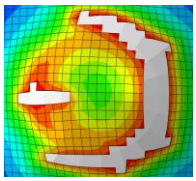
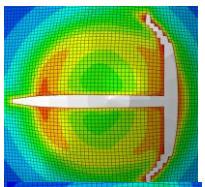
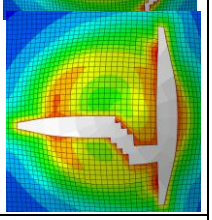
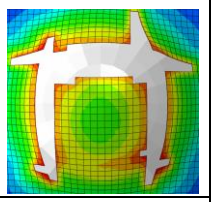
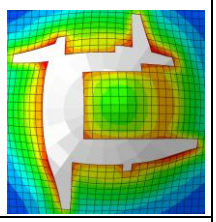
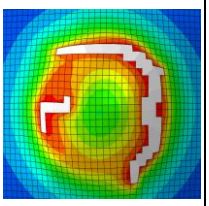
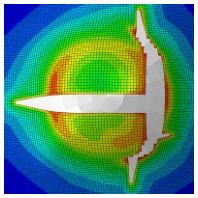
Σχήμα 4-35: Καμπύλη απόκρισης αριθμητικού μοντέλου US, με το μοντέλο υλικού του εδαφίου 3.4.2, για τέσσερα χαρακτηριστικά μεγέθη στοιχείου και δύο τιμές παραμέτρου chm

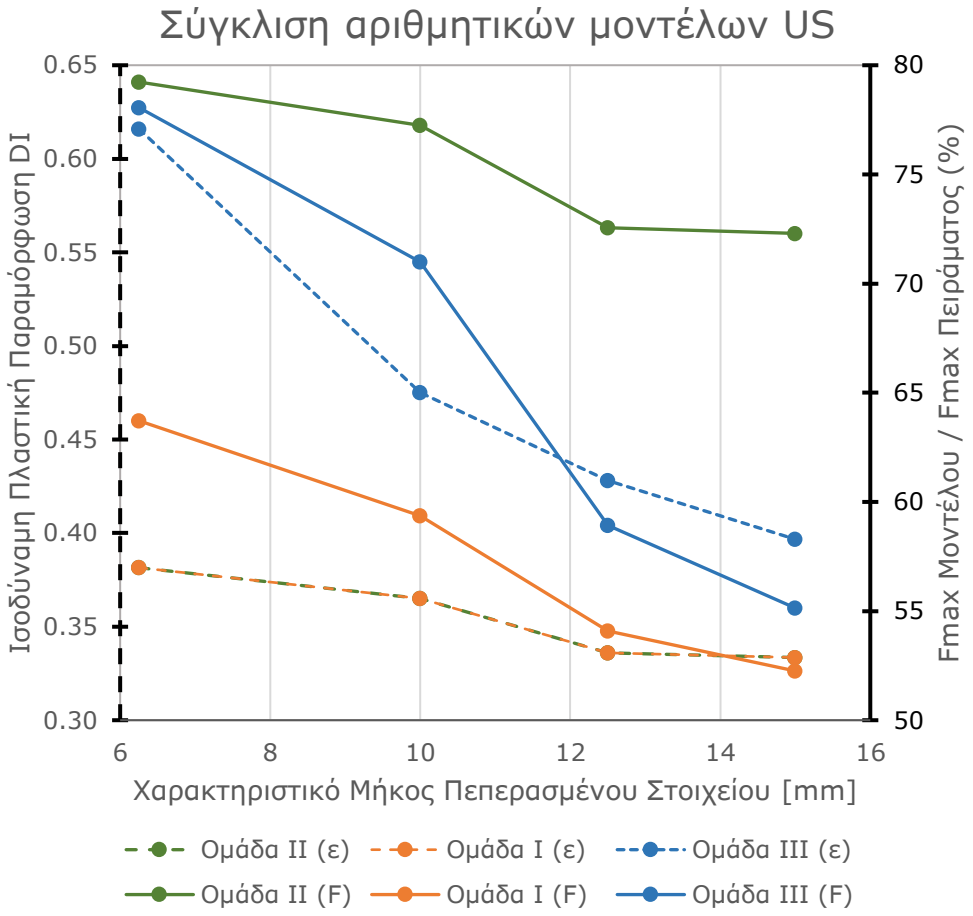


Σχήμα 4-36: Καμπύλη απόκρισης αριθμητικού μοντέλου US, με τα μοντέλα υλικών των εδαφίων και 3.4.2, για τέσσερα χαρακτηριστικά μεγέθη στοιχείου

Πίνακας 4-4: Συγκεντρωτικός πίνακας των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων για το πείραμα κρούσης της πλάκας χωρίς ενισχυτικά, US

Αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος κρούσης US						
Ομάδα	**le [mm]**	**Chm**	**Μοντέλο Υλικού**	**Κρίσιμη Πλαστική Παραμ/ση για η=1/3**	**Fmax Μοντέλου / Fmax Πειράματος (%)**	**Μορφή Αστοχίας**
I	6.25	1.5	Παρούσας Εργασίας (3.4.2, 4.3.1)	0.3815	63.72	
	10			0.3650	59.37	
	12.5			0.3360	54.08	
	15			0.3335	52.26	
II	6.25	0	Παρούσας Εργασίας (3.4.2, 4.3.1)	0.3815	79.23	
	10			0.3650	77.25	
	12.5			0.3360	72.55	

	15			0.3335	72.30	
III	6.25	1.5	[8]	0.6160	78.06	
	10			0.4750	70.99	
	12.5			0.4280	58.92	
	15			0.3967	55.14	
extra	12.5	0	Παρούσας Εργασίας (3.4.2, 4.3.1) για le=6.25mm	0.3815	81.17	
	6.25	1.5	[8] + όχι fracture scaling law	0.7100	84.69	



Σχήμα 4-37: Σύγκλιση για τα αριθμητικά μοντέλα US

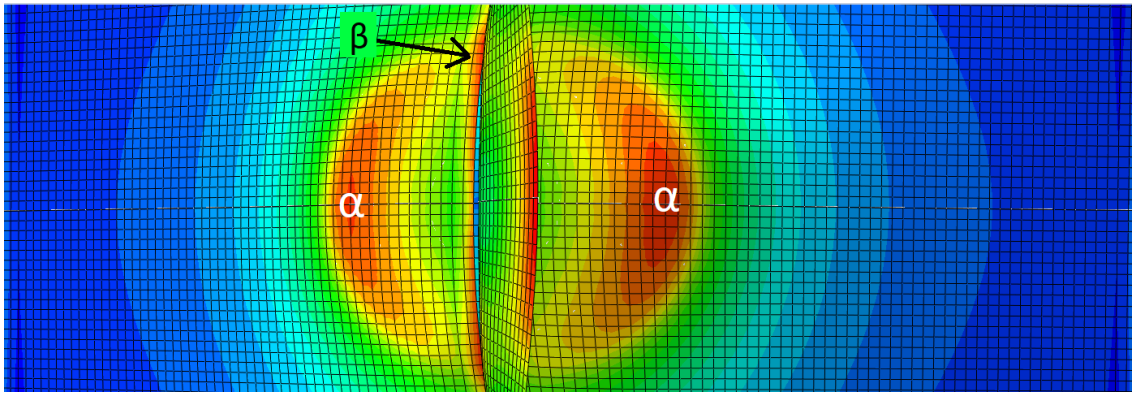
<u>Πλάκα με ένα επίπεδο ενισχυτικό (1FB)</u>

Υπενθυμίζεται, ότι αποτελέσματα της προσομοίωσης της πλάκας με ένα επίπεδο ενισχυτικό ήταν αυτά που προβλημάτισαν περισσότερο από όλα τους ερευνητές της βιβλιογραφίας. Ο λόγος ήταν, ότι το αριθμητικό μοντέλο αναμένεται να ρηγματωθεί στην περιοχή κοντά στην συγκόλληση της πλάκας και του ενισχυτικού, όπου αναπτύσσεται συγκέντρωση τάσης, όμως τείνει να ρηγματώνεται στην περιοχή μακριά από αυτή, συμπεριφερόμενο σαν το μοντέλο US. Κατά την φόρτιση του μοντέλου 1FB εμφανίζεται, όπως και στο US (Σχήμα 4-31), ένας δακτύλιος ομοιόμορφα αυξημένων τάσεων και παραμορφώσεων (Σχήμα 4-38, περιοχή α) και μία στενή περιοχή συγκέντρωσης τάσης/παραμόρφωσης, κοντά στη συγκόλληση (Σχήμα 4-38, περιοχή β). Για πολλούς συνδυασμούς παραμέτρων προσομοίωσης, η θραύση ξεκινά από τις περιοχές α και η τελική μορφή αστοχίας θυμίζει τη διαμόρφωση US (Σχήμα 4-39).

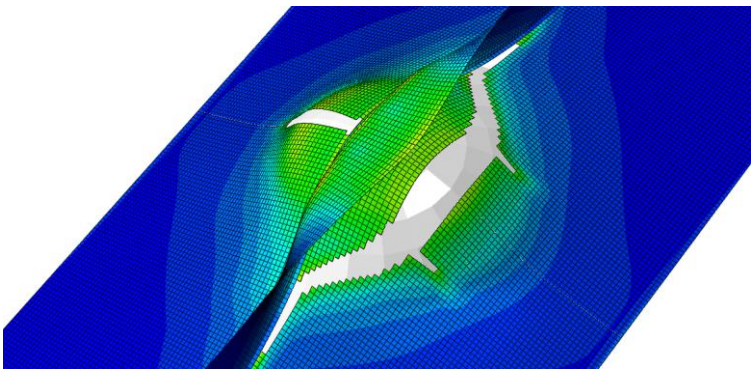
Η μοντελοποίηση έγινε, αρχικά, με το μοντέλο υλικού που περιγράφτηκε στα εδάφια 3.4.2 και 4.3.1, με συντελεστή κριτηρίου αστοχίας c_{hm}=1.5 και με θέση πρόπτωσης του διεισδυτή στην πλευρά Β του ελάσματος (Σχήμα 4-30). Η μορφή αστοχίας που προέβλεψαν αυτά τα αριθμητικά μοντέλα (με διαφορετικά l_e) ήταν της μορφής του Σχήμα 4-39. Επιδιώκοντας τη βελτίωση της ακρίβειας πρόβλεψης της μορφής αστοχίας, εξετάσθηκαν μερικές, λογικές τροποποιήσεις στο αριθμητικό μοντέλο:

1. Τοποθέτηση της θέσης πρόσπτωσης του άκρου του διεισδυτή στην αντίθετη πλευρά του ενισχυτικού (πλευρά Α, Σχήμα 4-30).
2. Αφαίρεση ατέλειας στη γεωμετρία του ενισχυτικού.
3. Εισαγωγή μίας κατανομής παραμενουσών τάσεων στο ελάσματα, ως αποτέλεσμα της διαδικασίας συγκόλλησης, όπως περιγράφτηκε στο εδάφιο 4.3.1.
4. Αύξηση της απόκλισης της θέσης πρόσπτωσης του διεισδυτή από το κέντρο του ελάσματος της πλάκας. Δοκιμάζονται τιμές από 5 έως 35 mm απόκλιση.
5. Αλλαγή της τιμής της σταθεράς του κριτηρίου Rice-Tracey από 1.5 σε 2.

Τέλος, γίνονται κάποιες προσομοιώσεις με το μοντέλο υλικού των Alsos και Amdahl, όπως περιγράφτηκε στο εδάφιο 4.3.1.



Σχήμα 4-38: Δύο περιοχές αυξημένων τάσεων/παραμορφώσεων στη λύση του αριθμητικού μοντέλου 1FB: α) περιοχή ομοιόμορφα κατανεμημένων αυξημένων παραμορφώσεων, β) περιοχή συγκέντρωσης τάσης δίπλα στη συγκόλληση.



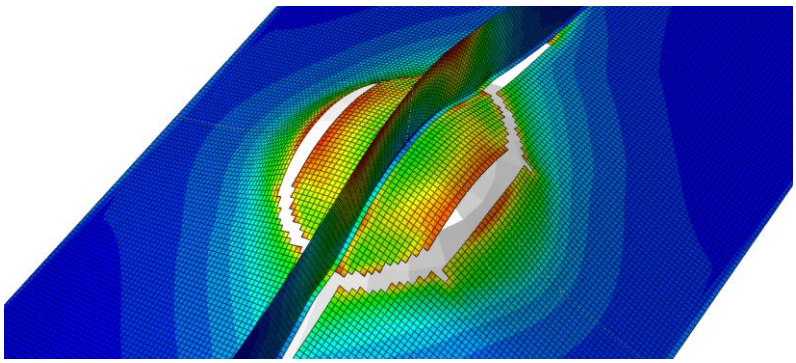
Σχήμα 4-39: Μορφή αστοχίας αριθμητικού μοντέλου 1FB με le=6.25mm, chm=1.5 και offset=+5 mm (πλευρά Β)

Παρακάτω, αναλύεται το πως επηρεάζει τα αποτελέσματα κάθε μία από τις αλλαγές στο αριθμητικό μοντέλο.

1. Σχετική θέση πρόσπτωσης του διεισδυτή ως προς την αρχική ατέλεια του ενισχυτικού

Η μορφή αστοχίας που προκύπτει με τη μετατόπιση της θέσης πρόσπτωσης του διεισδυτή από (0,5,0) σε (0,-5,0) (Σχήμα 4-30), στο αριθμητικό μοντέλο με l_e=6.25mm και c_{hm}=1.5, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-40. Όπως φαίνεται από το στιγμιότυπο, το ενισχυτικό δε λυγίζει τόσο όσο στην πρώτη περίπτωση (πλευρά Β), γεγονός που οδηγεί

σε πιο συμμετρική μορφή αστοχίας. Επίσης, εντοπίζεται διαφορά στην καμπύλη απόκρισης της κατασκευής, καθώς η μέγιστη δύναμη αντίστασης είναι λίγο μεγαλύτερη (της τάξης των 40 kN), όταν ο διεισδυτής προσπίπτει στην πλευρά Α. Η τάση αυτή υπάρχει και στα αριθμητικά μοντέλα με μεγαλύτερα χαρακτηριστικά μεγέθη στοιχείων. Από το Σχήμα 4-30 φαίνεται πως το ενισχυτικό στρέφει τα κοίλα προς την πλευρά Α και συνεπώς μπορεί να λυγίσει πιο εύκολα προς αυτήν την κατεύθυνση. Το ενισχυτικό τείνει να λυγίσει προς την πλευρά της πλάκας που βυθίζεται περισσότερο, καθώς η συγκόλληση μεταφέρει τη ροπή που αναπτύσσεται από το έλασμα της πλάκας στο έλασμα του ενισχυτικού. Όσο περισσότερο αντιστέκεται το ενισχυτικό στην παραμόρφωσή του (μεγαλύτερη αντίσταση στην πλευρά Β), τόσο μειώνεται η όλκιμη συμπεριφορά του ενισχυμένου ελάσματος. Εξάλλου, οι Alsos και Amdahl παρατηρώντας τα πειραματικά τους αποτελέσματα, κατέληξαν στο ίδιο συμπέρασμα, ότι η παραλαβή μεγαλύτερων φορτίων από τα ενισχυτικά, οδηγεί σε γρηγορότερη θραύση του ελάσματος της πλάκας. Η αύξηση της δυσκαμψίας της πλάκας έχει αντίθετη επίδραση στην μέγιστη τιμή δύναμης με την οποία μπορεί να αντισταθεί στην παραμόρφωση, πριν τη θραύση της. Έτσι δικαιολογείται το γεγονός ότι η μέγιστη αντίσταση του ενισχυμένου ελάσματος είναι μεγαλύτερη όταν ο διεισδυτής προσπίπτει στην πλευρά Α και το ενισχυτικό αντιστέκεται λιγότερο στον λυγισμό (παραλαμβάνοντας μικρότερα φορτία), απ' ότι στην περίπτωσης της πλευράς Β. Ο λυγισμός του ενισχυτικού συντελεί στην διάχυση της ενέργειας παραμόρφωσης, ενώ, όσο το ενισχυτικό αντιστέκεται σε αυτόν, δημιουργεί ισχυρότερη οριακή συνθήκη και εντείνει την παραμόρφωση του ελάσματος της πλάκας.



Σχήμα 4-40: Μορφή αστοχίας αριθμητικού μοντέλου 1FB με le=6.25mm, chm=1.5 και offset=-5 mm (πλευρά Α)

Σε κάθε περίπτωση, η ανακρίβεια της πρόβλεψης της μορφής αστοχίας του φυσικού μοντέλου δεν οφείλεται, απ' ότι φαίνεται, στην πλευρά της πλάκας στην οποία προσπίπτει ο διεισδυτής.

2. Γεωμετρική ατέλεια ενισχυτικού

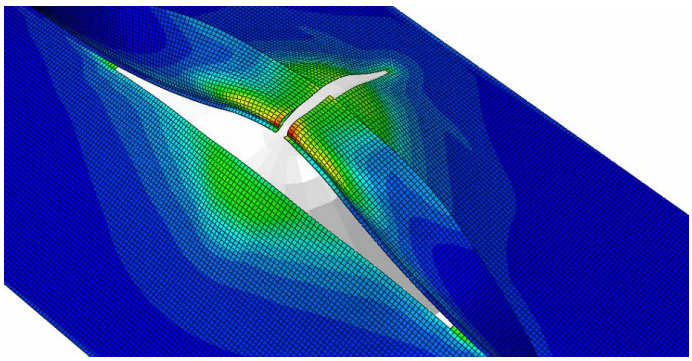
Αν δεν εισαχθεί αρχική ατέλεια στη γεωμετρία της διατομής του ενισχυτικού, τότε αυτό συμπεριφέρεται σαν το μοντέλο, όπου ο διεισδυτής προσπίπτει στην πλευρά Β (στην αντίθετη πλευρά από αυτή που τείνει να λυγίσει, λόγω της αρχικής του ατέλειας, Σχήμα 4-30). Αυτό είναι λογικό, καθώς, η ανυπαρξία αρχικής ατέλειας στο ενισχυτικό αυξάνει την αντίστασή του στον λυγισμό. Η μορφή αστοχίας του μοντέλου 1FB με l_e=6.25mm,

c_{hm}=1.5 και offset=+5mm είναι η ίδια είτε η διατομή του ενισχυτικού είναι καμπύλη, είτε είναι επίπεδη (Σχήμα 4-39).

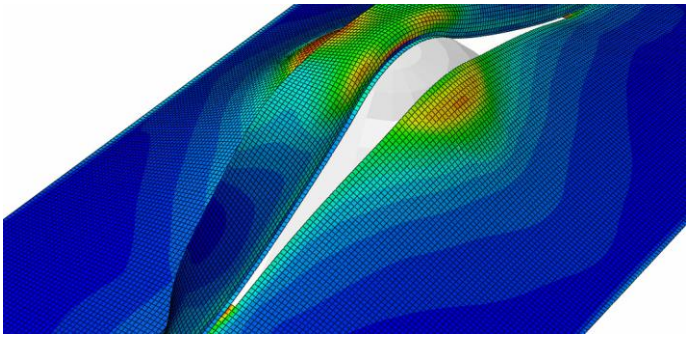
3. Απόσταση θέσης πρόσπτωσης διεισδυτή από το διαμήκη άξονα συμμετρίας

Η εισαγωγή μίας ασυμμετρίας στη φόρτιση, εισάγει ασυμμετρία στο πρόβλημα και άρα στη λύση του, ακόμη και αν το φυσικό μοντέλο είναι συμμετρικό. Στην περίπτωση του 1FB, το αριθμητικό μοντέλο είναι ήδη ασύμμετρο, λόγω της αρχικής ατέλειας του ενισχυτικού. Η φόρτιση γίνεται ασύμμετρη, εάν ο διεισδυτής προσπίπτει εκτός του κέντρου της πλάκας – στα αριθμητικά μοντέλα που εκτελέστηκαν, δίνεται μία εγκάρσια απόκλιση στη θέση πρόσπτωσής του. Η θεώρηση της ασυμμετρίας είναι ρεαλιστική, καθώς είναι μάλλον απίθανο το άκρο του διεισδυτή να προσπίπτει ακριβώς στο κέντρο του ελάσματος της πλάκας και η ύπαρξη κάποιας απόκλισης είναι φυσική. Εξάλλου, οι μορφές αστοχίας που παρατηρήθηκαν στα πειράματα είναι επίσης ασύμμετρες – χωρίς, όμως, αυτό να οφείλεται αποκλειστικά στην ασυμμετρία της φόρτισης. Άλλοι παράγοντες που μπορεί να οδηγήσουν σε ασυμμετρία της απόκρισης -πέρα από τη θέση πρόσπτωσης του διεισδυτή - είναι: η έκκεντρη τοποθέτηση του ενισχυτικού, ασυμμετρία στην γωνιακή συγκόλληση, ασυμμετρία στο πλαίσιο που περιβάλλει το ενισχυμένο έλασμα κ.α.

Εξετάστηκε η επιρροή στα αποτελέσματα της απόστασης της θέσης πρόπτωσης του άκρου του διεισδυτή από το διαμήκη άξονα της πλάκας. Η απόκλιση (offset) του διεισδυτή αυξήθηκε από 5mm, σταδιακά, με βήμα 5mm, έως ότου η ρωγμή να δημιουργηθεί στην περιοχή δίπλα στην ραφή της συγκόλλησης, όπως παρατηρήθηκε στο φυσικό μοντέλο (Σχήμα 4-7β). Οι προσομοιώσεις έγιναν για le=6.25mm, καθώς αυτά τα στοιχεία μπορούν να συλλάβουν καλύτερα τις συγκεντρώσεις παραμορφώσεων κοντά στη συγκόλληση, σε σχέση με τα μεγαλύτερα μεγέθη στοιχείων. Βρέθηκε, ότι για offset=+35mm η μορφή αστοχίας του μοντέλου με l_e=6.25mm, είναι αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 4-41. Η έναρξη της θραύσης ξεκινά στην περιοχή δίπλα στην συγκόλληση, στα αριστερά του ενισχυτικού και, μετά από αρκετά χρονικά βήματα, μία δεύτερη εγκάρσια ρωγμή αναπτύσσεται και διαδίδεται, έως ότου να ενωθεί με την πρώτη. Ελέγχθηκε επίσης η θέση πρόσπτωσης (0,-35mm,0) η οποία δίνει την μορφή αστοχίας του ενισχυμένου ελάσματος του Σχήμα 4-42. Αυτή η μορφή αστοχίας θυμίζει αρκετά τη μορφή του φυσικού μοντέλου, με την διαφορά ότι το ενισχυτικό λυγίζει από την αντίθετη πλευρά από αυτήν που αναπτύσσεται η ρωγμή, στο αριθμητικό μοντέλο. Η μέγιστη δύναμη αντίστασης που υπολογίζεται με αυτές τις ρυθμίσεις είναι το 73.3% της πειραματικής. Η τιμή 35mm δεν είναι εξωπραγματική τιμή απόκλισης της θέσης πρόσπτωσης του διεισδυτή, αν ληφθεί υπόψη ότι το ημιπλάτος της πλάκας είναι 360mm (περίπου 10 φορές αυτή η απόκλιση).



Σχήμα 4-41: Μορφή αστοχίας αριθμητικού μοντέλου 1FB με le=6.25mm, chm=1.5 και offset=+35mm



Σχήμα 4-42: Μορφή αστοχίας αριθμητικού μοντέλου 1FB με le=6.25mm, chm=1.5 και offset=-35mm

Αυτό που συμβαίνει για απόκλιση, από το κέντρο της πλάκας, του διεισδυτή ίση με 35mm είναι ότι οι περιοχές α και β του Σχήμα 4-38 συμπίπτουν. Η σχετική θέση της περιοχής α εξαρτάται από το σημείο πρόσπτωσης του διεισδυτή, ενώ η περιοχή β βρίσκεται εξ ορισμού δίπλα στην ραφή της συγκόλλησης. Για offset=35mm οι μηχανισμοί αστοχίας των δύο περιοχών υπερτίθενται και η μορφή αστοχίας είναι η αναμενόμενη.

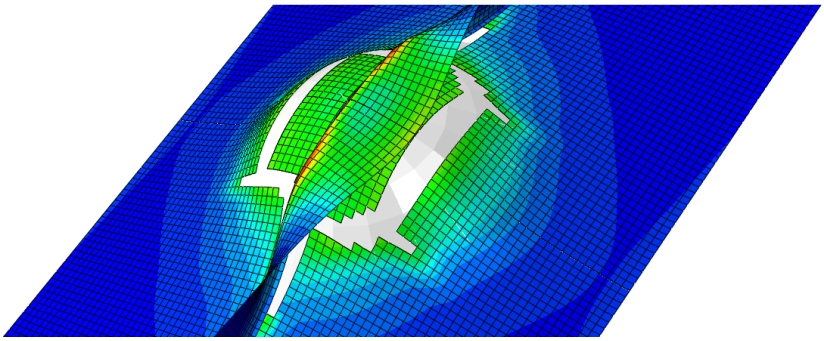
Το γεγονός ότι αυτή η αλλαγή στα δεδομένα του αριθμητικού μοντέλου έδωσε μορφή αστοχίας που μοιάζει με αυτήν του πειράματος δεν επαληθεύει αυτήν την επιλογή. Ο λόγος για τον οποίο αυτή η μορφή αστοχίας προκύπτει στο φυσικό μοντέλο είναι άγνωστος, καθώς υπάρχουν άπειρες παράμετροι που προκαλούν ασυμμετρία και μπορεί να ευθύνονται γι' αυτό το αποτέλεσμα. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, διερευνώνται κάποιες παράμετροι της μοντελοποίησης που μπορεί να επηρεάζουν το αριθμητικό αποτέλεσμα, χωρίς να εξάγονται ασφαλή συμπεράσματα για το φυσικό μοντέλο.

4. Παραμένουσες τάσεις λόγω συγκόλλησης

Ο τρόπος με τον οποίο εισάγονται οι παραμένουσες τάσεις στο αριθμητικό μοντέλο αναλύεται στο εδάφιο 4.3.1. Η σύγκριση έγινε με βάση το μοντέλο με l_e=10mm, c_{hm}=1.5 και θέση διεισδυτή στην πλευρά Β. Η μορφή αστοχίας του αριθμητικού μοντέλου είναι ακριβώς η ίδια είτε ληφθεί υπόψη η παρουσία παραμενουσών τάσεων είτε όχι (Σχήμα 4-43) και η καμπύλη δύναμης-μετατόπισης των δύο μοντέλων επίσης ταυτίζεται.

Όπως αναφέρθηκε και στο εδάφιο 4.3.1, η επίδραση των παραμενουσών τάσεων είναι μηδαμινή και στην πραγματικότητα, όταν τα εξωτερικά φορτία είναι τάξης άνω του

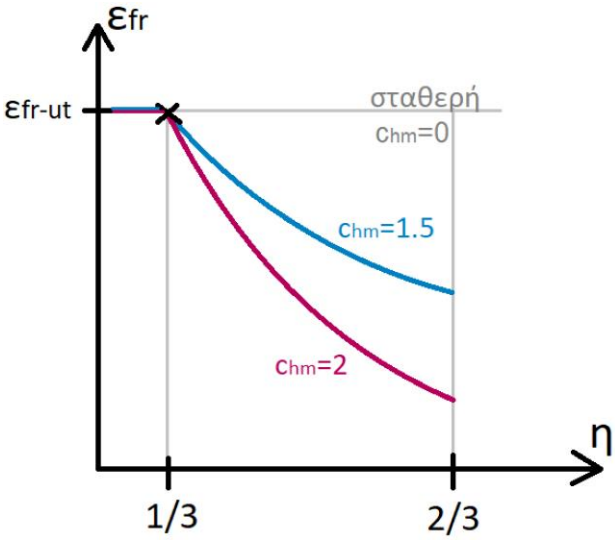
ορίου διαρροής. Αυτό συμβαίνει γιατί η γενικευμένη διαρροή του υλικού (πλαστικές παραμορφώσεις) ανακατανέμει το εντατικό πεδίο. Συνεπώς, στην παρούσα εφαρμογή, όπου το ενισχυμένο έλασμα φορτίζεται έως τη θραύση, αποδεικνύεται ότι οι παραμένουσες τάσεις δεν επιδρούν στην απόκριση.



Σχήμα 4-43: Μορφή αστοχίας αριθμητικού μοντέλου 1FB με le=10mm, chm=1.5 και offset=+5 mm, με και χωρίς παραμένουσες τάσεις.

5. Σταθερά c_{hm} του κριτηρίου αστοχίας

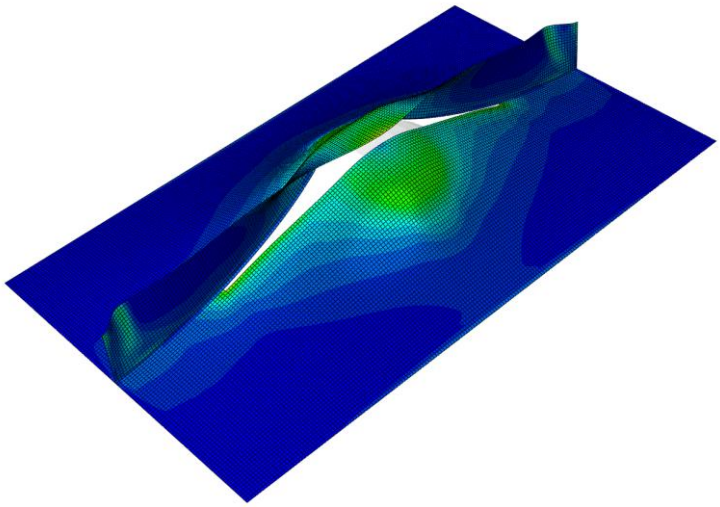
Τέλος, εξετάστηκε η επιρροή της σταθεράς του κριτηρίου αστοχίας c_{hm}, στα αποτελέσματα της προσομοίωσης του πειράματος κρούσης. Μέχρι στιγμής, ο συντελεστής αυτός λάμβανε την τιμή 1.5, οπότε το κριτήριο αστοχίας συμβάδιζε με το μοντέλο ανάπτυξης σφαιρικών μικροκενών υπό τριαξονική καταπόνηση, των Rice και Tracey. Η αύξηση του συντελεστή c_{hm}, σημαίνει ότι η καμπύλη κρίσιμης παραμόρφωσης – τριαξονικότητας αποκτά μεγαλύτερη (αρνητική) κλίση και συνεπώς η θραύση ξεκινά σε μικρότερες τιμές πλαστικής παραμόρφωσης για την ίδια τριαξονικότητα, για η>1/3, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-44. Υπάρχουν αναφορές ότι κάποια αριθμητικά μοντέλα συμφωνούν καλύτερα με πειραματικά αποτελέσματα, όταν ο συντελεστής c_{hm} τίθεται ίσος με 2 [5]. Τα ζεύγη πλαστικής παραμόρφωσης αστοχίας – τριαξονικότητας, που εισάγονται στο πρόγραμμα, σε αυτήν την περίπτωση, περιλαμβάνονται στον Πίνακας 4-1.



Σχήμα 4-44: Επιρροή συντελεστή chm στην παραμόρφωση αστοχίας, εfr, για κάθε τιμή τριαξονικότητας, η. Η τιμή της παραμόρφωσης αστοχίας σε συνθήκες μονοαξονικού εφελκυσμού, η=1/3, χρησιμοποιείται για το καλιμπράρισμα και δεν εξαρτάται από το συντελεστή chm. Για η≤1.3 η κρίσιμη παραμόρφωση λαμβάνεται σταθερή.

Τα αριθμητικά μοντέλα με le=6.25mm και με απόκλιση της θέσης πρόσπτωσης του διεισδυτή από το κέντρο του ελάσματος κατά 5 και 35mm, σε κάθε πλευρά (A ή B) κατασκευάζονται ξανά για c_{hm}=2 και c_{hm}=0 (ισοδυναμία με Κριτήριο Ισοδύναμης Πλαστικής Παραμόρφωσης). Το αριθμητικό μοντέλο το οποίο δίνει την κοντινότερη στις πειραματικές παρατηρήσεις μορφή αστοχίας είναι το μοντέλο με l_e=6.25mm, offset=+35mm (πλευρά B), c_{hm}=2 (Σχήμα 4-45). Ωστόσο, είναι αναμενόμενο ότι η αύξηση του συντελεστή c_{hm}, δηλαδή η μείωση της κρίσιμης παραμόρφωσης, επιφέρει μείωση στην αντοχή της κατασκευής. Η μέγιστη δύναμη αντίστασης που προβάλλει αυτό το αριθμητικό μοντέλο είναι μόλις το 62.93% της αντίστασης του φυσικού μοντέλου.

Στο Σχήμα 4-46 παρατίθενται οι καμπύλες απόκρισης αριθμητικών μοντέλων με l_e=6.25mm και με διάφορες σχετικές θέσεις πρόσπτωσης του διεισδυτή, για c_{hm} ίσο με 0, 1.5 και c_{hm}=2. Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα, η αντοχή της κατασκευής μειώνεται με την επιβολή της δύναμης στην πλευρά B, με την αύξηση του offset και με την αύξηση της τιμής του συντελεστή c_{hm}. Εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση |offset|=5mm και chm=0, όπου η πλευρά B προβάλλει μεγαλύτερη αντίσταση. Παρατηρείται ότι, γι' αυτό το συνδυασμό παραμέτρων, το ενισχυτικό λυγίζει πάντα προς την πλευρά B. Συγκεκριμένα, ο λυγισμός του ενισχυτικού, για την περίπτωση της πλευράς A, ξεκινά μετά την έναρξη της θραύσης, επομένως η πλάκα επιφορτίζεται περισσότερο σε σύγκριση με την αντίστοιχη περίπτωση για την πλευρά B, όπου ο λυγισμός προηγείται της θραύσης. Η μορφή αστοχίας και η μέγιστη δύναμη αντίστασης, ως ποσοστό της πειραματικής, που προβλέπει κάθε μία από αυτές τις προσομοιώσεις παρατίθενται στον Πίνακας 4-5.



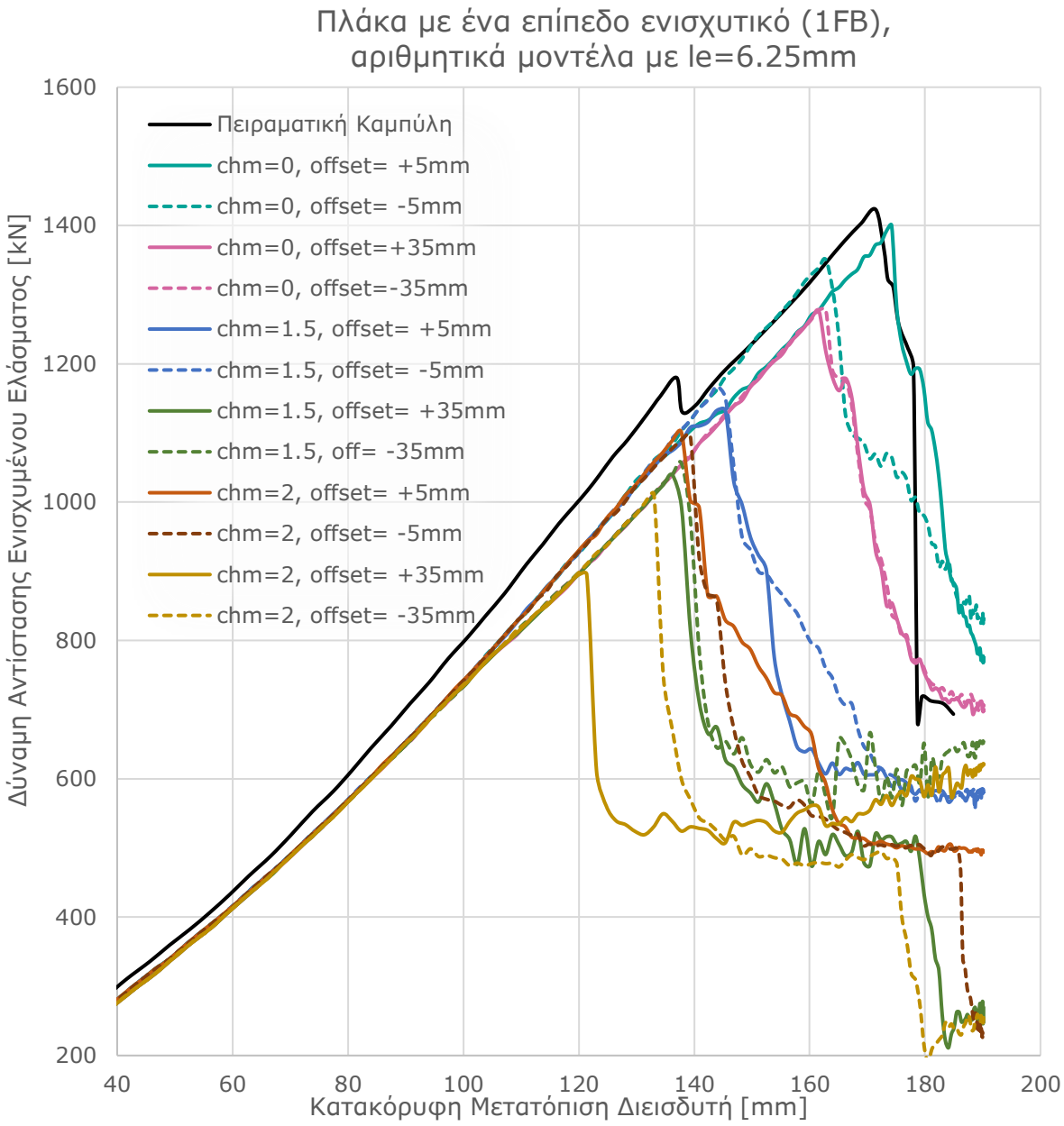
Σχήμα 4-45: Μορφή αστοχίας αριθμητικού μοντέλου 1FB με le=6.25mm, chm=2 και offset=+35mm

Καθώς οι επιλογές offset=+35mm (πλευρά B) και c_{hm}=2 έδωσαν την ακριβέστερη μορφή αστοχίας για l_e=6.25mm, κατασκευάστηκαν αριθμητικά μοντέλα και για τα μεγαλύτερα μεγέθη στοιχείου (10, 12.5, 15 mm) με τις ίδιες ρυθμίσεις. Τα μεγέθη στοιχείου αυτά, δεν μπορούν να περιγράψουν την συγκέντρωση τάσης/παραμόρφωσης γειτονικά της ραφής συγκόλλησης και συνεπώς καταλήγουν σε μη ρεαλιστικές προβλέψεις για τη μορφή αστοχίας. Η μορφή αστοχίας και η μέγιστη δύναμη αντίστασης, ως ποσοστό της πειραματικής, που προβλέπει κάθε μία από αυτές τις προσομοιώσεις με

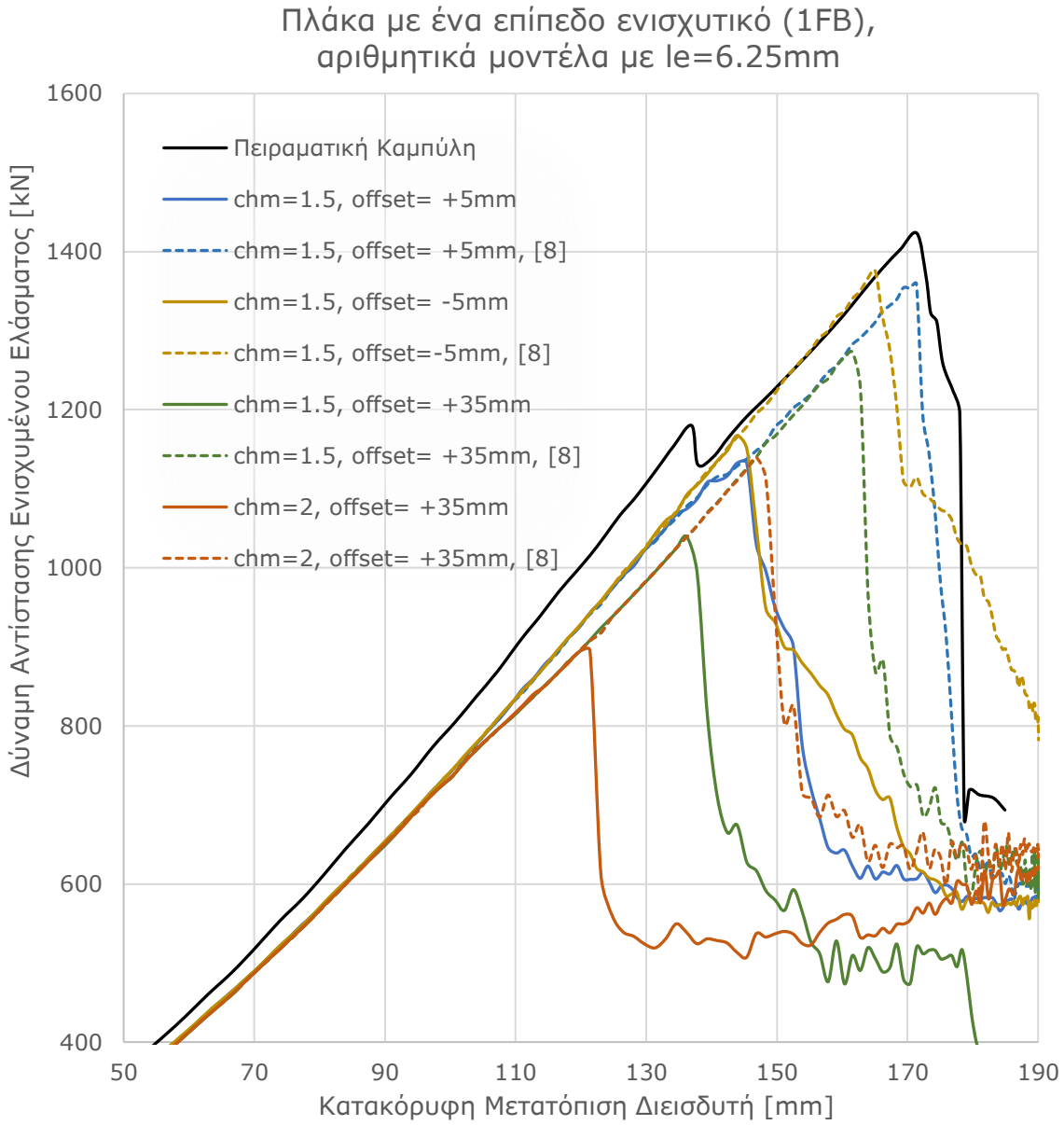
offset=+35mm και c_{hm}=2, για τα διάφορα μεγέθη στοιχειών, παρατίθενται στον Πίνακας 4-5.

Τέλος, για λόγους σύγκρισης, τρεις προσομοιώσεις με τρεις συνδυασμούς c_{hm} και offset εκτελούνται με το μοντέλο υλικού που κατασκευάζεται με βάση τις οδηγίες των Alsos και Amdahl (4.3.1) και l_e=6.25mm. Οι καμπύλες απόκρισης παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-47 και οι μορφές αστοχίας τους περιλαμβάνονται στον Πίνακας 4-5. Η προσομοίωσες l_e=6.25mm, chm=1.5, offset=±5mm είναι οι πιο κοντινές σε αυτήν που εκτέλεσαν οι Alsos και Amdahl, όμως η μορφή αστοχίας που προβλέπει είναι μακριά από την πραγματικότητα. Προφανώς, εφόσον οι κρίσιμες τιμές παραμόρφωσης είναι μεγαλύτερες στο μοντέλο υλικού Alsos και Amdahl, η αντοχή του ενισχυμένου ελάσματος είναι μεγαλύτερη (Σχήμα 4-47).

Όπως γίνεται φανερό, η αξιολόγηση των προσομοιώσεων δεν μπορεί να γίνει μόνο με βάση την καμπύλη απόκρισης, καθώς, ενδέχεται τα αριθμητικά μοντέλα που προσεγγίζουν καλά την απόκριση του φυσικού μοντέλου να απέχουν πολύ από την ακριβή πρόβλεψη της μορφής αστοχίας (βλ. Πίνακας 4-5). Είναι σκόπιμο, συμπερασματικά, τα αποτελέσματα (καμπύλη δύναμης-μετατόπισης και μορφή αστοχίας) να εξετάζονται συνδυαστικά και όχι μεμονωμένα, όταν αναζητείται το καλύτερο αριθμητικό μοντέλο. Στην περίπτωση του ενισχυμένου ελάσματος 1FB, το αριθμητικό μοντέλο που συνδυάζει καλύτερα μορφή αστοχίας και καμπύλη απόκρισης είναι το le=6.25mm, chm=2, offset=-35mm (μοντέλο 4, Πίνακας 4-5).

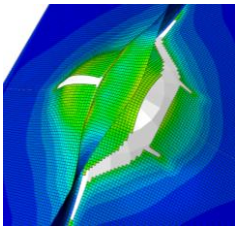
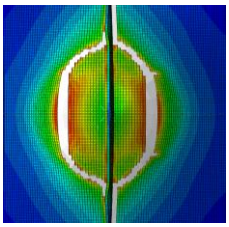
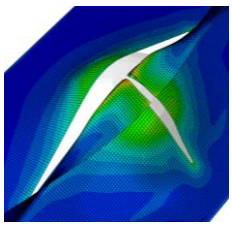
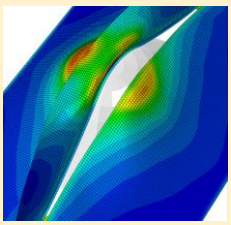
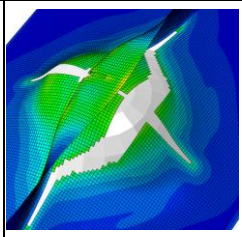
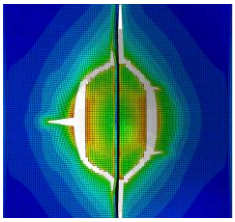


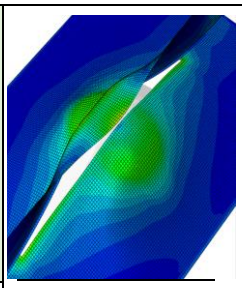
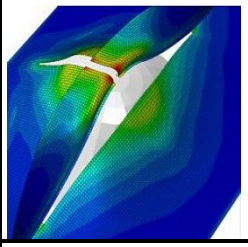
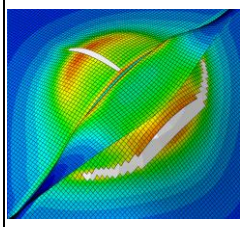
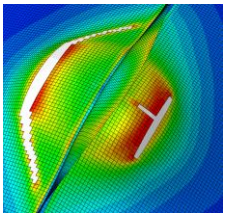
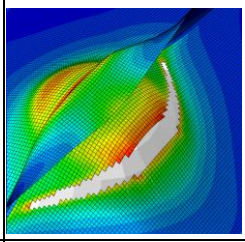
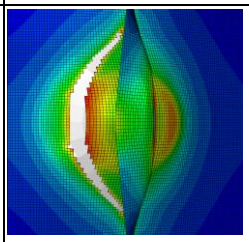
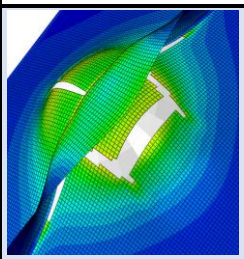
Σχήμα 4-46: Καμπύλη απόκρισης αριθμητικού μοντέλου 1FB, με το μοντέλο υλικού του εδαφίου 3.4.2, για χαρακτηριστικό μέγεθος στοιχείου ίσο με 6.25mm, για δύο τιμές του συντελεστή chm και τέσσερις τιμές της απόκλισης της θέσης πρόπτωσης του διεισδυτή από το κέντρο του ελάσματος της πλάκας.

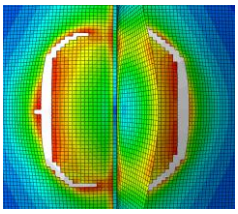
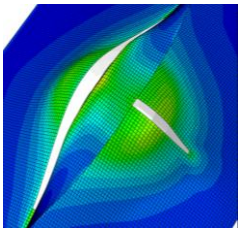
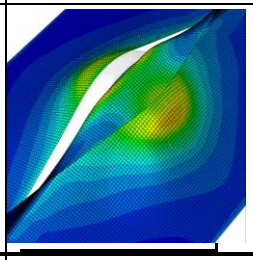
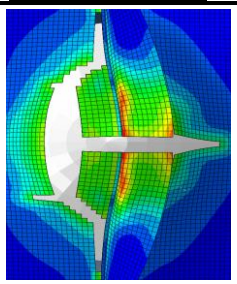
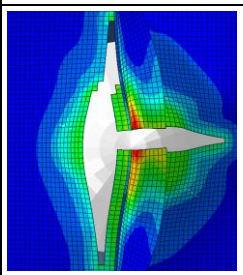
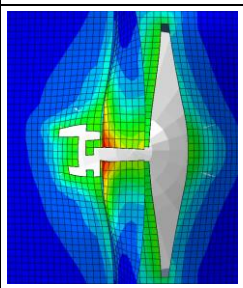


Σχήμα 4-47: Καμπύλη απόκρισης αριθμητικού μοντέλου 1FB, με τα μοντέλα υλικών των εδαφίων 3.4.2 και [8], για τρεις συνδυασμούς chm και offset.

Πίνακας 4-5: Συγκεντρωτικός πίνακας των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων για το πείραμα κρούσης της πλάκας με ένα επίπεδο ενισχυτικό, 1FB

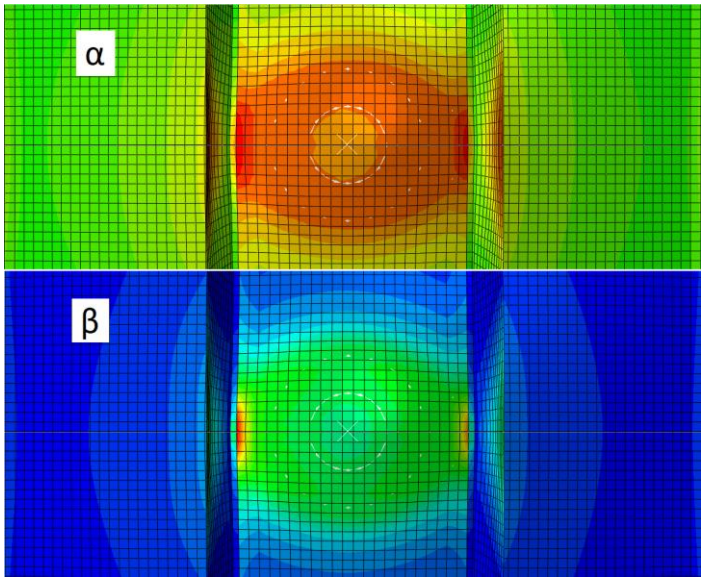
Αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος κρούσης 1FB							
#	**le [mm]**	**offset [mm]**	**Chm**	**Μοντέλο Υλικού**	**Κρίσιμη Πλαστική Παραμ/ση Πλάκας για η=1/3**	**Fmax Μοντέλου / Fmax Πειράματος (%)**	**Μορφή Αστοχίας**
1	6.25	5	1.5	Παρούσας Εργασίας (3.4.2, 4.3.1)	0.3815	79.59	
2		-5				82.02	
3		35				73.02	
4		-35				74.20	
5		5	2			77.39	
6		-5				77.07	

7		35				62.93	
8		-35				71.07	
9	6.25	5	0	Παρούσας Εργασίας (3.4.2, 4.3.1)	0.3815	98.38	
10		-5				94.93	
11		35				89.69	
12		-35				89.80	
13	6.25	5	1.5	[8]	0.616	95.51	

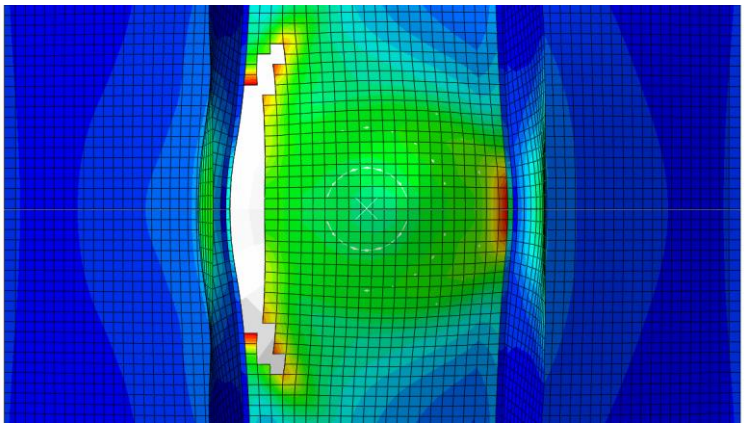
14		-5				96.64	
15		35				89.40	
16		35	2			80.05	
17	10	35	2	Παρούσας Εργασίας (3.4.2, 4.3.1)	0.365	63.10	
18	12.5				0.336	57.35	
19	15				0.3335	58.42	

Πλάκα με δύο επίπεδα ενισχυτικά (2FB)

Στην περίπτωση της εγκάρσιας φόρτισης της πλάκας με δύο επίπεδα ενισχυτικά, όλα τα αριθμητικά μοντέλα συμφωνούν όσον αφορά τη μορφή αστοχίας (Σχήμα 4-50). Κατά την προσομοίωση του πειράματος 1FB, μόνο τα μικρότερα στοιχεία μπορούσαν να περιγράψουν ικανοποιητικά τις συνθήκες κοντά στην ένωση πλάκας-ενισχυτικού και να προβλέψουν τη μορφή αστοχίας του πειράματος, γειτονικά της συγκόλλησης, ενώ, με μεγαλύτερο μέγεθος στοιχείου, η θραύση ξεκίναγε στις περιοχές ομοιόμορφα αυξημένης τάσης. Όπως εξηγήθηκε και στο εδάφιο 4.2.2, γι' αυτή τη διάταξη ενισχυτικών, οι περιοχές ομοιόμορφα αυξημένης τάσης/παραμόρφωσης της πλάκας (περιοχή α, Σχήμα 4-38) συμπίπτουν με τις περιοχές συγκέντρωσης τάσης/παραμόρφωσης λόγω της γεωμετρικής ασυνέχειας που δημιουργεί η γωνιακή συγκόλληση (περιοχή β, Σχήμα 4-38), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-48, επομένως το πλεονέκτημα αυτό των μικρότερων στοιχείων δεν αποτυπώνεται ιδιαίτερα στα αποτελέσματα.



Σχήμα 4-48: Οι περιοχές ομοιόμορφα αυξημένης τάσης/παραμόρφωσης και συγκέντρωσης τάσεων ταυτίζονται στο μοντέλο 2FB. α)Κατανομή ισοδύναμης τάσης κατά Mises β) Κατανομή ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης. Το σημείο έναρξης της αστοχίας είναι αυτό που φαίνεται να έχει τη μεγαλύτερη παραμόρφωση

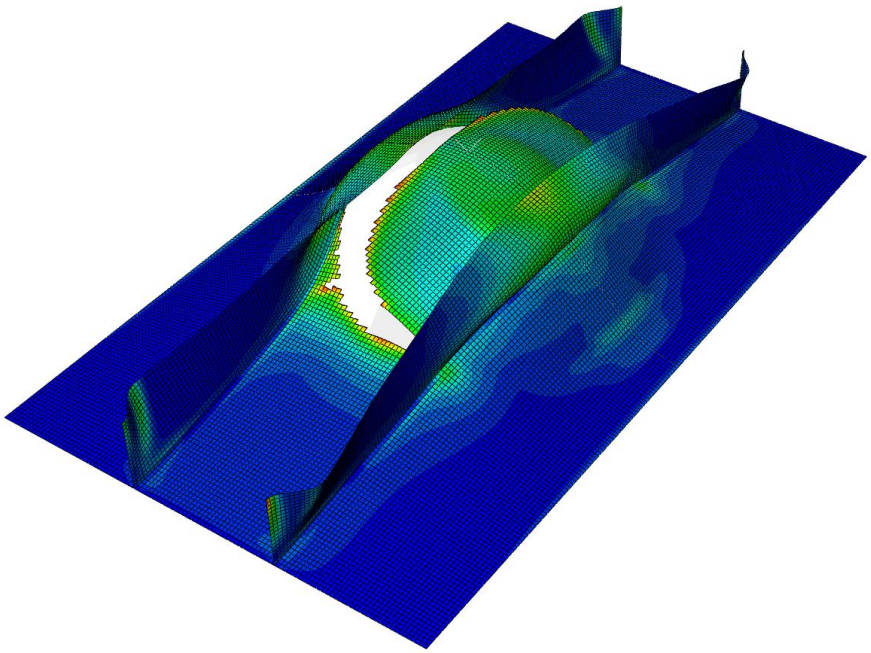


Σχήμα 4-49: Έναρξη και διάδοση της ρωγμής στα περισσότερα αριθμητικά μοντέλα. Η θραύση ξεκινά ακριβώς δίπλα στην ραφή συγκόλλησης και διαδίδεται λοξά προς το απέναντι ενισχυτικό. Το στιγμιότυπο έχει ληφθεί από την προσομοίωση με le=10mm, chm=0

Γίνονται 12 κύριες προσομοιώσεις του πειράματος κρούσης της πλάκας με δύο επίπεδα ενισχυτικά (2FB) σε τρεις τετράδες:

I. 4 προσομοιώσεις (διαφορετικά l_e) με το μοντέλο υλικού που παρουσιάζεται στα 3.4.2, 4.3.1 και με c_{hm}=1.5,
II. 4 προσομοιώσεις (διαφορετικά l_e) με το μοντέλο υλικού που παρουσιάζεται στα 3.4.2, 4.3.1 και με c_{hm}=0 (δηλαδή Κριτήριο Ισοδύναμης Πλαστικής Παραμόρφωσης Θραύσης),
III. 4 προσομοιώσεις (διαφορετικά l_e) με το μοντέλο υλικού που παρουσιάζεται στα [8] και 4.3.1.

Η μορφή αστοχίας που προβλέπουν όλα τα αριθμητικά μοντέλα είναι αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 4-50. Η θραύση ξεκινά κοντά στη ραφή συγκόλλησης και διαδίδεται λοξά προς το απέναντι ενισχυτικό. Σε όλα τα μοντέλα, πλην δύο, τα στοιχεία που αστοχούν πρώτα βρίσκονται ακριβώς δίπλα στην ραφή της συγκόλλησης (Σχήμα 4-50). Στα μοντέλα με le=12.5mm και le=15mm της ομάδας II η θραύση ξεκινά σε απόσταση δύο (και όχι ενός) πεπερασμένων στοιχείων από το ενισχυτικό, όμως διαδίδεται με τον ίδιο τρόπο. Η εγκάρσια απόσταση του διεισδυτή από το κέντρο της πλάκας (offset) είναι σταθερή και ίση με 5mm σε όλα τα αριθμητικά μοντέλα – δεν έχει σημασία αν το offset είναι στην πλευρά A ή B γιατί το ενισχυμένο έλασμα είναι συμμετρικό ως προς τον εγκάρσιο άξονα παρά τις γεωμετρικές ατέλειές του.



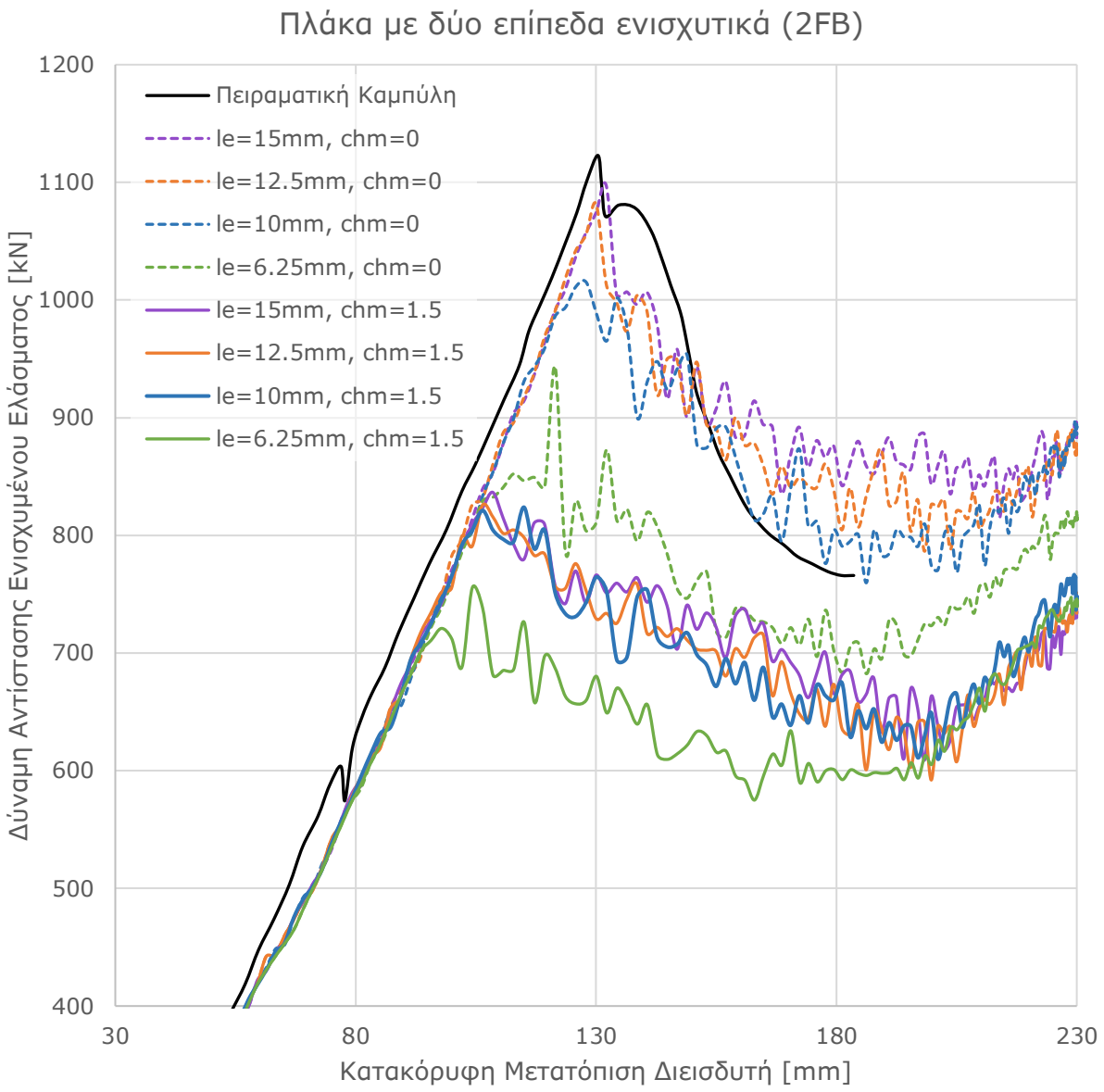
Σχήμα 4-50: Μορφή αστοχίας σε όλα τα αριθμητικά μοντέλα της διαμόρφωσης 2FB. Το στιγμιότυπο έχει ληφθεί από την προσομοίωση με le=6.25mm, chm=1.5

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρατίθενται αναλυτικά στις παρακάτω σελίδες. Στα Σχήμα 4-51 και Σχήμα 4-52 παρουσιάζονται οι καμπύλες απόκρισης των διάφορων μοντέλων, κατά ομάδες (I-II και I-III, αντίστοιχα). Στο Σχήμα 4-53, παρουσιάζονται οι καμπύλες απόκρισης των αριθμητικών μοντέλων με le=10mm, όλων των ομάδων. Στο Σχήμα 4-54 φαίνεται η σύγκλιση ισοδύναμης παραμόρφωσης και

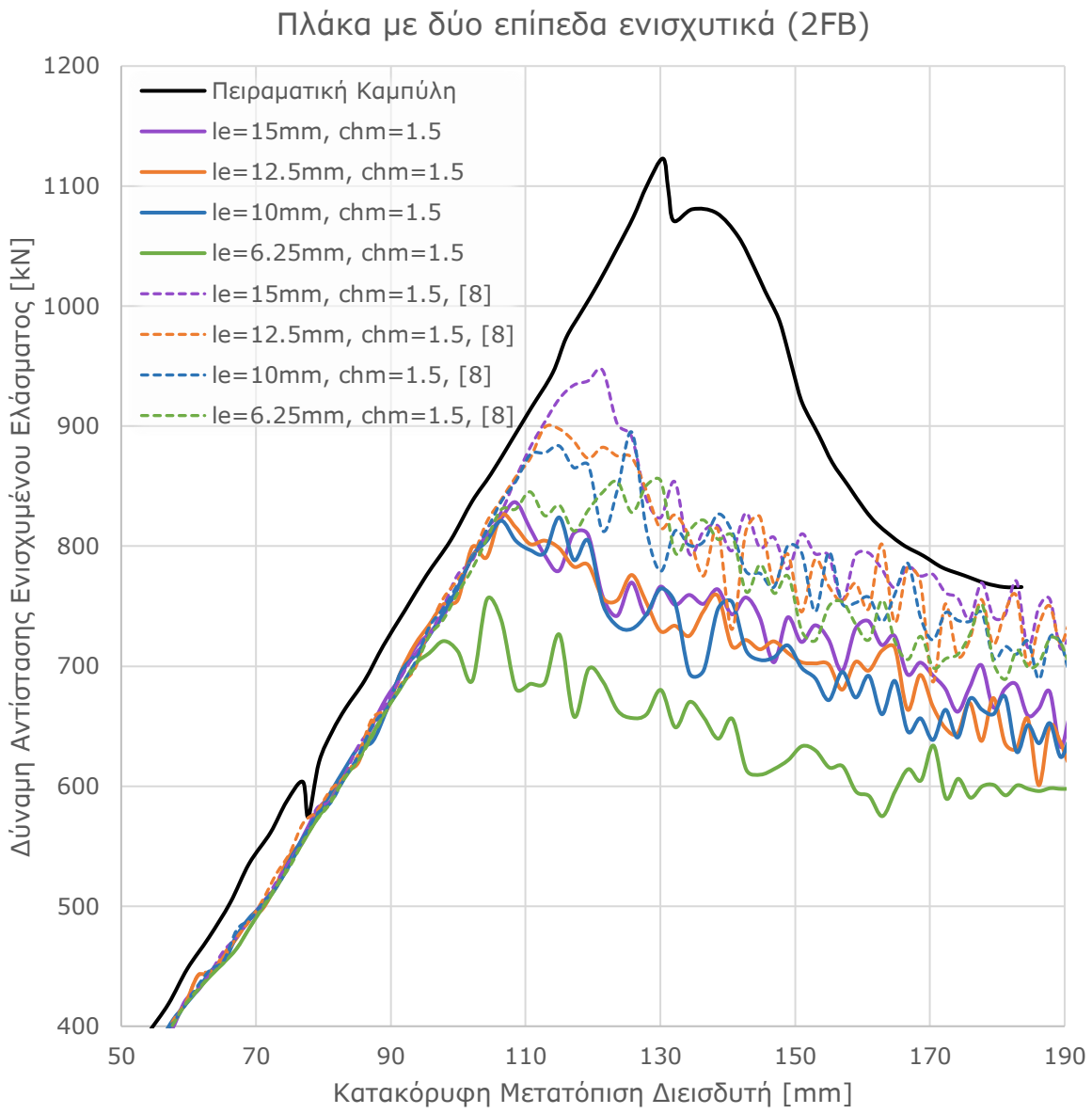
μέγιστης δύναμης αντίστασης για τα μοντέλα με διαφορετικά μεγέθη στοιχείων κάθε ομάδας. Η μορφή αστοχίας και η μέγιστη δύναμη αντίστασης, ως ποσοστό της πειραματικής, που προβλέπει κάθε μία από τις προσομοιώσεις παρουσιάζεται στον Πίνακας 4-6 (τα στιγμιότυπα από τα αποτελέσματα συμπεριλήφθηκαν για λόγους πληρότητας και συνοχής με τους αντίστοιχους συγκεντρωτικούς πίνακες των άλλων πειραμάτων, όμως δεν περιέχουν κάποια σημαντική πληροφορία, αφού η μορφή αστοχίας που εμφανίζεται σε όλες της προσομοιώσεις είναι αυτή του Σχήμα 4-50).

Από τα διαγράμματα, αποδεικνύεται και πάλι, ότι η αύξηση του συντελεστή C_{hm} μειώνει την αντοχή του αριθμητικού μοντέλου της ενισχυμένης πλάκας. Εντύπωση ίσως κάνει, ότι, αυτή τη φορά, η μέγιστη δύναμη αντίστασης αυξάνεται με την αύξηση του μεγέθους του στοιχείου. Όπως αναφέρθηκε, στην προσομοίωση αυτού του πειράματος, η μεταβολή του χαρακτηριστικού μεγέθους του στοιχείου, δεν επηρεάζει τη μορφή αστοχίας. Συνεπώς, στην αντοχή του ενισχυμένου ελάσματος, παίζει ρόλο μόνο η αναπτυσσόμενη και η κρίσιμη παραμόρφωση των στοιχείων. Καθότι τα μεγαλύτερα πεπερασμένα στοιχεία υφίστανται μικρότερες παραμορφώσεις, όπως έχει αναλυθεί, η θραύση καθυστερεί λίγο περισσότερο στα αραιά πλέγματα (όταν εφαρμόζεται κριτήριο θραύσης με βάση την παραμόρφωση). Η επίδραση αυτή εξισορροπείται από τον εκάστοτε νόμο συσχέτισης θραύσης (μείωση της κρίσιμης ισοδύναμης παραμόρφωσης με την αύξηση του μεγέθους του στοιχείου), γι’ αυτό τα αποτελέσματα έχουν αισθητά μικρότερη διασπορά σε σχέση με τα άλλα πειράματα.

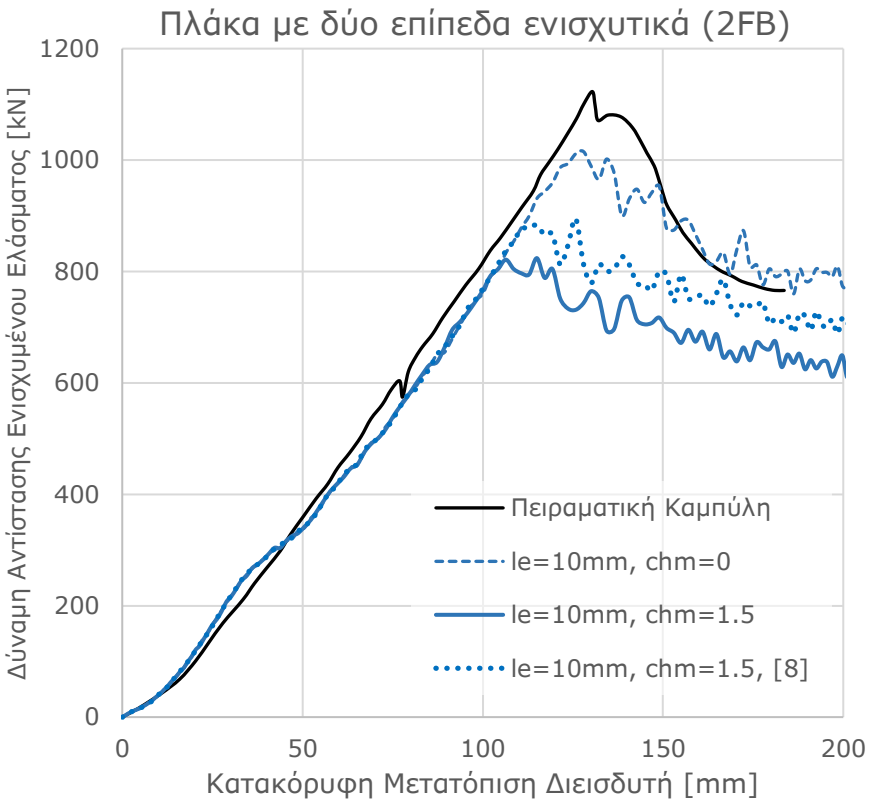
Παρατηρείται, επίσης, ότι μετά τη μέγιστη δύναμη αντίστασης (έναρξη αστοχίας), οι καμπύλες απόκρισης κάθε ομάδας μοντέλων, αλλά και μεταξύ των ομάδων, συγκλίνουν! Αυτό συναντάται και στις καμπύλες απόκρισης των αριθμητικών μοντέλων των άλλων πειραμάτων, τα οποία προβλέπουν παρόμοια μορφή αστοχίας μεταξύ τους. Το τμήμα της καμπύλης μετά το μέγιστο εκφράζει την εναπομείνουσα αντοχή του ενισχυμένου ελάσματος, η οποία εξαρτάται από το σχήμα και την έκταση της ρωγμής. Μετά την έναρξη της αστοχίας, όπου το μέγεθος του στοιχείου παίζει σημαντικό ρόλο, καθώς εφαρμόζεται κριτήριο θραύσης με βάση την παραμόρφωση, η πυκνότητα του πλέγματος δεν επηρεάζει τόσο την αντοχή του αριθμητικού μοντέλου. Η θραύση αναδιανέμει το τασικό πεδίο, όπως έχει συζητηθεί, και η μορφή της ρωγμής καθορίζει ποιες διευθύνσεις θα παραλάβουν το φορτίο, για δεδομένη γεωμετρία. Για παράδειγμα, στη διαμόρφωση US, αναλύθηκε πώς η δημιουργία της διαμήκους ρωγμής οδηγεί στην απώλεια εγκάρσιας αντοχής και αναδιανέμει τις μεμβρανικές τάσεις στη διαμήκη διεύθυνση. Στη διαμόρφωση 2FB, η διάδοση της ρωγμής επιβραδύνεται σύντομα, καθώς αυτή μένει περιορισμένη στην περιοχή μεταξύ των δύο διαμήκων ενισχυτικών. Καθώς η ρωγμή διαδίδεται διαμήκως (κατά μήκος της ραφής) και εγκαρσίως (προς το άλλο ενισχυτικό) στο μεσαίο τμήμα, τα τμήματα της πλάκας εκατέρωθεν των δύο ενισχυτικών παραλαμβάνουν το υπόλοιπο φορτίο, σε όλα τα αριθμητικά μοντέλα και στην πραγματικότητα. Γι’ αυτό το λόγο, όλα τα μοντέλα έχουν την ίδια συμπεριφορά μετά την ανάπτυξη της ρωγμής.



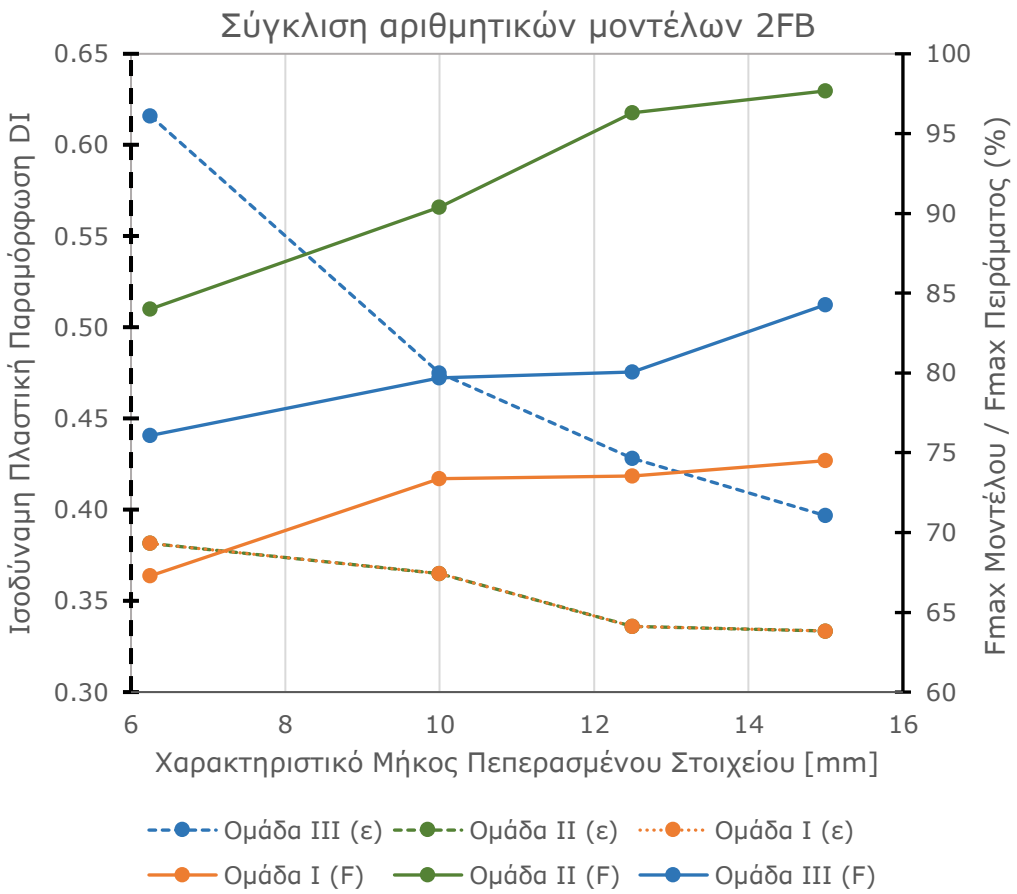
Σχήμα 4-51: Καμπύλη απόκρισης αριθμητικών μοντέλων 2FB, των ομάδων I και II



Σχήμα 4-52: Καμπύλη απόκρισης αριθμητικών μοντέλων 2FB, των ομάδων I και III

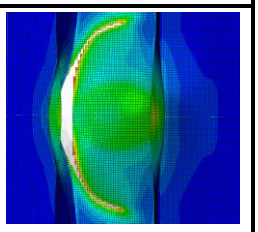
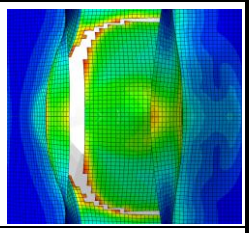
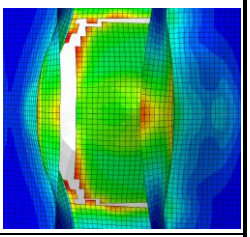
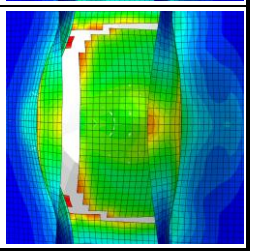
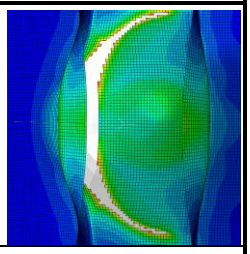
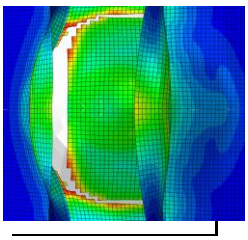


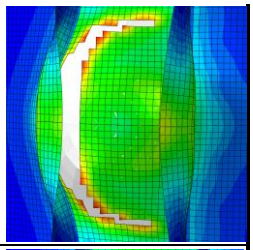
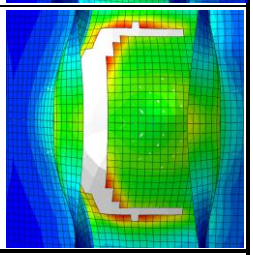
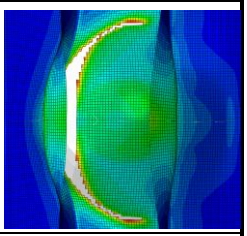
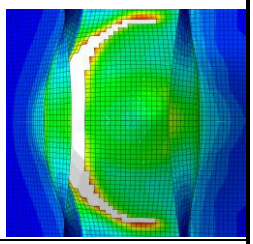
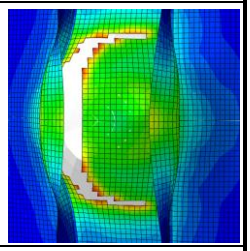
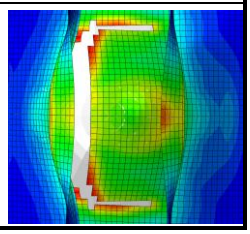
Σχήμα 4-53: Καμπύλες απόκρισης αριθμητικών μοντέλων 2FB των ομάδων I, II, III με le=10mm



Σχήμα 4-54: Σύγκλιση για τα αριθμητικά μοντέλα 2FB, των ομάδων I, II, III

Πίνακας 4-6: Συγκεντρωτικός πίνακας των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων για το πείραμα κρούσης της πλάκας με δύο επίπεδα ενισχυτικά, 2FB

Αποτελέσματα προσομοίωσης πειράματος κρούσης 2FB							
Ομάδα	**le [mm]**	**offset [mm]**	**c_{hm}**	**Μοντέλο Υλικού**	**Κρίσιμη Πλαστική Παραμ/ση Πλάκας για η=1/3**	**Fmax Μοντέλου / Fmax Πειράματος (%)**	**Μορφή Αστοχίας**
I	6.25	5	1.5	Παρούσας Εργασίας (3.4.2, 4.3.1)	0.3815	67.28	
	10				0.3650	73.37	
	12.5				0.3360	73.53	
	15				0.3335	74.50	
II	6.25	5	0	Παρούσας Εργασίας (3.4.2, 4.3.1)	0.3815	84.00	
	10				0.3650	90.40	

	12.5				0.3360	96.32	
	15				0.3335	97.68	
III	6.25	5	1.5	[8]	0.6160	76.08	
	10				0.4750	79.69	
	12.5				0.4280	80.04	
	15				0.3967	84.28	

4.4 Συζήτηση

Στην πορεία του εδαφίου 4.3.2, όπου παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των πειραμάτων US, 1FB και 2FB, έγιναν κάποιες παρατηρήσεις σχετικά με το πώς και ποιες παράμετροι του μοντέλου υλικού, αλλά και του αριθμητικού μοντέλου γενικότερα, επηρεάζουν περισσότερο τη συμπεριφορά του αριθμητικού μοντέλου κατά την εγκάρσια φόρτιση. Έτσι, από τη μελέτη των αποτελεσμάτων των αριθμητικών μοντέλων, συγκεντρώνονται κάποια συμπεράσματα.

Γεωμετρία και ατέλειες

Σε κάθε κατασκευή, αναπόφευκτα συναντώνται ατέλειες οι οποίες, μάλιστα, είναι πιθανώς άγνωστες, λόγω του φυσικού της μεγέθους, ή μη μετρήσιμες και οι οποίες δημιουργούν διαφορετικές συνθήκες φόρτισης και κατανομή των αναπτυσσόμενων τάσεων, σε σχέση με το ιδανικό σενάριο. Όταν η μελέτη και αριθμητική μοντελοποίηση τις λαμβάνει υπόψη, αυτό πρέπει να γίνεται με ρεαλιστικό τρόπο και προσοχή, καθώς μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά το αποτέλεσμα. Οι Hogstrom και Ringsberg [3], οι οποίοι μοντελοποίησαν πειράματα σύγκρουσης μεγάλης κλίμακας, ασχολήθηκαν με την ευαισθησία του αποτελέσματος στη διαφοροποίηση των παραμέτρων της μοντελοποίησης, εξαιτίας αβεβαιοτήτων, και πρότειναν την ανάλυση των διαφορετικών περιπτώσεων που ανακύπτουν, για να βρεθεί η δυσμενέστερη έκβαση.

Τα πειράματα που μοντελοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη είναι μεσαίας κλίμακας και η διερεύνηση των διαφορετικών περιπτώσεων που ανακύπτουν από την εισαγωγή ατελειών είναι απλούστερη. Οι ατέλειες που εισάγονται αφορούν (1) τη σχετική θέση των εμπλεκόμενων μερών (θέση πρόσπτωσης του διεισδυτή) και (2) αρχικές ατέλειες στη γεωμετρία των ενισχυτικών, που στη βιβλιογραφία κατηγοριοποιούνται ως “initial imperfections” (κύρτωση στην, ιδανικά, επίπεδη διατομή των ενισχυτικών). Σκοπός ήταν η ανάδειξη της επιρροής των ατελειών στα αποτελέσματα και η απόδειξη, ότι η αδυναμία πρόβλεψης της μορφής αστοχίας του φυσικού μοντέλου μπορεί, σε κάποιες περιπτώσεις, να οφείλεται στις γεωμετρικές ατέλειες που έχουν -ή δεν έχουν- εισαχθεί και όχι αποκλειστικά, ως συνήθως αναφέρεται, στο μοντέλο του υλικού. Για παράδειγμα, ήταν σημαντικό να μελετηθούν οι περιπτώσεις «πλευρά Α» και πλευρά Β», στο μοντέλο 1FB, 4.3.2, καθώς η «αλληλεπίδραση» των δύο εισαγόμενων ατελειών (1 και 2 παραπάνω), οδήγησε σε διαφορετικά αποτελέσματα για την καμπύλη απόκρισης της κατασκευής και, το κυριότερο, για τη μορφή αστοχίας, σε κάθε περίπτωση.

Όπως παρατηρείται από το εδάφιο 4.2.2, τα αριθμητικά μοντέλα του Μαρινάτου [23] δεν κατάφεραν να αποτυπώσουν τις μορφές αστοχίας που παρατηρήθηκαν στα πειράματα, πολύ πιθανώς, γιατί φαίνεται ότι δεν λήφθηκαν υπόψη οι γεωμετρικές ατέλειες και το πρόβλημα θεωρήθηκε συμμετρικό. Τα αριθμητικά μοντέλα των Alsos και Amdahl [8] είχαν αισθητά καλύτερες επιδόσεις στην πρόβλεψη της μορφής αστοχίας. Η μεγαλύτερη δυσκολία συναντήθηκε στην περίπτωση του αριθμητικού μοντέλου 1FB, όπου η μορφή αστοχίας προβλέφθηκε μόνο από το αριθμητικό μοντέλο με το πυκνότερο

πλέγμα (l_e=5mm, c_{hm}=1.5 και |offset|=5mm), χωρίς ωστόσο να γίνεται λόγος για τη συνεισφορά των ατελειών στο αποτέλεσμα.

Το αριθμητικό μοντέλο που κατασκευάστηκε στην παρούσα μελέτη σύμφωνα με τις υποδείξεις των Alsos και Amdahl (l_e=6.25mm, c_{hm}=1.5 και offset=±5mm) δεν προέβλεψε σωστά τη μορφή αστοχίας. Κρίνεται, ότι η διαφορά στο χαρακτηριστικό μέγεθος των στοιχείων (5 με 6.25mm) μάλλον δεν ευθύνεται για τα διαφορετικά αποτελέσματα. Εξάλλου, συστήνεται ο λόγος l_e/t να παραμένει μεγαλύτερος της μονάδας για τα στοιχεία κελύφους. Στο συγκεκριμένο μοντέλο, το μεγαλύτερο πάχος ελάσματος που συναντάται είναι αυτό του ενισχυτικού και ίσο με 6mm. Συνεπώς, εφόσον χρησιμοποιήθηκε το ίδιο χαρακτηριστικό μέγεθος στοιχείων σε όλη τη γεωμετρία, θα πρέπει, σύμφωνα με τις υποδείξεις, $l_e \geq 6$mm. Θεωρητικά, λοιπόν, η μόνη διαφορά των μοντέλων 13 και 14 του Πίνακας 4-5 με το επιτυχημένο μοντέλο των Alsos και Amdahl είναι η έλλειψη μοντελοποίησης του πλαισίου που περιβάλλει την πλάκα, το οποίο έχει αντικατασταθεί από οριακή συνθήκη πάκτωσης, για λόγους υπολογιστικού χρόνου και επειδή δεν διατίθενται επαρκή στοιχεία για την στήριξή του πλαισίου, κατά την πειραματική διαδικασία. Δεδομένου ότι το πλαίσιο αποτελείται από συγκολλημένες κοιλοδοκούς ισχυρότερου υλικού και διπλάσιου πάχους, η συνθήκη πάκτωσης θεωρείται ότι προσομοιάζει ικανοποιητικά τις συνθήκες στην περιφέρεια της πλάκας. Φυσικά, υπάρχει το ενδεχόμενο, ο τρόπος μοντελοποίησης του πλαισίου από τους Alsos και Amdahl, ή κάποια άλλη παράμετρος μοντελοποίησης που δεν αναλύεται στη δημοσίευσή τους, να ήταν καθοριστικά για την ακριβή πρόβλεψη της μορφής αστοχίας. Σε κάθε περίπτωση, ο ρόλος των ατελειών στα αποτελέσματα είναι αδιαμφισβήτητος.

Πέρα από τις ατέλειες που λήφθηκαν υπόψη στην παρούσα εργασία, θα μπορούσε ακόμη να μελετηθεί η επίδραση γεωμετρικών ατελειών που καταρρίπτουν τη συμμετρία κατά τον εγκάρσιο άξονα, παραδείγματος χάρη, ατέλεια στο ενισχυτικό ή απόκλιση της θέσης πρόσπτωσης του διεισδυτή κατά το διάμηκες.

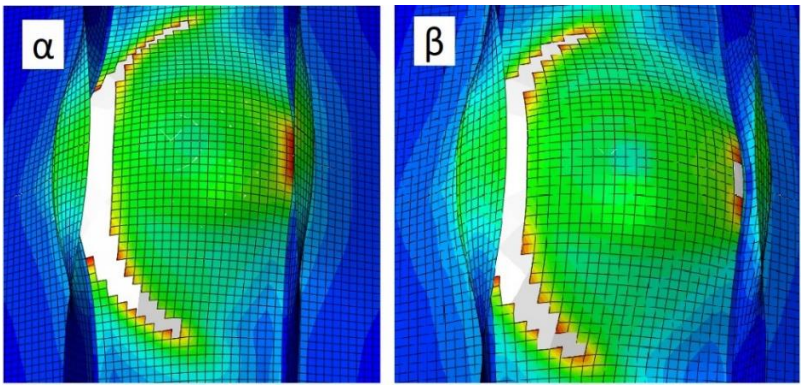
Μοντελοποίηση συγκόλλησης

Στην παρούσα εργασία, η γωνιακή συγκόλληση μεταξύ πλάκας και ενισχυτικού λήφθηκε υπόψη μέσω της τοπικής αύξησης του πάχους στην περιοχή της ραφής. Ακόμη, εξετάσθηκε η επίδραση των παραμενουσών τάσεων, εξαιτίας της συγκόλλησης, στην απόκριση της κατασκευής. Οι παραμένουσες τάσεις εισάχθηκαν ως αρχική συνθήκη στα πεπερασμένα στοιχεία στο μοντέλο 1FB, όπως περιγράφτηκε στο εδάφιο 4.2.1. Αποδείχθηκε, ότι οι παραμένουσες τάσεις δεν επηρεάζουν την καμπύλη απόκρισης και τη μορφή αστοχίας του ενισχυμένου ελάσματος 1FB, καθώς, η πλαστικοποίηση της κατασκευής, που επιφέρει η εξωτερική φόρτιση, συμβάλλει στην ανακατανομή του τασικού πεδίου και την εξουδετέρωση των προϋπαρχουσών τάσεων.

Η προσαύξηση του πάχους των πεπερασμένων στοιχείων της πλάκας και του ενισχυτικού που αντιπροσωπεύουν τη ραφή συγκόλλησης έγινε όπως περιγράφτηκε στο 4.3.1. Όπως αναφέρθηκε, σε αντίθεση με την βιβλιογραφία [8], [23], το πρόσθετο πάχος των στοιχείων κελύφους της πλάκας τοποθετήθηκε προς την πλευρά της ένωσης και δεν ισομοιράστηκε εκατέρωθεν του μέσου επιπέδου του στοιχείου (Σχήμα 4-26 έναντι Σχήμα

4-12), καθώς κρίνεται, ότι η επιλογή αυτή προσομοιάζει καλύτερα τη γεωμετρία της ένωσης. Η εντονότερη γεωμετρική ασυνέχεια, που δημιουργείται σε αυτήν την περίπτωση, περιορίζει την μέγιστη αντοχή της ενισχυμένης πλάκας, αφού ενισχύει τη συγκέντρωση τάσεων και παραμορφώσεων. Στο Σχήμα 4-55, φαίνεται η επίδραση της επιλογής αυτής για τη μοντελοποίηση της ραφής συγκόλλησης, στην καμπύλη απόκρισης του μοντέλου 2FB, με le=6.25mm και chm=0. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, με την τοποθέτηση της προσαύξησης του πάχους της ραφής εκατέρωθεν του μέσου επιπέδου της πλάκας (μη ρεαλιστική προσέγγιση), υπερεκτιμάται η μέγιστη αντοχή του ελάσματος. Ο τρόπος μοντελοποίησης της ραφής μπορεί να επηρεάσει, επιπροσθέτως, και τη μορφή αστοχίας, αφού επιδρά στην κατανομή των τάσεων κοντά στην ένωση. Στο Σχήμα 4-56, παρουσιάζεται η μορφή αστοχίας του μοντέλου 2FB, με le=10mm και chm=0, για κάθε περίπτωση. Παρατηρείται, ότι η εκατέρωθεν προσαύξηση, καθυστερώντας την αστοχία (Σχήμα 4-55), επιτρέπει στην συγκέντρωση παραμορφώσεων δίπλα στην δεξιά συγκόλληση να αναπτυχθεί περισσότερο, με αποτέλεσμα, να δημιουργηθεί δεύτερη ρωγμή σε εκείνο το σημείο.

Σχήμα 4-55: Σύγκριση καμπυλών απόκρισης αριθμητικών μοντέλων 2FB με le=6.25mm και chm=0, όταν το πρόσθετο πάχος των στοιχείων της πλάκας που αναπαριστούν τη ραφή συγκόλλησης τοποθετείται μόνο από τη μία πλευρά (πράσινη καμπύλη), ισομοιράζεται στις δύο πλευρές (κόκκινη καμπύλη)



Σχήμα 4-56: Μορφή αστοχίας αριθμητικού μοντέλου 2FB με le=10mm, chm=0, όταν το πρόσθετο πάχος των στοιχείων της πλάκας που αναπαριστούν τη ραφή συγκόλλησης α)τοποθετείται μόνο από τη μία πλευρά, β)ισομοιράζεται στις δύο πλευρές (κρίθηκε μη ρεαλιστικό στην προκειμένη μελέτη).

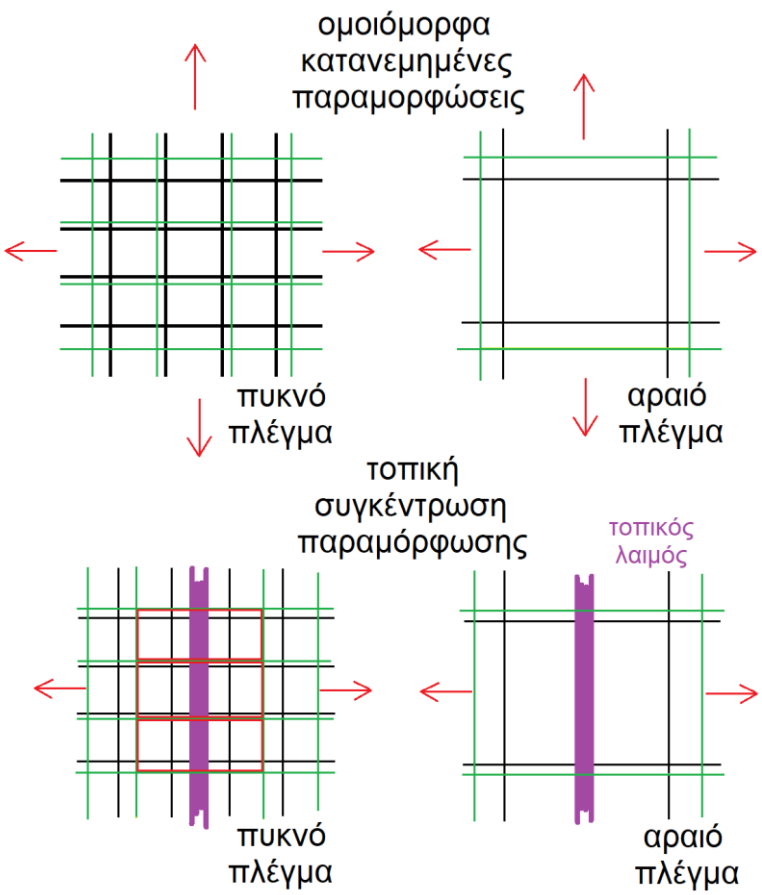
Χαρακτηριστικό μέγεθος πεπερασμένου στοιχείου

Όπως έχει αναλυθεί στην πορεία της τεχνικής έκθεσης, όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος του πεπερασμένου στοιχείου, τόσο αυξάνεται εν γένει η ανθεκτικότητά του στην όλκιμη θραύση, που επακολουθεί τη δημιουργία λαιμού. Όταν το πλέγμα είναι πυκνό, τα στοιχεία που βρίσκονται στην περιοχή του λαιμού αντιλαμβάνονται μεγαλύτερες παραμορφώσεις (le μικρό, άρα Δl/le μεγάλο) σε σχέση με τα αντίστοιχα στοιχεία ενός αραιότερου πλέγματος (le μικρό, άρα Δl/le μικρό, Σχήμα 4-57). Συνεπώς, εκ φύσεως, τα πεπερασμένα στοιχεία με μεγαλύτερο χαρακτηριστικό μήκος αστοχούν δυσκολότερα, λόγω όλκιμης θραύσης. Το φαινόμενο αυτό καλείται να εξισορροπήσει η προσαρμογή της κρίσιμης παραμόρφωσης αστοχίας σε κάθε μέγεθος στοιχείου (fracture scaling law). Οι Alsos και Amdahl [8] κατασκευάζουν έναν νόμο συσχέτισης της κρίσιμης παραμόρφωσης, βασιζόμενοι στην υπόθεση, ότι ο λαιμός που δημιουργείται έχει πλάτος ίσο με το πάχος του ελάσματος. Στην παρούσα διπλωματική, η προσαρμογή έγινε μέσω της κρίσιμης παραμόρφωσης Damage Initiation, η οποία προσδιορίστηκε με την προσομοίωση του πειράματος εφελκυσμού και αντίστροφη μηχανική, όπως εξηγήθηκε στο 3.3.4.

Όταν δεν δημιουργείται λαιμός, με επακόλουθη συγκέντρωση τάσεων/παραμορφώσεων, και οι αυξημένες παραμορφώσεις είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες σε μία πιο ευρεία περιοχή, τότε η προσαρμογή (μείωση) της κρίσιμης παραμόρφωσης με αύξηση του μεγέθους του στοιχείου, οδηγεί σε υποεκτίμηση της αντοχής της κατασκευής, όταν χρησιμοποιείται αραιό πλέγμα. Η επιμήκυνση ισομοιράζεται σε όλα τα στοιχεία, επομένως, η παραμόρφωση (Δl/l) των μικρών και των μεγαλύτερων στοιχείων είναι ίδια. Η διασπορά των αποτελεσμάτων των αριθμητικών μοντέλων, διακριτοποιημένων με διαφορετικό χαρακτηριστικό μέγεθος στοιχείου, είναι μεγαλύτερη, όταν η αστοχία δεν συμβαίνει σε σημεία με τοπικά συγκεντρωμένες παραμορφώσεις (π.χ. διαμόρφωση US).

Το πλεονέκτημα που έχει η χρήση των μικρότερων πεπερασμένων στοιχείων, είναι η δυνατότητα καλύτερης περιγραφής των συνθηκών σε κατασκευαστικές λεπτομέρειες και γεωμετρικές ασυνέχειες, όπως ενώσεις ελασμάτων, με τη σύλληψη των συγκεντρώσεων τάσεων/παραμορφώσεων, που δεν αποτυπώνονται στα μεγαλύτερα στοιχεία. Στον αντίποδα, η δυνατότητα αυτή τους προσδίδει, ταυτοχρόνως, μεγαλύτερη ευαισθησία, η οποία καλείται να εξισορροπηθεί από το fracture scaling law.

Με τη σύγκριση των διαγραμμάτων των εδαφίων 4.2.2 και 4.3.2 παρατηρείται ότι, αποτελέσματα των προσομοιώσεων των Alsos και Amdahl [8], για διάφορα μεγέθη στοιχείων, έχουν μεγαλύτερη διασπορά από τα αντίστοιχα της παρούσας μελέτης. Αυτό είναι μία ένδειξη, ότι η προσαρμογή της καμπύλης μετά το όριο αντοχής και της κρίσιμης τιμής της παραμόρφωσης έγινε καταλληλότερα στην παρούσα μελέτη, σε σχέση με τη μελέτη των ερευνητών της βιβλιογραφίας. Από το Σχήμα 4-51 φαίνεται, ότι τα αριθμητικά μοντέλα 2FB για διαφορετικά μεγέθη στοιχείου δίνουν σχεδόν ταυτόσημη καμπύλη απόκρισης. Φυσικά, η διασπορά των αποτελεσμάτων μεγαλώνει, όταν η θραύση γίνεται υπό καθεστώς ομοιόμορφα αυξημένης παραμόρφωσης.

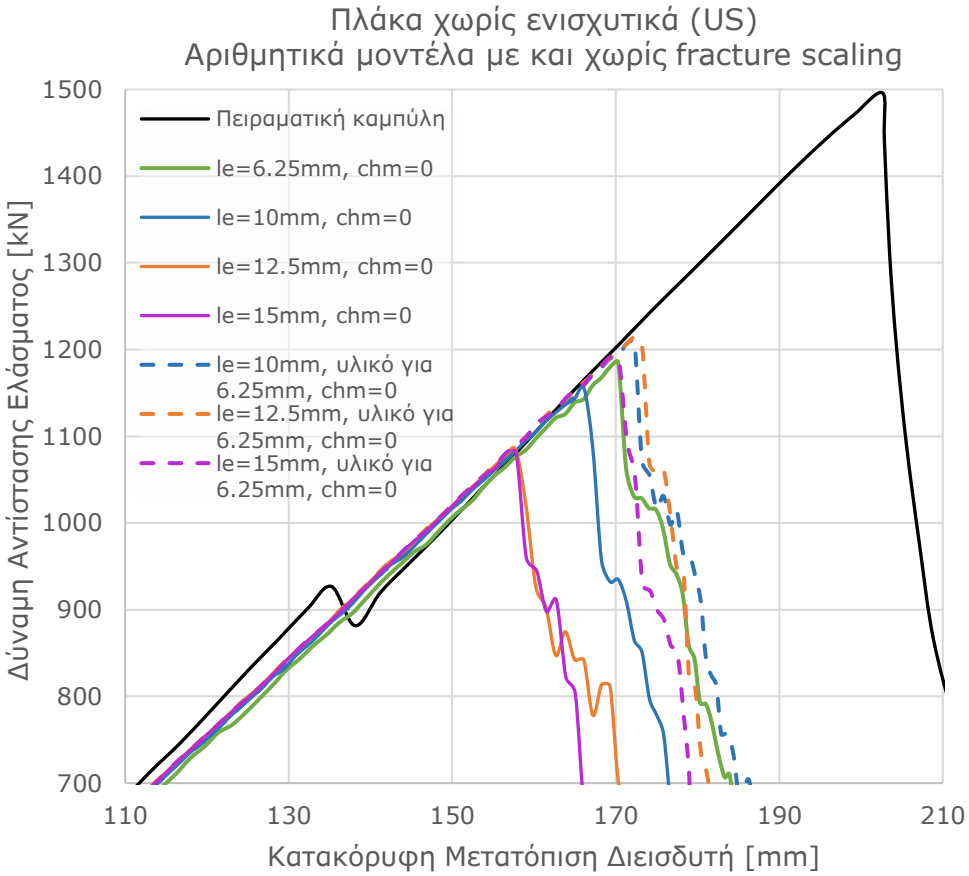


Σχήμα 4-57: Παραμόρφωση πυκνού και αραιού πλέγματος στην περίπτωση των ομοιόμορφα κατανεμημένων παραμορφώσεων και στην περίπτωση της τοπικά συγκεντρωμένης παραμόρφωσης. Το μαύρο πλέγμα αντιπροσωπεύει τις θέσεις και το μέγεθος των απαραμόρφωτων στοιχείων και το πράσινο πλέγμα αντιπροσωπεύει τη μορφή του πλέγματος κατά τη φόρτιση. Θεωρείται, ότι όλα τα πλέγματα καλύπτουν την ίδια επιφάνεια του ελάσματος. Στην περίπτωση της ομοιόμορφα κατανεμημένης παραμόρφωσης, όλα τα γειτονικά πεπερασμένα στοιχεία παραμορφώνονται περίπου το ίδιο, ενώ στην περίπτωση που δημιουργείται τοπικός λαιμός, κάποια στοιχεία παραμορφώνονται αισθητά περισσότερο. Επίσης, η παραμόρφωση των μικρότερων στοιχείων είναι μεγαλύτερη από την παραμόρφωση του στοιχείου του αραιού πλέγματος, για ίδιο πλάτος λαιμού και ίδια επιμήκυνση της επιφάνειας.

Η διαμόρφωση US, είναι μία περίπτωση, όπου η παραμόρφωση είναι ομοιόμορφα αυξημένη σε μία σχετικά ευρεία περιοχή. Στα ανάλογα διαγράμματα δύναμης-παραμόρφωσης, φαίνεται, ότι τα αριθμητικά μοντέλα που έχουν διακριτοποιηθεί με πυκνότερο πλέγμα είναι ισχυρότερα. Καθώς δεν συναντάται τοπική δημιουργία λαιμού, η συμπεριφορά του υλικού δεν περιγράφεται το ίδιο καλά από όλα τα πλέγματα, όταν εφαρμόζεται κάποιο fracture scaling. Αντιθέτως, στα αριθμητικά μοντέλα 2FB, η προσαρμογή της κρίσιμης παραμόρφωσης, για κάθε χαρακτηριστικό μέγεθος, κάνει τα μεγαλύτερα στοιχεία, που έχουν φυσική αδυναμία στην περιγραφή της συγκέντρωσης παραμόρφωσης, να μπορούν να ανταποκριθούν καλύτερα και να προβλέψουν ικανοποιητικά τη μορφή αστοχίας του πειράματος. Η περίπτωση του 1FB, είναι η πιο περίπλοκη, καθώς συνυπάρχουν, σε διαφορετικά σημεία του ελάσματος της πλάκας, ομοιόμορφα αυξημένες παραμορφώσεις στα πλάγια (περιοχές α, Σχήμα 4-38) και συγκεντρωμένες παραμορφώσεις δίπλα στη συγκόλληση (περιοχή β, Σχήμα 4-38). Τα μεγάλα στοιχεία, που δυσκολεύονται να συλλάβουν τη συγκέντρωση παραμόρφωσης γειτονικά της ραφής, αντιλαμβάνονται καλύτερα τις αυξημένες παραμορφώσεις μακριά

από αυτό. Το ύψος των τάσεων και παραμορφώσεων είναι περίπου ίδιο στις δύο περιοχές, με αποτέλεσμα, τα αραιότερα πλέγματα να θραύονται πρόωρα εντός των περιοχών (α), πριν αυξηθούν περαιτέρω οι παραμορφώσεις που θα οδηγούσαν στην αστοχία κοντά στη γεωμετρική ασυνέχεια.

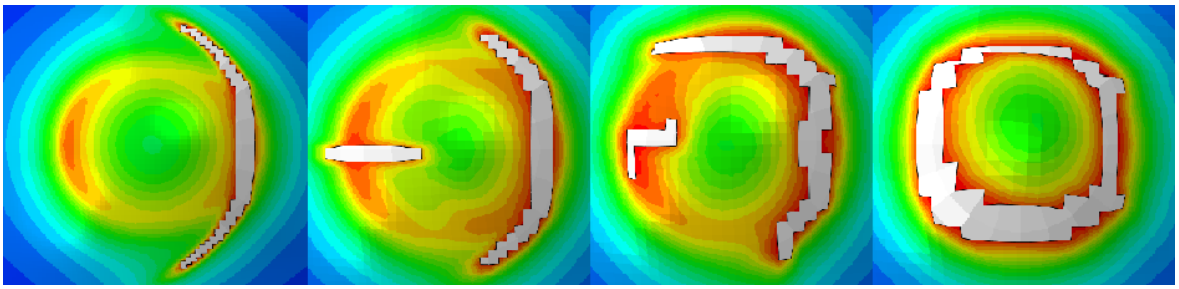
Ένας τρόπος επίλυσης του προβλήματος της διασποράς των αποτελεσμάτων, που προτάθηκε από τους Alsos και Amdahl [8], είναι η τροποποίηση της κρίσιμης παραμόρφωσης αστοχίας ανάλογα με το μέγεθος του στοιχείου, μόνο σε περιοχές, όπου αναμένεται να εμφανιστούν συγκεντρώσεις παραμορφώσεων, δηλαδή γεωμετρικές τον ορισμό της κρίσιμης παραμόρφωσης για le/t=1, στο μοντέλο υλικού για όλα τα μεγέθη στοιχείων, δηλαδή τη μη εφαρμογή του fracture scaling law. Στην παρούσα μελέτη, μπορεί, στις περιοχές όπου αναμένεται η θραύση να εμφανιστεί μετά από ομοιόμορφα αυξημένη παραμόρφωση, να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο υλικού που αφορά τα στοιχεία le=6.25mm, ανεξαρτήτως της πυκνότητας πλέγματος.



Σχήμα 4-58: Καμπύλη απόκρισης αριθμητικών μοντέλων US με chm=0, με και χωρίς προσαρμογή της κρίσιμης παραμόρφωσης αστοχίας.

Για παράδειγμα, στο Σχήμα 4-35, φαίνεται ότι η απόκλιση της καμπύλης απόκρισης των μοντέλων με chm=0, με le=6.25mm και le=12.5 είναι ελάχιστη. Στο Σχήμα 4-58, συγκρίνονται οι καμπύλες απόκρισης των αριθμητικών μοντέλων US, στα οποία έχει χρησιμοποιηθεί το μοντέλο υλικού, που αναλογεί στο κάθε μέγεθος στοιχείου και αυτών στα οποία το μοντέλο υλικού αφορά le=6.25mm ανεξαρτήτως της πυκνότητας της διακριτοποίησης. Όπως φαίνεται, η διασπορά των τιμών μέγιστης δύναμης απόκρισης

των αριθμητικών μοντέλων, με διαφορετική πυκνότητα πλέγματος, μειώνεται δραματικά. Στο Σχήμα 4-59, φαίνεται η μορφή αστοχίας των αριθμητικών μοντέλων US, με chm=0 και χωρίς fracture scaling. Σημειώνεται (μικρότερη) διαφορά στη μορφή της ρωγμής, όμως αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι τα λιγότερα και μεγαλύτερα στοιχεία δεν μπορούν να αποδώσουν με την ίδια λεπτομέρεια την εντατική κατάσταση και όχι στην τεχνητή «αποδυνάμωσή» τους, με το fracture scaling.



Σχήμα 4-59: Μορφή αστοχίας αριθμητικών μοντέλων US με χαρακτηριστικό μέγεθος στοιχείων le= 6.25, 10, 12.5, 15 mm (από αριστερά προς τα δεξιά). Σε όλα τα μοντέλα, μετά το όριο αντοχής, έχει χρησιμοποιηθεί το μοντέλο υλικού που προσδιορίστηκε με αντίστροφη μηχανική, βάσει του στοιχείου le=6.25mm.

Κριτήριο αστοχίας

Το κριτήριο αστοχίας που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία περιγράφτηκε διεξοδικά στα εδάφια 3.3.2 και 4.3.1. Όπως αναφέρθηκε, στα αριθμητικά μοντέλα του υλικού που αναπτύχθηκαν, η τιμή της παραμέτρου chm του κριτηρίου αστοχίας τίθεται ίση με 0 ή 1.5 (ή 2 στην περίπτωση του 1FB). Για chm=0, το κριτήριο αστοχίας ισοδυναμεί με το Κριτήριο Ισοδύναμης Πλαστικής Παραμόρφωσης, αφού η κρίσιμη τιμή παραμόρφωσης αστοχίας είναι σταθερή για όλο το εύρος τριαξονικότητας (και ίση με την παραμόρφωση αστοχίας σε συνθήκες μονοαξονικού εφελκυσμού). Για θετικές τιμές του chm η κρίσιμη παραμόρφωση μειώνεται με την αύξηση της τριαξονικότητας, για η>1/3, βάσει της σχέσης Rice Tracey, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-44.

Στα αριθμητικά μοντέλα US και 2FB, φάνηκε ότι, όταν χρησιμοποιήθηκε chm=0, η πρόβλεψη για τη μέγιστη αντοχή της κατασκευής ήταν ακριβέστερη (Πίνακας 4-4, Πίνακας 4-6). Η παρατήρηση αυτή υποδηλώνει, ότι τα αποτελέσματα είναι πιο ρεαλιστικά, όταν η τιμή της κρίσιμης παραμόρφωσης αστοχίας σε συνθήκες διαξονικού εφελκυσμού είναι περίπου ίση με την κρίσιμη παραμόρφωση σε συνθήκες μονοαξονικού εφελκυσμού (αφού το κριτήριο καλιμπράρεται με τη βοήθεια αυτής της δοκιμής). Απεναντίας, τα αποτελέσματα των αριθμητικών μοντέλων 1FB, με chm=0, παρόλο που δίνουν μία καλή πρόβλεψη για τη μέγιστη δύναμη αντίστασης της κατασκευής, αποτυγχάνουν κατά πολύ, να προβλέψουν την μορφή αστοχίας, ακόμη και με το πυκνότερο πλέγμα.

Στο Σχήμα 4-60 σχεδιάζεται η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση, η τριαξονικότητα των τάσεων, η κρίσιμη παράμετρος αστοχίας ω_D (του κριτηρίου Ductile Damage του ABAQUS) και το Damage Degradation συναρτήσει της κατακόρυφης μετατόπισης του διεισδυτή (displacement) στο σημείο εκκίνησης της θραύσης, στο μοντέλο 1FB, l_e=6.25mm, c_{hm}=2, offset=+35mm. Το Σχήμα 4-60α αναφέρεται στην εφελκυστική ίνα της πλάκας (κάτω πλευρά, SNEG), ενώ το Σχήμα 4-60β στην θλιπτική

ίνα (πάνω πλευρά, SPOS), όπως μπορεί να διαπιστωθεί και από το ιστορικό της τριαξονικότητας. Κάθε ίνα θραύεται σε διαφορετική χρονική στιγμή, που στα διαγράμματα σηματοδοτείται με την απότομη άνοδο του Damage Evolution, ως την τιμή 1, και την απώλεια της φέρουσας ικανότητάς της, που αποτυπώνεται ως μηδενισμός της τριαξονικότητας των τάσεων. Η θραύση ξεκινά από την εφελκυστική ίνα, σε μετατόπιση διεισδυτή 90 mm και η έναρξη της ρωγμής δημιουργείται, μετά την θραύση όλων των επιπέδων κατά το πάχος, λίγο μετά τα 120 mm μετατόπισης. Στα διαγράμματα σημειώνεται ακόμη το σημείο έναρξης της αστοχίας (Damage Initiation), όταν δηλαδή ικανοποιηθεί το κριτήριο αστοχίας (Damage Criterion=1). Στην εφελκυστική ίνα, το Damage Evolution διαρκεί αρκετά, ενώ στη θλιπτική ίνα, το Evolution είναι σχεδόν ακαριαίο, αφού έχει προηγουμένως αστοχήσει όλη η υπόλοιπη διατομή και το εναπομείναν πάχος καλείται να παραλάβει όλο το φορτίο. Παρατηρείται, μάλιστα, ότι όταν επέλθει θραύση στην εφελκυστική ίνα, οι τάσεις στην πρώην «θλιπτική ίνα» αυξάνονται απότομα (μεγάλες τριαξονικότητες) και ο ρυθμός παραμόρφωσης επιταχύνεται.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-60α, μετά από κάποιες αρχικές διαταραχές, η τιμή της τριαξονικότητας είναι σχεδόν σταθερή και περίπου ίση με 0.6, συνεπώς, μπορεί να βγει εκτός του ολοκληρώματος της Εξ. 3-48 και το κριτήριο αστοχίας εκφράζεται από την Εξ. 3-47. Η χρονική ιστορία της τριαξονικότητας, φαίνεται να έχει μικρή επιρροή στο σημείο έναρξης της αστοχίας, για τις συγκεκριμένες εφαρμογές. Συνεπώς, το κριτήριο αστοχίας είναι σαν ένα κριτήριο ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης που πρέπει να καλιμπραριστεί από πείραμα διαξονικού εφελκυσμού. Επεξηγηματικά, η τιμή της κρίσιμης παραμόρφωσης αστοχίας για η=0.6 είναι αυτή που παίζει καθοριστικό ρόλο στην έναρξη του Damage Evolution. Από τον Πίνακας 4-1, φαίνεται, ότι για η=0 η κρίσιμη παραμόρφωση είναι 0.2238 και από το Σχήμα 4-60α μετράται ότι το Damage Initiation γίνεται για παραμόρφωση του στοιχείου ίση με 0.237. Αποδεικνύεται, λοιπόν, ότι η διαφορά των δύο τιμών, που οφείλεται στη χρονική ιστορία της τριαξονικότητας, είναι σχετικά μικρή.

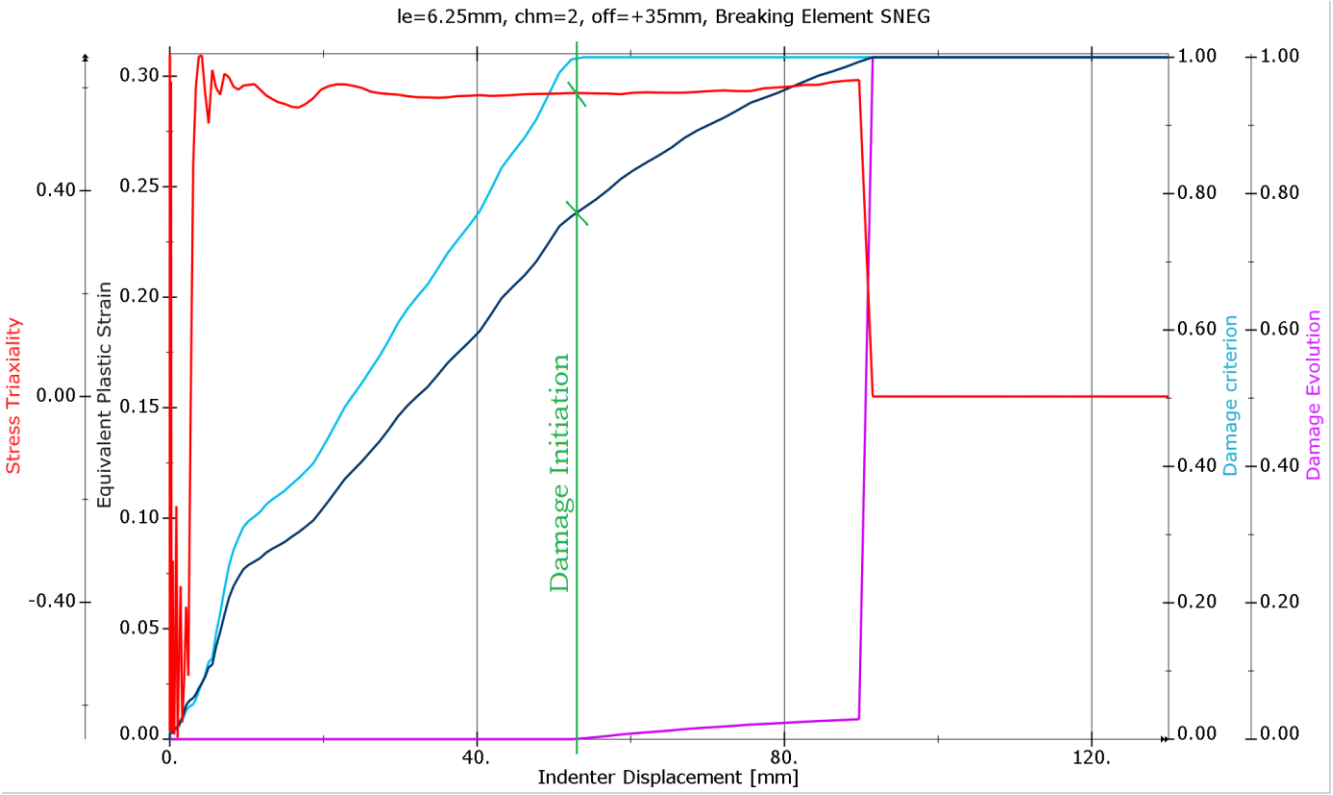
Όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, στα αριθμητικά μοντέλα, που κατασκευάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, η καμπύλη ισοδύναμης παραμόρφωσης – τριαξονικότητας του κριτηρίου αστοχίας είναι φθίνουσα στην περιοχή η≥1/3 και σταθερή για η≤1/3. Στα πλαίσια ελέγχου ευαισθησίας των αποτελεσμάτων στη μεταβολή της κρίσιμης πλαστικής παραμόρφωσης αστοχίας, στη θλιπτική περιοχή, έγιναν και προσομοιώσεις με την εισαγωγή μίας τιμής αποκοπής στο κριτήριο αστοχίας (cut-off value). Όπως έχει αποδειχθεί, από πειραματικά αποτελέσματα (Σχήμα 2-20), για τριαξονικότητες η<-1/3 δεν παρατηρείται θραύση του υλικού. Στο κριτήριο αστοχίας, αυτό μπορεί να μεταφραστεί ως ραγδαία αύξηση της τιμής της κρίσιμης πλαστικής παραμόρφωσης, σε αυτήν την περιοχή, ώστε το ολοκλήρωμα της Εξ. 3-48, ω_D, να μένει ανεπηρέαστο, όσο η τριαξονικότητα είναι μικρότερη του -1/3. Στον Πίνακας 4-7, φαίνεται πως θα μπορούσε να τροποποιηθεί η είσοδος στο Ductile Damage του ABAQUS, σε σχέση με τον Πίνακας 4-1, ώστε να αγνοηθεί η περιοχή η<-1/3, κατά την συσσώρευση ζημιάς στο πεπερασμένο στοιχείο. Στο Σχήμα 4-61, φαίνονται τα τροποποιημένα διαγράμματα του Σχήμα 4-60 (1FB, le=6.25mm, chm=2, offset=+35mm), όταν έχει καθοριστεί η τιμή αποκοπής στο κριτήριο αστοχίας του μοντέλου υλικού.

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα, όσο η τριαξονικότητα είναι μικρότερη του $-1/3$, η γαλάζια καμπύλη, «Damage Criterion» (ω_D), δεν ανέρχεται, οπότε η «συσσώρευση ζημιάς» διακόπτεται προσωρινά, σε αντίθεση με αυτά που παρατηρούνται στο Σχήμα 4-60. Φαίνεται, ότι η θραύση των ινών καθυστερεί κατάτι όταν χρησιμοποιείται τιμή αποκοπής – κάτι που είναι λίγο πιο εμφανές από τη συγκριτική παρατήρηση των διαγραμμάτων για την θλιπτική/πάνω ίνα. Αναμένεται, λοιπόν, η προβλεπόμενη αντοχή του ενισχυμένου ελάσματος του αριθμητικού μοντέλου να αυξηθεί, αφού πλέον, μόνο τα χρονικά παράθυρα με η>-1/3 συνεισφέρουν στην αύξηση του ω_D. Αυτό αποδεικνύεται, με τη σύγκριση των καμπυλών απόκρισης των δύο μοντέλων, που γίνεται στο Σχήμα 4-62. Στα Σχήματα Σχήμα 4-62 έως Σχήμα 4-64, αναπαρίσταται διαγραμματικά η επίδραση της εισαγωγής της τιμής αποκοπής στην καμπύλη απόκρισης κάποιων ακόμη αριθμητικών μοντέλων, τα οποία αποδίδουν με ακρίβεια τη συμπεριφορά του ενισχυμένου ελάσματος του πειράματος. Η αύξηση της αντοχής είναι υπαρκτή, αλλά σχετικά περιορισμένη (<30 kN), γεγονός που επικυρώνει την εστίαση της παρούσας δουλειάς στην περιοχή τριαξονικότητας 1/3<η<2/3. Η μορφή αστοχίας, που προβλέπεται από κάθε αριθμητικό μοντέλο, είναι η ίδια, είτε χρησιμοποιηθεί τιμή αποκοπής, είτε όχι.

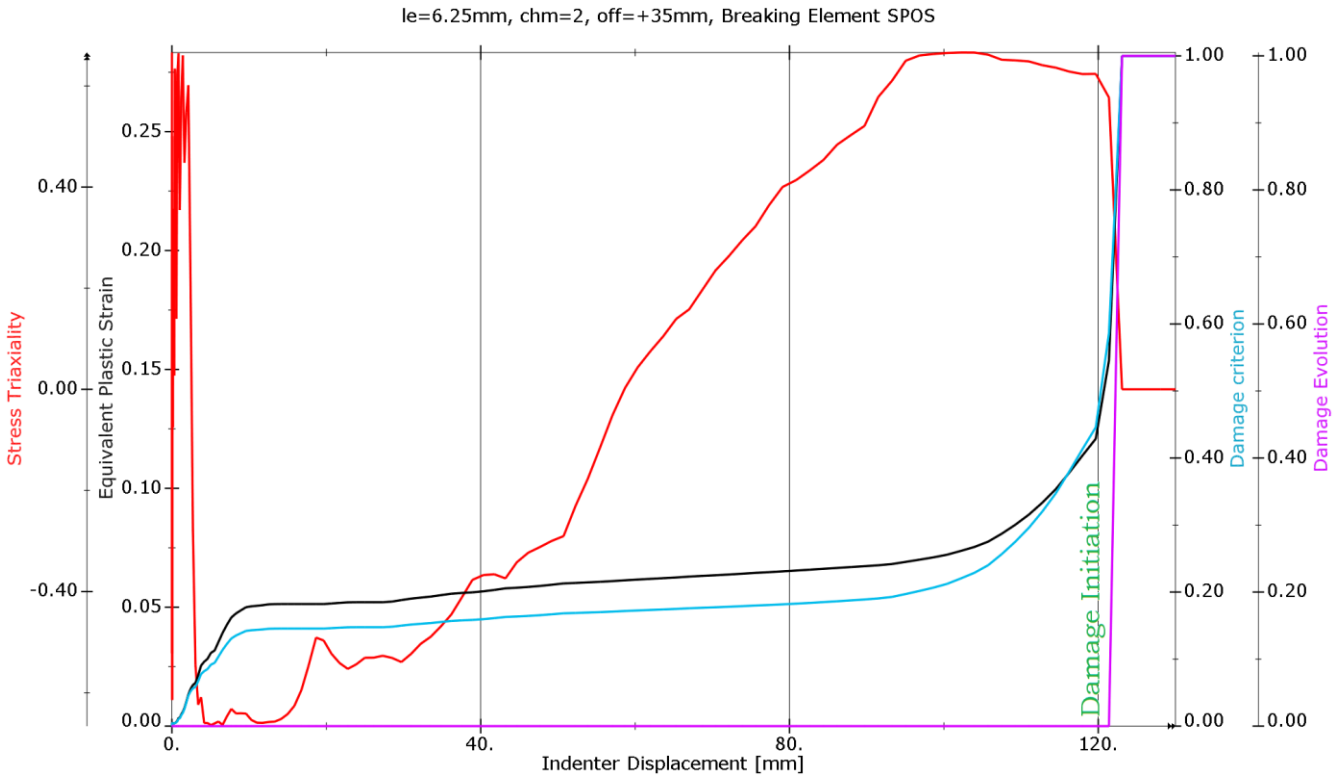
Η καλή απόδοση του κριτηρίου αστοχίας χωρίς τιμή αποκοπής μπορεί να αιτιολογηθεί με την παρατήρηση της Εξ. 3-46, που περιγράφει τη συνθήκη αστοχίας, σε συνδυασμό με το Σχήμα 4-60β. Όταν η τριαξονικότητα είναι κάτω από -1/3, η αύξηση της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης, $\Delta\varepsilon_{eq}^{pl} \approx 0.06 - 0.04 = 0.02$, είναι πολύ μικρή, σε σχέση με την κρίσιμη τιμή που έχει οριστεί γι' αυτήν την περιοχή, $\varepsilon_{eq,fr}^{pl}(\eta \leq 1/3) = 0.3815$. Συνεπώς, το $\Delta\omega_D$ σε αυτήν την περιοχή (άνοδος της γαλάζιας καμπύλης, Damage Criterion) είναι, ούτως η άλλως, αρκετά μικρό, και δεν επιδρά σημαντικά στην έλευση της αστοχίας. Σε άλλες εφαρμογές, όπου η ισοδύναμη παραμόρφωση θα σημειώνει σημαντική αύξηση, σε σχέση με την κρίσιμη τιμή της, υπό θλιπτικά φορτία, η συμπερίληψη της τιμής αποκοπής θα επηρεάζει ουσιαστικά τα αποτελέσματα.

Πίνακας 4-7: Προσθήκη τιμής αποκοπής στο κριτήριο αστοχίας, μέσω της υπερβολικής αύξησης της κρίσιμης πλαστικής παραμόρφωσης αστοχίας, στην περιοχή της μονοαξονικής θλίψης. Ενδεικτικά, ο πίνακας που εισάγεται στο Ductile Damage του ABAQUS, για το μοντέλο υλικού που αντιστοιχεί σε le=6.25mm

Ductile Damage, με chm=1.5 και τιμή αποκοπής στο η=-1/3		
le [mm]	**6.25**	
Έλασμα	**Πλάκα**	**FB**
η		
-1/3	**10**	**10**
-0.3	0.3815	0.2600
1/3	**0.3815**	**0.2600**
0.4	0.3339	0.2275
0.5	0.2734	0.1863
0.6	0.2238	0.1525
0.7	0.1832	0.1249
0.8	0.1500	0.1022
0.9	0.1228	0.0837
1	0.1006	0.0685

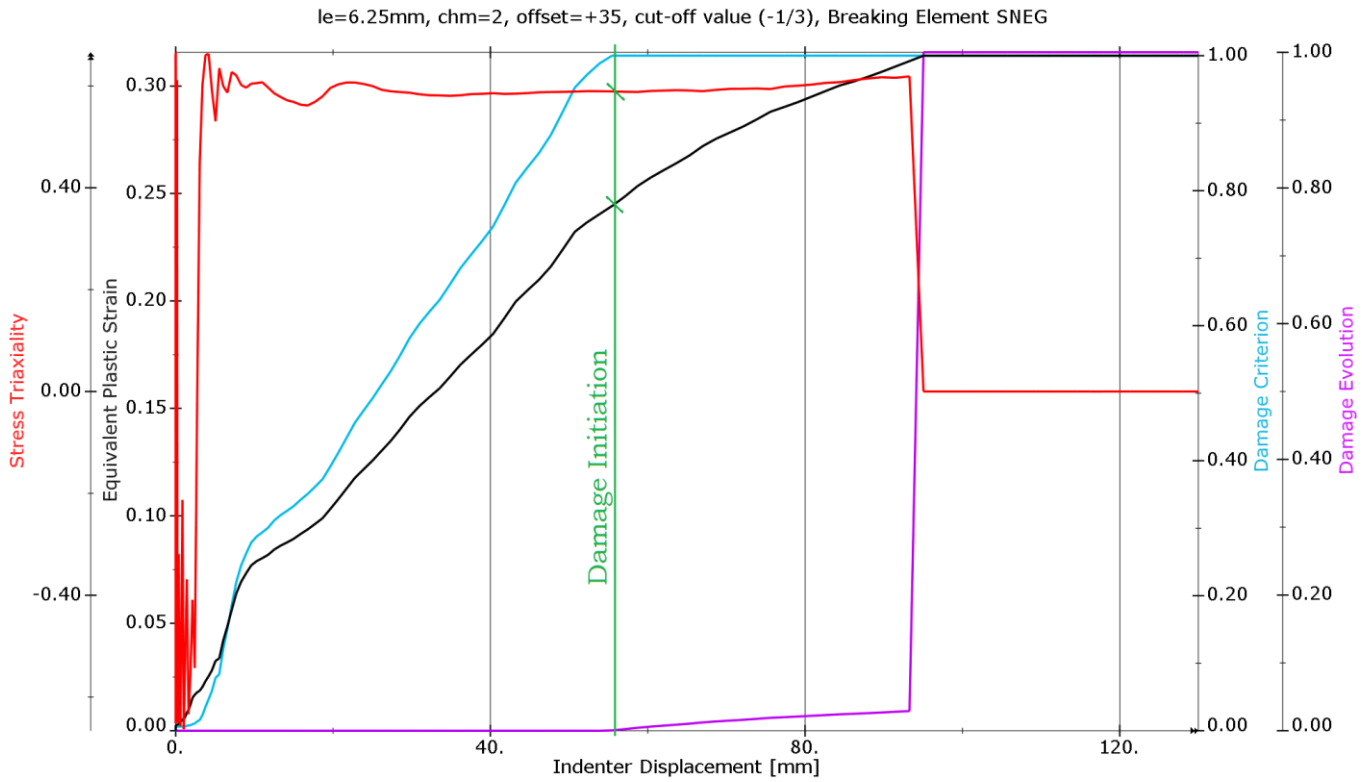


(α)

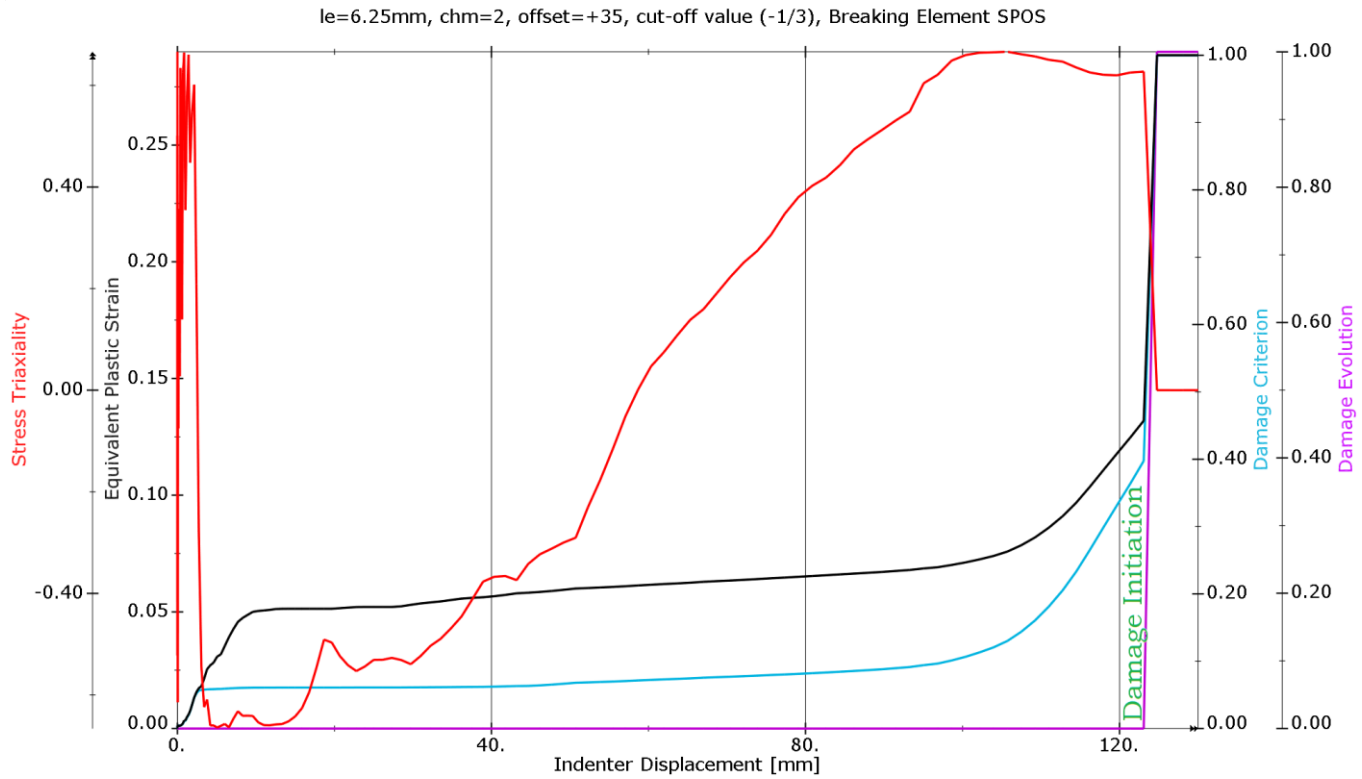


(β)

Σχήμα 4-60: Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση, τριαξονικότητα των τάσεων, κρίσιμη παράμετρος αστοχίας (Damage Criterion) και Damage Degradation συναρτήσει της κατακόρυφης μετατόπισης του διεισδυτή (Indenter Displacement), στην εφελκυστική (α) και θλιπτική (β) ίνα του πεπερασμένου στοιχείου που ξεκινά η θραύση, στο αριθμητικό μοντέλο 1FB, le=6.25mm, chm=2, offset=+35mm. Εκκίνηση αστοχίας, όταν το Damage Degradation αρχίζει να λαμβάνει θετικές τιμές.

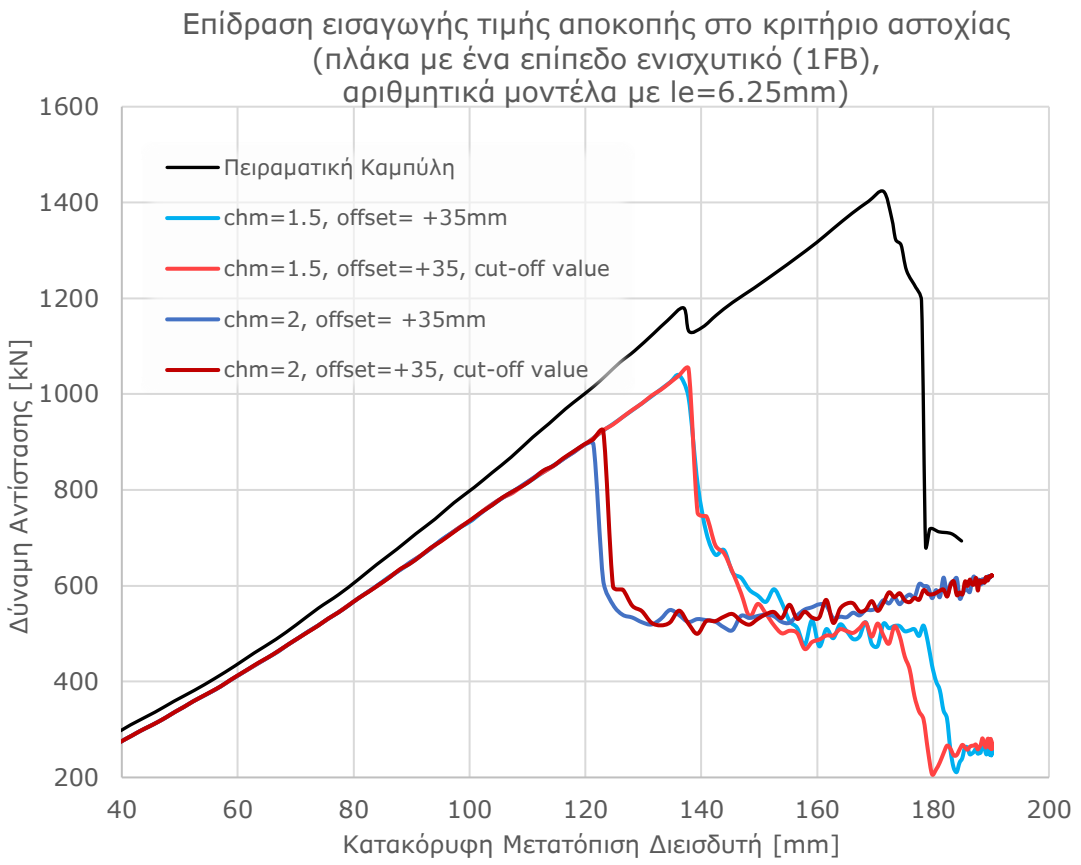


(α)

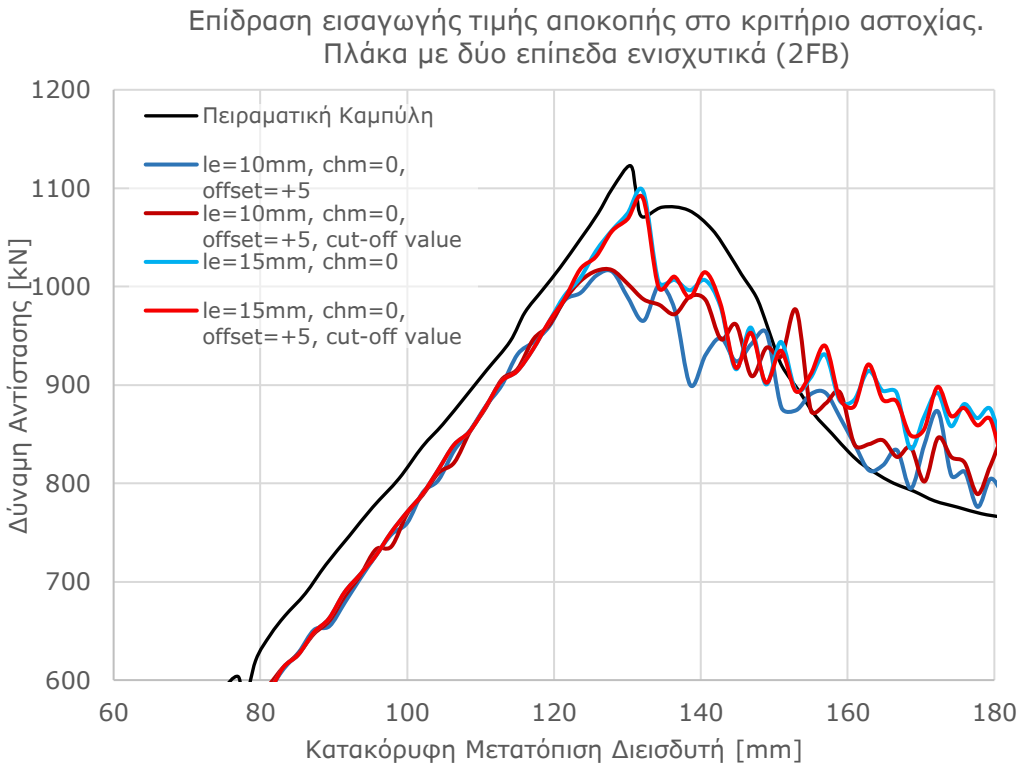


(β)

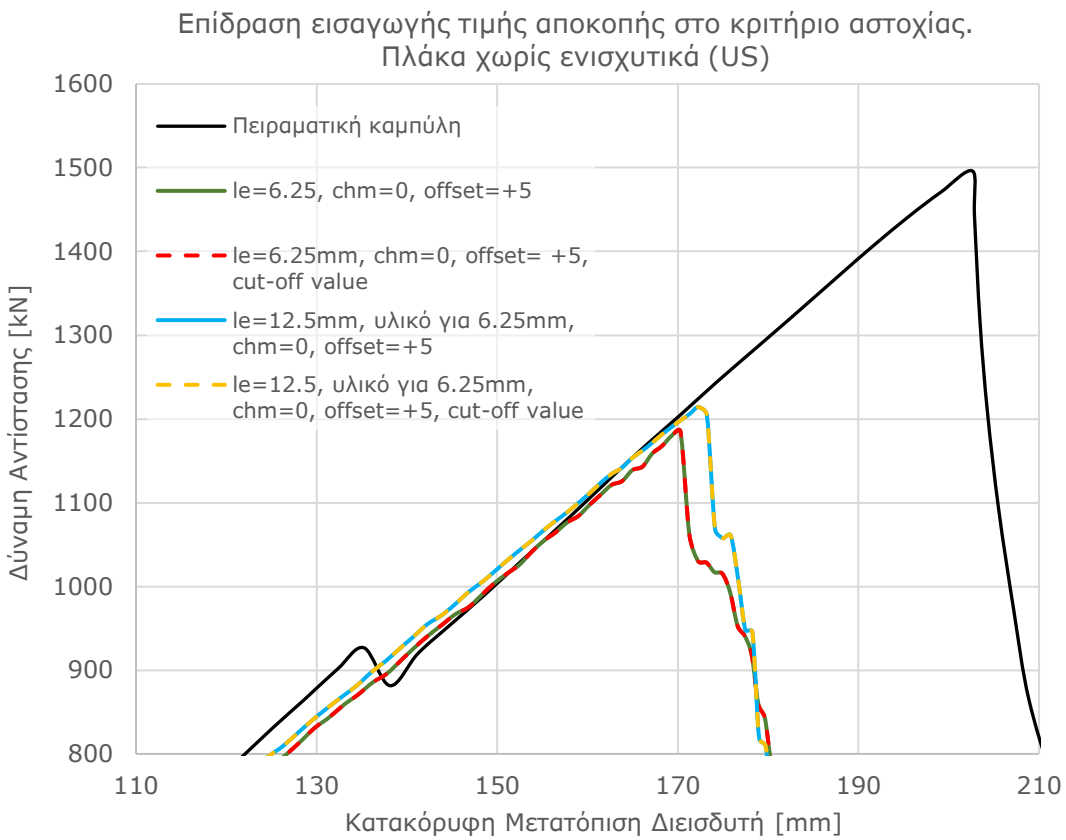
Σχήμα 4-61: Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση, τριαξονικότητα των τάσεων, κρίσιμη παράμετρος αστοχίας (Damage Criterion) και Damage Degradation συναρτήσει της κατακόρυφης μετατόπισης του διεισδυτή (Displacement), στην εφελκυστική (α) και θλιπτική (β) ίνα του πεπερασμένου στοιχείου που ξεκινά η θραύση, στο αριθμητικό μοντέλο 1FB, le=6.25mm, chm=2, offset=+35mm με εισαγωγή της τιμής αποκοπής στο κριτήριο αστοχίας.



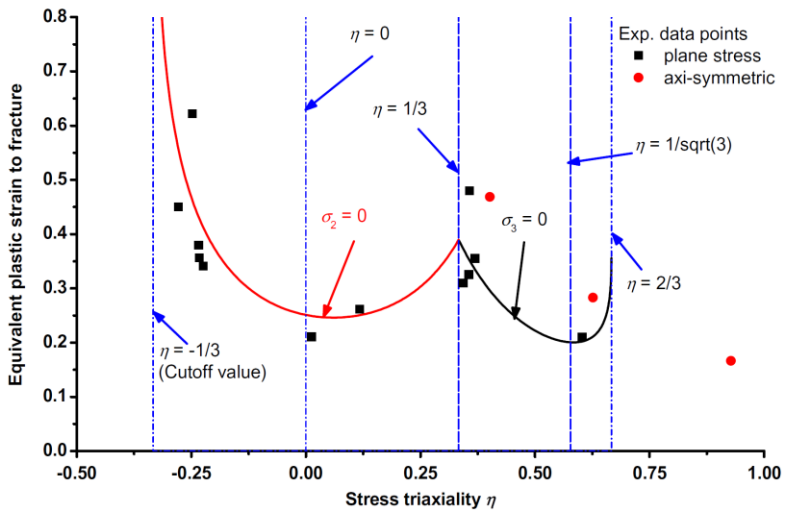
Σχήμα 4-62: Επίδραση εισαγωγής της τιμής αποκοπής, στο κριτήριο αστοχίας, στα αποτελέσματα της προσομοίωσης 1FB, le=6.25mm, chm=2, offset=+35mm και le=6.25mm, chm=1.5, offset=+35mm



Σχήμα 4-63: Επίδραση εισαγωγής της τιμής αποκοπής, στο κριτήριο αστοχίας, στα αποτελέσματα της προσομοίωσης 2FB, le=10mm, chm=0, offset=+5mm και le=15mm, chm=0, offset=+5mm



Σχήμα 4-64: Επίδραση εισαγωγής της τιμής αποκοπής, στο κριτήριο αστοχίας, στα αποτελέσματα της προσομοίωσης US, le=6.25mm, chm=0, offset=+5mm και le=12.5mm, με μοντέλο υλικού για 6.25mm, chm=0, offset=+5mm



Σχήμα 4-65: Πειραματικά αποτελέσματα κρίσιμης παραμόρφωσης – τριαξονικότητας για Al 2024-T351 των Lou και Huh [33]

Από τους Πίνακες Πίνακας 4-4, Πίνακας 4-5 και Πίνακας 4-6 παρατηρήθηκε, ότι η καμπύλη απόκρισης των αριθμητικών μοντέλων ήταν πιο κοντά στην πειραματική για c_{hm}=0 ($\varepsilon_{cr}(\eta)= \varepsilon_{cr}(1/3)$=const., Σχήμα 4-44). Δεδομένου αυτού και του ότι η θραύση συμβαίνει υπό συνθήκες διαξονικού εφελκυσμού (η~2/3), δίνεται μια ένδειξη ότι η

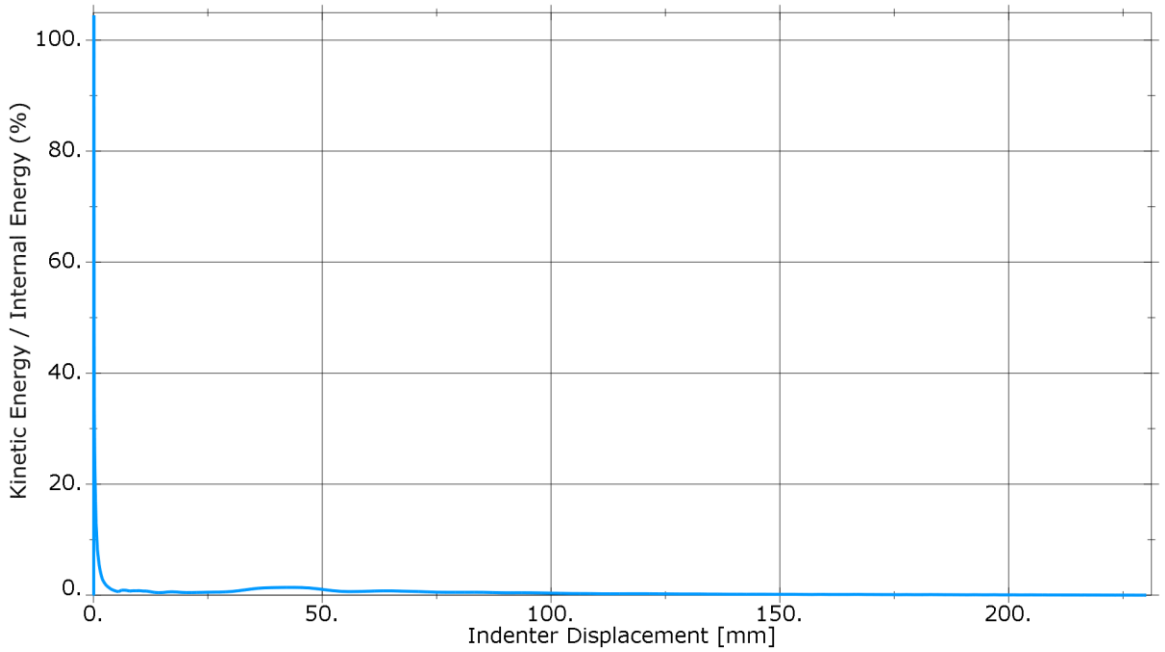
κρίσιμη παραμόρφωση θραύσης σε αυτές τις συνθήκες, για τα συγκεκριμένα υλικά, είναι παρόμοια με την κρίσιμη παραμόρφωση θραύσης σε συνθήκες μονοαξονικού εφελκυσμού. Στο Σχήμα 4-65, με βάση κάποια πειραματικά αποτελέσματα, οι Lou και Huh σχηματίζουν την καμπύλη παραμόρφωσης θραύσης – τριαξονικότητας, η οποία φαίνεται να έχει ανοδική πορεία στην περιοχή $0.6<\eta<0.66$ [33]. Οι Bao και Wierzbicki είχαν καταλήξει σε διαφορετική πειραματική καμπύλη, για το ίδιο υλικό, η οποία ήταν φθίνουσα στην ίδια περιοχή [16]. Σε κάθε περίπτωση, η συμπεριφορά σε διάφορες συνθήκες τριαξονικότητας, μπορεί να προσδιοριστεί μετά από πειραματικές δοκιμές, για το εκάστοτε υλικό που μοντελοποιείται. Το κριτήριο Rice-Tracey υποεκτιμά την αντοχή των συγκεκριμένων ελασμάτων, ίσως γιατί θεωρεί εσφαλμένα, ότι η καμπύλη παραμόρφωσης θραύσης – τριαξονικότητας είναι φθίνουσα σε όλο το εύρος τριαξονικότητας. Από το Σχήμα 4-44, φαίνεται ότι υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες $\varepsilon_{cr}(1/3)\sim \varepsilon_{cr}(2/3)$. Αυτός είναι, ενδεχομένως, ο λόγος, για τον οποίον η επιλογή $c_{hm}=0$ έδωσε καλύτερες εκτιμήσεις για την αντοχή των ελασμάτων.

Έλεγχος υπόθεσης ψευδοστατικότητας

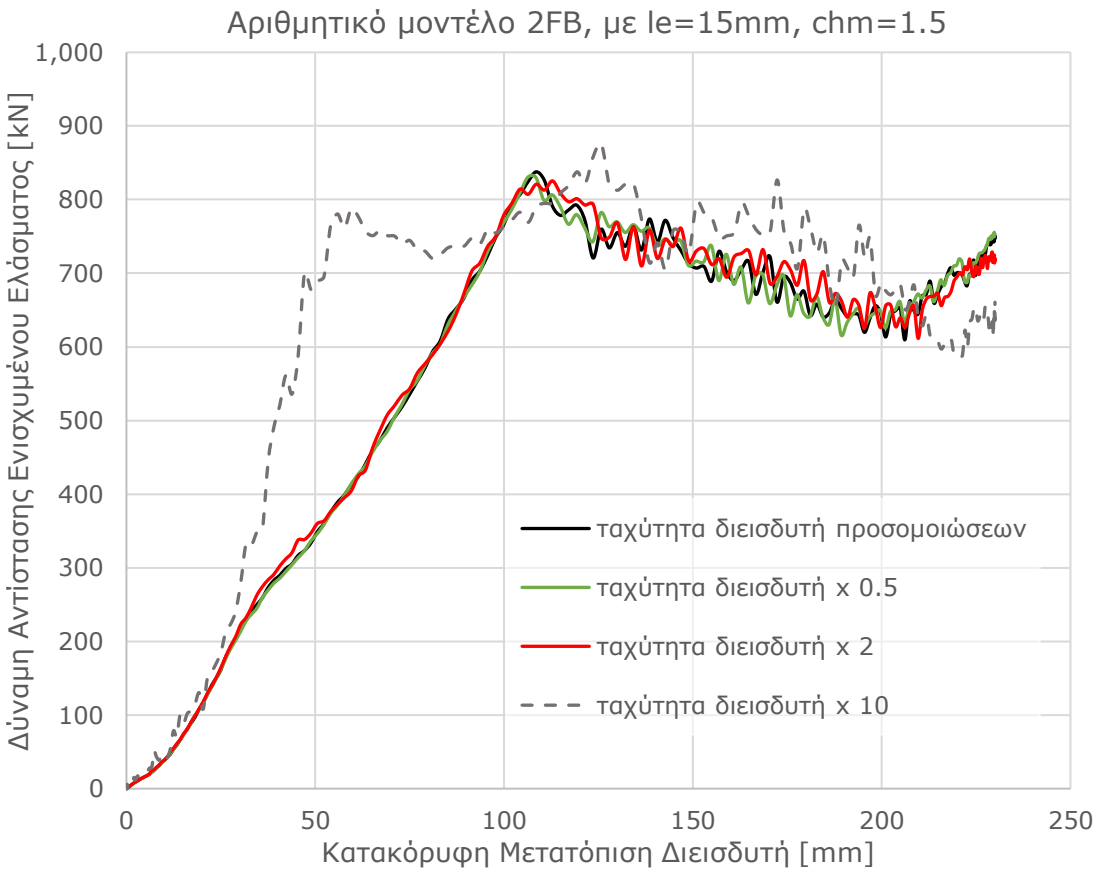
Το πρόβλημα που επιλύεται στην παρούσα εργασία είναι ένα καθαρά δυναμικό πρόβλημα, το οποίο, όμως, προσεγγίζεται με στατικό τρόπο, αφού οι αδρανειακές δυνάμεις θεωρούνται αμελητέες στην επίλυση των εξισώσεων δυναμικής ισορροπίας.

Η λύση ενός στατικού προβλήματος, είναι εξ ορισμού μία λύση μεγάλου χρονικού διαστήματος. Με την αντιμετώπιση του προβλήματος ως ψευδοστατικό, η διαδικασία δεν προσομοιώνεται στη φυσική χρονική της κλίμακα, αλλά επιταχύνεται, για λόγους οικονομίας υπολογιστικού χρόνου [20]. Στο παρόν πρόβλημα, ο ρυθμός επιβολής του φορτίου είναι ανάλογος με την ταχύτητα του διεισδυτή, η οποία κατά την εκτέλεση του πειράματος ήταν 10mm/min. Στις προσομοιώσεις των πειραμάτων κρούσης, η ταχύτητα του διεισδυτή καθορίζεται εμμέσως, ως ο λόγος της συνολικής κατακόρυφης μετατόπισης του διεισδυτή, εντός του Step, με τη χρονική διάρκεια του Step. Όπως αναφέρθηκε στο εδάφιο 4.3.1, η μετατόπιση του διεισδυτή ορίζεται με μεταβαλλόμενη οριακή συνθήκη στο άκρο του. Η χρονική διάρκεια του Dynamic, Explicit Step τέθηκε ίση με 0.1 sec, δηλαδή η διαδικασία επιταχύνθηκε περίπου 10^4 φορές.

Ο έλεγχος της υπόθεσης της ψευδοστατικότητας γίνεται με τη σύγκριση της κινητικής με την εσωτερική ενέργεια του ενισχυμένου ελάσματος του αριθμητικού μοντέλου. Συνηθίζεται, ένα πρόβλημα να θεωρείται ψευδοστατικό, όταν η κινητική ενέργεια είναι μικρότερη του 5% της εσωτερικής ενέργειας [23]. Στο Σχήμα 4-66, αναπαρίσταται η κινητική ενέργεια ως ποσοστό της εσωτερικής ενέργειας, κατά τη διάρκεια της φόρτισης του ελάσματος, για το αριθμητικό μοντέλο 2FB, l_e=10mm, c_{hm}=1.5, ενδεικτικά - παρόμοιος έλεγχος έγινε σε όλες τις προσομοιώσεις. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα αυτό, μετά από μία αρχική κορύφωση της καμπύλης, που οφείλεται στο ότι το μοντέλο δεν έχει προλάβει να αποθηκεύσει ενέργεια παραμόρφωσης, η κινητική ενέργεια παραμένει χαμηλότερη του 2% της εσωτερικής ενέργειας παραμόρφωσης, σε όλη τη διάρκεια του πειράματος.



Σχήμα 4-66: Κινητική ενέργεια μοντέλου ως ποσοστό της εσωτερικής ενέργειας, κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, ως συνάρτηση της μετατόπισης του διεισδυτή. Το διάγραμμα παράχθηκε για το αριθμητικό μοντέλο 2FB, le=10mm, chm=1.5.



Σχήμα 4-67: Μεταβολή της προβλεπόμενης απόκρισης του αριθμητικού μοντέλου του ενισχυμένου ελάσματος στην εγκάρσια φόρτιση, για διαφορετικές ταχύτητες διεισδυτή. Αποτελέσματα για το μοντέλο 2FB, le=15mm, chm=1.5

Για να δοκιμαστεί εάν η λύση είναι ευσταθής, όσον αφορά την ταχύτητα που επιλέχθηκε, ελέγχθηκε η ευαισθησία του αποτελέσματος σε μικρές μεταβολές της ταχύτητας του διεισδυτή. Στο Σχήμα 4-67, συγκρίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης 2FB με le=15mm, chm=1.5, όταν η διάρκεια του βήματος (step) τίθεται 0.05 και 0.2 sec, δηλαδή ταχύτητα διεισδυτή διπλάσια και υποδιπλάσια αυτής με την οποία έγιναν οι προσομοιώσεις. Στο ίδιο σχήμα, φαίνεται η απόκλιση των αποτελεσμάτων, όταν η ταχύτητα του διεισδυτή αυξηθεί υπερβολικά (δεκαπλασιαστεί).

Η διατήρηση της κινητικής ενέργειας του μοντέλου σε χαμηλά επίπεδα και η ευστάθεια της λύσης με μικρές μεταβολές της ταχύτητας καταδεικνύουν, ότι η θεώρηση του ψευδοστατικού προβλήματος, είναι αποδεκτή.

Επιδόσεις αριθμητικών μοντέλων παρούσας εργασίας

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των πειραμάτων κρούσης των Alsos και Amdahl, από τους ερευνητές της βιβλιογραφίας, φαίνεται ότι ενώ η καμπύλη απόκρισης του φυσικού μοντέλου έχει προβλεφθεί με ικανοποιητική ακρίβεια, η μορφή αστοχίας είναι μη ρεαλιστική. Από τους Πίνακες Πίνακας 4-4 και Πίνακας 4-5, φαίνεται ότι, τις περισσότερες φορές, τα αριθμητικά μοντέλα που πετυχαίνουν το μικρότερο σφάλμα όσον αφορά τη μέγιστη δύναμη, δεν παρουσιάζουν τη μορφή της ρωγμής του πειράματος. Το ερώτημα που τίθεται στην παρούσα διπλωματική είναι το εξής: Κρίνεται αποδεκτή η αριθμητική μοντελοποίηση που προβλέπει επαρκώς την μέγιστη αντοχή αλλά όχι την μορφή αστοχίας; Πώς θεωρείται ότι περιγράφεται ικανοποιητικά η συμπεριφορά της κατασκευής, όταν μετά τη θραύση η γεωμετρία του φυσικού και του αριθμητικού μοντέλου είναι διαφορετική; Ακόμη, όπως αποδείχθηκε, η εναπομείνουσα αντοχή της κατασκευής επηρεάζεται σημαντικά από τη μορφή της ρωγμής. Στην παρούσα διπλωματική, δόθηκε μεγάλη σημασία στην εύρεση των παραμέτρων που οδηγούν στην καλύτερη δυνατή αποτύπωση της μορφής αστοχίας και, συγχρόνως, της καμπύλης δύναμης αντίστασης συναρτήσει της μετατόπισης του διεισδυτή. Τα αριθμητικά μοντέλα που έχουν την καλύτερη συμπεριφορά, με βάση αυτά τα κριτήρια, είναι τα εξής:

- ✓ US: l_e=6.25mm, c_{hm}=0, offset=+5mm
  Fmax μοντέλου / Fmax πειράματος = 79.23%
  Μορφή αστοχίας : ακριβής
- ✓ 1FB: l_e=6.25mm, c_{hm}=1.5, offset=-35mm
  Fmax μοντέλου / Fmax πειράματος = 74.20%
  Μορφή αστοχίας : σχεδόν ακριβής (το ενισχυτικό λύγισε προς την αντίθετη πλευρά από αυτήν την ρωγμής)
- ✓ 1FB: l_e=6.25mm, c_{hm}=2, offset=+35mm
  Fmax μοντέλου / Fmax πειράματος = 62.93%
  Μορφή αστοχίας : ακριβής
- ✓ 2FB: le=15mm, chm=0, offset=+5mm
  Fmax μοντέλου / Fmax πειράματος = 97.68%

Μορφή αστοχίας : σχεδόν ακριβής (έναρξη ρωγμής στο σημείο που απέχει όσο δύο χαρακτηριστικά μήκη στοιχείου από την ένωση πλάκας ενισχυτικού)

- ✓ 2FB: le=10mm, chm=0, offset=+5mm
  Fmax μοντέλου / Fmax πειράματος = 90.40%
  Μορφή αστοχίας : ακριβής

Τα αποτελέσματα αυτά είναι εφάμιλλα με αυτά των ερευνητών της βιβλιογραφίας, οι οποίοι, μάλιστα, χρησιμοποίησαν πιο περίπλοκες μεθόδους μοντελοποίησης του υλικού και συνέγραψαν υπολογιστική υπορουτίνα που συνοδεύει το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Επίσης, στα αριθμητικά μοντέλα που κατασκευάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, δεν αντιμετωπίστηκαν ξεχωριστά οι περιοχές που γειτνιάζουν σε γεωμετρικές ασυνέχειες. Όπως έχει αναφερθεί, κάποιοι ερευνητές επιλέγουν να προσαρμόσουν την κρίσιμη παραμόρφωση θραύσης σε περιοχές που αναμένεται η τοπική εκλέπτυνση της διατομής. Αυτή η τεχνική μπορεί να είναι ασφαλής, όταν μοντελοποιούνται πειράματα, οπότε οι περιοχές θραύσης μπορούν να παρατηρηθούν μακροσκοπικά (βλ. εδάφιο 4.2.1), όμως πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή όταν δεν υπάρχει αυτή η δυνατότητα.

<u>Υπολογιστικό κόστος προσομοιώσεων</u>

Καταληκτικά, σχολιάζεται το υπολογιστικό κόστος της προσομοίωσης στο λογισμικό ABAQUS/CAE με άμεση (explicit) μέθοδο χρονικής διακριτοποίησης. Στον Πίνακας 4-8 παρουσιάζονται κάποια μεγέθη και αναλογίες που αφορούν στον υπολογιστικό χρόνο σε σχέση με το χαρακτηριστικό μέγεθος του στοιχείου που χρησιμοποιείται στο ενισχυμένο έλασμα, ενδεικτικά για τις προσομοιώσεις 2FB, της ομάδας Ι. Στο Σχήμα 4-68, ο απαραίτητος χρόνος CPU φαίνεται διαγραμματικά συναρτήσει του χαρακτηριστικού μεγέθους του στοιχείου και του αριθμού των σημείων ολοκλήρωσης. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, ο υπολογιστικός χρόνος μειώνεται με την αύξηση του μεγέθους του στοιχείου και τη μείωση των σημείων ολοκλήρωσης. Συγκρίνοντας τον Πίνακας 4-8 με τον Πίνακας 3-4, που αφορούσε προσομοιώσεις με την έμμεση μέθοδο διακριτοποίησης, παρατηρείται ότι:

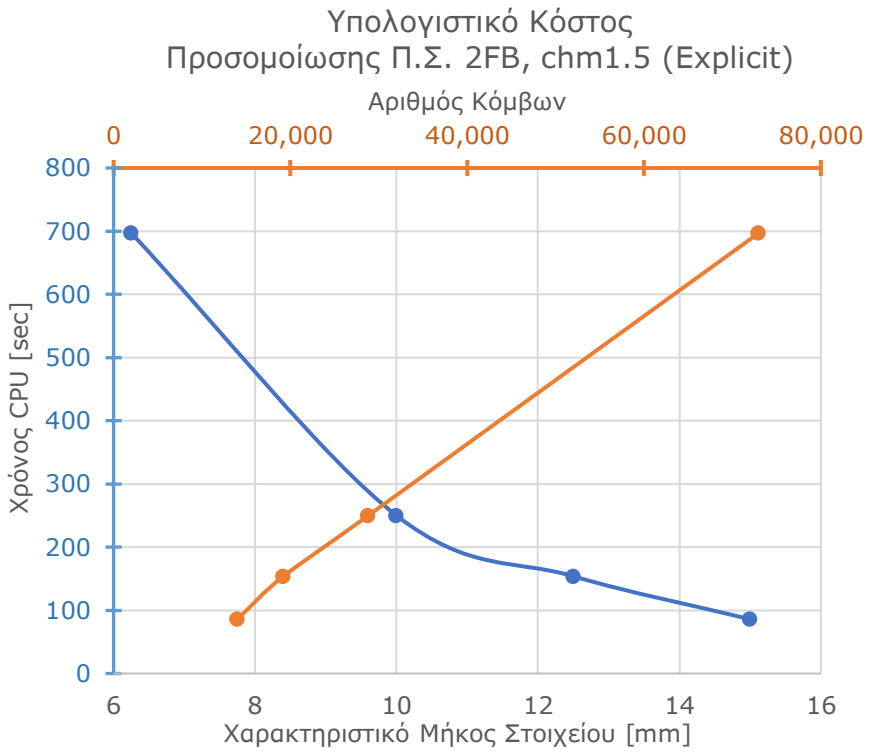
- Στην άμεση μέθοδο, ο αριθμός των χρονικών βημάτων, που ορίζεται αυτόματα από το πρόγραμμα, μειώνεται με την μείωση των σημείων ολοκλήρωσης στο μοντέλο, ενώ στην έμμεση μέθοδο, ο αριθμός βημάτων είναι ανεξάρτητος από την χωρική διακριτοποίηση.
- Η διάρκεια κάθε χρονικού βήματος (χρόνος CPU/ βήμα) είναι μία τάξη μεγέθους μικρότερη από αυτή της έμμεσης μεθόδου και μειώνεται με την μείωση των σημείων ολοκλήρωσης.
- Ο υπολογιστικός χρόνος που αφιερώνεται σε κάθε σημείο ολοκλήρωσης, σε κάθε χρονικό βήμα, είναι σταθερός, σε αντίθεση με την έμμεση μέθοδο, όπου είναι αυξανόμενος με την αύξηση του μεγέθους του στοιχείου.

Οι διαφορές αυτές οφείλονται στο ότι, όταν χρησιμοποιείται άμεση μέθοδος διακριτοποίησης, ο αριθμός των βημάτων έχει να κάνει με τη σταθερότητα του

προβλήματος και πρέπει να αυξάνεται με την πύκνωση του πλέγματος. Στην έμμεση μέθοδο, το χρονικό βήμα δεν περιορίζεται από την χωρική διακριτοποίηση και η τιμή του εξαρτάται από την επιθυμητή ακρίβεια στα αποτελέσματα.

Πίνακας 4-8: Υπολογιστικό κόστος προσομοίωσης πειράματος 2FB, ανάλογα με το χαρακτηριστικό μέγεθος στοιχείου που χρησιμοποιείται στο αριθμητικό μοντέλο του ενισχυμένου ελάσματος

Μοντέλο	**le [mm]**	**Χρόνος CPU [sec]**	**# Χρονικά Βήματα**	**# Σημεία Ολοκλ/σης (ΣΟ)**	**Χρόνος CPU/ Βήμα [sec]**	**Χρόνος CPU/ ΣΟ [sec]**	**Χρόνος CPU / Βήμα/ ΣΟ [sec]**
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]=[2]/[3]	[7]=[2]/[4]	[6]=[5]/[4]
2FB chm=1.5 (Explicit)	**6.25**	697	89091	72960	7.82E-03	9.55E-03	1.07E-07
	10	250	81969	28800	3.05E-03	8.68E-03	1.06E-07
	12.5	154	81064	19200	1.90E-03	8.02E-03	9.89E-08
	15	86	58577	14000	1.47E-03	6.14E-03	1.05E-07



Σχήμα 4-68: Υπολογιστικός χρόνος ανάλογα με την πυκνότητα πλέγματος για την προσομοίωση του πειράματος 2FB.

Κεφάλαιο 5ο

Επισκόπηση, συμπεράσματα, προτάσεις

Κεφάλαιο 5 : Επισκόπηση, συμπεράσματα, προτάσεις

5.1 Επισκόπηση

Η παρούσα διπλωματική εργασία στόχευσε στην εύρεση μίας σχετικά απλής αλλά αποτελεσματικής διαδικασίας για τη μοντελοποίηση και πρόβλεψη της συμπεριφοράς ενισχυμένων ελασμάτων στην εγκάρσια φόρτισή τους, συμπεριλαμβανομένης και της θραύσης. Προσομοιάζονται, με αριθμητική μέθοδο, τρία πειράματα που εκτελέστηκαν το 2009 από τους Alsos και Amdahl [7] και τα οποία περιλαμβάνουν τη διάτρηση διάφορων διαμορφώσεων ενισχυμένων ελασμάτων από έναν κατακόρυφα κινούμενο άκαμπτο κωνοειδή διεισδυτή. Συγκεκριμένα, το έλασμα της πειραματικής διάταξης έχει λόγο αναλογίας 5/3, ενισχύεται με κανένα, ένα ή δύο επίπεδα διαμήκη ενισχυτικά και συγκολλάται περιμετρικά σε άκαμπτο πλαίσιο από κοιλοδοκούς. Η διάταξη των πειραματικών κομματιών και ο τρόπος σύγκρουσής τους παραπέμπει στην προσάραξη τμήματος του πυθμένα ενός πλοίου (μεταξύ εδρών και σταθμίδων), κατακόρυφα, σε έναν υποθαλάσσιο βράχο, λόγω παλίρροιας. Ωστόσο, τα κατασκευαστικά στοιχεία θα μπορούσαν, ακόμη, να αντιπροσωπεύουν το πλευρικό τοίχωμα ενός πλοίου και τη διαμόρφωση του βολβού, ενός συγκρουόμενου, με αυτό, πλοίου. Σε κάθε περίπτωση, μελετάται η απόκριση της κατασκευής σε ακραία φορτία και αναζητούνται οι παράμετροι της μοντελοποίησης, οι οποίες οδηγούν στη ρεαλιστική απόδοσή της. Αποτελεσματικά κρίνονται τα αριθμητικά μοντέλα, τα οποία καταφέρνουν να προβλέψουν τόσο τη μέγιστη δύναμη αντίστασης, που προβάλλει η κατασκευή, αλλά και την τελική μορφή και έκταση της ρωγμής. Η καμπύλη απόκρισης της κατασκευής σχετίζεται με τη συνολική ενέργεια που μπορεί αυτή να απορροφήσει σε περίπτωση κρούσης, ενώ η θέση και έκταση της ρωγμής επιδρά στην μέγιστη εναπομείνουσα αντοχή, την ευστάθεια και την εκροή φορτίου, αν το ενισχυμένο έλασμα είναι τμήμα της μεταλλικής κατασκευής ενός πλοίου.

Η μοντελοποίηση έγινε με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και την αξιοποίηση του λογισμικού ABAQUS. Επειδή τα ενισχυμένα ελάσματα των πειραμάτων είναι λεπτότοιχες κατασκευές, η μοντελοποίηση έγινε με πεπερασμένα στοιχεία κελύφους, που είναι μία υπέρθεση στοιχείων μεμβράνης και καμπτώμενων στοιχείων πλάκας. Δόθηκε ιδιαίτερη βάση στην κατασκευή του μοντέλου του υλικού, το οποίο αποτελείται από την καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης (που προκύπτει από το μονοαξονικό εφελκυσμό) και το κριτήριο θραύσης, το οποίο καθορίζει υπό ποιες τοπικές εντατικές/ παραμορφωσιακές καταστάσεις δημιουργείται ρηγμάτωση. Ελέγχθηκε ο τρόπος με τον οποίον επηρεάζουν τα αποτελέσματα: το χαρακτηριστικό μέγεθος του πεπερασμένου στοιχείου, η ρύθμιση του κριτηρίου αστοχίας, η ύπαρξη γεωμετρικών ατελειών του μοντέλου, η μοντελοποίηση των συγκολλήσεων. Οι αριθμητικές μοντελοποιήσεις στο ABAQUS γίνονται με βάση τη μεθοδολογία που περιγράφεται στην παρούσα δουλειά, αλλά και με βάση τις υποδείξεις των Alsos και Amdahl [8], για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, τα αποτελέσματα συγκρίνονται απευθείας με

τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των πειραμάτων, από τους ερευνητές της βιβλιογραφίας [7], [23].

Η προσεκτική μελέτη των πειραμάτων, των Alsos και Amdahl [7], και οι μακροσκοπικές παρατηρήσεις μέσω αυτών, ήταν καθοριστικές, τόσο για την εισαγωγή ρεαλιστικών παραδοχών και δεδομένων στο μοντέλο προσομοίωσης, όσο και για τη σωστή ερμηνεία και συσχέτιση της υπολογιστικής απεικόνισης με την πραγματική κατάσταση. Εάν τα πειράματα είχαν εκτελεσθεί από τη συγγραφέα, θα υπήρχαν ακόμη περισσότερα χρήσιμα δεδομένα, σε σχέση με αυτά που αναφέρονται από τους ερευνητές.

Στα πλαίσια των αριθμητικών μοντελοποιήσεων της παρούσας διπλωματικής εργασίας, έγιναν τα εξής:

- ✓ Η διακριτοποίηση του μοντέλου έγινε με το ίδιο μέγεθος πεπερασμένου στοιχείου σε όλη τη γεωμετρία. Στα αριθμητικά μοντέλα που κατασκευάστηκαν η διακριτοποίηση έγινε με στοιχεία τύπου κελύφους με λόγο le/t στο εύρος 1 έως 3.

- ✓ Ορίστηκε η καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης του αριθμητικού μοντέλου του υλικού, για κάθε χρησιμοποιούμενο μέγεθος στοιχείου, σε όλο το εύρος παραμορφώσεων, από την ελαστική περιοχή έως τη θραύση. Οι παράμετροι του μοντέλου αυτού βρέθηκαν με την προσομοίωση του πειράματος εφελκυσμού και τη χρήση της διαδικασίας αντίστροφης μηχανικής. Η καμπύλη του μοντέλου του υλικού προκύπτει με διαδικασία αντίστροφης μηχανικής από την πειραματική καμπύλη μονοαξονικού εφελκυσμού, όμως θεωρείται ότι εκφράζει τη σχέση ισοδύναμης τάσης-παραμόρφωσης σε όλες τις συνθήκες πολυαξονικής καταπόνησης. Έως το όριο αντοχής, η πραγματική καμπύλη του υλικού προσδιορίζεται απευθείας, με εξισώσεις μετατροπής, από την πειραματική καμπύλη. Μετά το όριο αντοχής, η τοπική παραμόρφωση του κατασκευαστικού στοιχείου, στη ζώνη δημιουργίας λαιμού, καλεί για ξεχωριστή αντιμετώπιση της συμπεριφοράς του υλικού. Η καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης του μοντέλου, σε εκείνη την περιοχή, παρεμβάλλεται μεταξύ της καμπύλης σταθερής τάσης (constant), της εκθετικής καμπύλης (power law) και της εφαπτομενικής καμπύλης (tangent), ανάλογα με το χαρακτηριστικό μέγεθος του στοιχείου, στο οποίο αφορά. Στην βιβλιογραφία, συναντάται συχνά η αποσύμπλεξη της σχέσης τάσης – παραμόρφωσης από το μέγεθος του στοιχείου, το οποίο επηρεάζει μόνο το κριτήριο αστοχίας.

- ✓ Οι κατασκευές οι οποίες μοντελοποιούνται είναι λεπτότοιχες και θεωρείται ότι το εύρος της πλαστικής ζώνης γύρω από το άκρο της ρωγμής είναι μεγάλο, σύμφωνα με την Ελαστοπλαστική Θεωρία της Μηχανικής των Θραύσεων (2.3.1). Μεταξύ των κριτηρίων που προσομοιάζουν την όλκιμη θραύση, επιλέγεται το κριτήριο κρίσιμης παραμόρφωσης θραύσης Rice-Tracey, το οποίο συμφωνεί καλά με τα πειραματικά αποτελέσματα, για εύρος τριαξονικότητας $1/3<\eta<2/3$. Το κριτήριο εισάγεται στο ABAQUS, χωρίς τη συγγραφή υπορουτίνας, μέσω του ενσωματωμένου στο πρόγραμμα κριτηρίου Ductile Damage, το οποίο είναι ένα κριτήριο με βάση την ισοδύναμη παραμόρφωση, που εμπλέκει την τριαξονικότητα και τον ρυθμό παραμόρφωσης. Η επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης δεν λαμβάνεται υπόψη στην παρούσα δουλειά. Η κρίσιμη παραμόρφωση αστοχίας τίθεται ως συνάρτηση της

τριαξονικότητας, με βάση το κριτήριο Rice-Tracey, στην περιοχή 1/3<η<2/3 και σταθερή για η≤1/3. Ελέγχεται, επίσης, η επιρροή στα αποτελέσματα της τιμής αποκοπής η=-1/3, κάτω από την οποία το κριτήριο αστοχίας δεν ενεργοποιείται. Το κριτήριο Ductile Damage χρησιμοποιείται ως κριτήριο έναρξης της αστοχίας και ακολουθείται από τη ρύθμιση Damage Evolution, που προσομοιάζει την απώλεια φέρουσας ικανότητας του πεπερασμένου στοιχείου, εξαιτίας της εξέλιξης της θραύσης διαμέσου αυτού. Επιλέγεται βηματική μεταβολή της παραμέτρου Damage Degradation συναρτήσει της πλαστικής μετατόπισης, με γραμμική ή δι-γραμμική σχέση.

- ✓ Μοντελοποιήθηκαν οι συγκολλήσεις μεταξύ πλάκας και ενισχυτικού. Η ραφή της γωνιακής συγκόλλησης μοντελοποιήθηκε με την προσαύξηση του πάχους μίας σειράς πεπερασμένων στοιχείων, που γειτνιάζουν με τη συμβολή των ελασμάτων. Σε αντίθεση με τη βιβλιογραφία, η προσαύξηση, σε κάθε έλασμα, γίνεται από την πλευρά της ραφής συγκόλλησης και όχι εκατέρωθεν της μέσης γραμμής του πάχους του στοιχείου. Διερευνάται, ακόμη, η επιρροή που έχει στα αποτελέσματα η εισαγωγή παραμενουσών τάσεων, που οφείλονται στη συγκόλληση, στα δύο ελάσματα.

- ✓ Στα αριθμητικά μοντέλα εισάγονται δύο είδη ατελειών. Αρχικά, η διατομή των ενισχυτικών θεωρείται ότι έχει ένα αρχικό βέλος κάμψης, ίσο με 1% του ύψους της. Θεωρείται, ακόμη, ότι ο διεισδυτής δεν προσπίπτει ακριβώς στο κέντρο του ενισχυμένου ελάσματος, αλλά έχει μία μικρή εγκάρσια απόκλιση. Στο μοντέλο 1FB, εξετάζεται η επίδραση, στην συμπεριφορά του ελάσματος, της τιμής της εγκάρσιας απόκλισης της θέσης αυτής αλλά και η σχετική θέση πρόσπτωσης του διεισδυτή με την πλευρά κύρτωσης της διατομής του ενισχυτικού.

- ✓ Καθώς η ταχύτητα καθόδου του διεισδυτή έχει σταθερή τιμή, η τιμή του φορτίου που ασκείται στην πλάκα έχει χρονική εξάρτηση. Ωστόσο, κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων που μοντελοποιούνται, η ταχύτητα του διεισδυτή είναι πολύ μικρή (10mm/min), γεγονός που επιτρέπει την προσέγγιση του προβλήματος ως ψευδοστατικό (αδρανειακοί όροι και οι όροι απόσβεσης είναι μικροί, σε σχέση με τον όρο ελαστικότητας). Δηλαδή, θεωρείται ότι το έργο της δύναμης, η οποία εφαρμόζεται από το διεισδυτή, μετατρέπεται ολόκληρο σε ενέργεια παραμόρφωσης που απορροφά το ενισχυμένο έλασμα και η κινητική ενέργεια είναι μικρή. Ο έλεγχος αυτής της υπόθεσης γίνεται με την σύγκριση της κινητικής ενέργειας και της εσωτερικής ενέργειας παραμόρφωσης του μοντέλου. Επιπλέον, ελέγχεται εάν τα αποτελέσματα μεταβάλλονται με την επιβράδυνση της διαδικασίας (μείωση της ταχύτητας καθόδου του διεισδυτή).

Από τα αριθμητικά μοντέλα που κατασκευάστηκαν, για κάθε πειραματική διάταξη, τουλάχιστον ένα κατάφερνε να προβλέψει ικανοποιητικά την καμπύλη απόκρισης (δύναμης – παραμόρφωσης) και τη μορφή αστοχίας του ενισχυμένου ελάσματος. Τα καλύτερα αποτελέσματα και οι τιμές των αντίστοιχων κρίσιμων παραμέτρων παρατίθενται στο υποκεφάλαιο 4.4. Μάλιστα, επιτεύχθηκε η ρεαλιστική πρόβλεψη της μορφής αστοχίας των διατάξεων US και 1FB, γεγονός το οποίο αποτέλεσε πρόκληση για τους ερευνητές της βιβλιογραφίας ([8], [23]). Τέλος, εμφανίζεται σύγκλιση των τιμών

μέγιστης δύναμης αντίστασης του ελάσματος, για μειούμενο χαρακτηριστικό μέγεθος πεπερασμένου στοιχείου. Κρίνεται ότι οι γνωσιακοί και ερευνητικοί στόχοι της παρούσας διπλωματικής εργασίας επιτεύχθηκαν.

5.2 Συμπεράσματα

Η μελέτη, αριθμητική προσομοίωση και συγκριτική παρατήρηση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων εγκάρσιας φόρτισης των ενισχυμένων ελασμάτων οδήγησε σε κάποια ειδικά και γενικά συμπεράσματα.

Αρχικά, παρατίθενται κάποια συμπεράσματα που αφορούν τη συμπεριφορά του φυσικού μοντέλου υπό εγκάρσια φόρτιση, ανάλογα με τη διάταξη των διαμήκων ενισχυτικών:

→ Για τα φυσικά μοντέλα που εξετάστηκαν, όσο πιο ισχυρή είναι η ενίσχυση του ελάσματος (αύξηση αριθμού ενισχυτικών, στην προκειμένη περίπτωση), τόσο αυξάνεται η δυσκαμψία του και μειώνεται η μέγιστη αντοχή του σε θραύση (δύναμη αντίστασης). Απεναντίας, η περαιτέρω ενίσχυση έχει θετική επίπτωση στην εναπομείνουσα αντοχή του ελάσματος, μετά τη ρηγμάτωση, καθώς περιορίζει τη διάδοσή της σε μία πιο στενή περιοχή.

→ Η μέγιστη δύναμη αντίστασης του ελάσματος σημειώνεται ακριβώς πριν την εμφάνιση της πρώτης ρηγμάτωσης. Η μετέπειτα έκταση και το σχήμα της ρωγμής επηρεάζει την εναπομείνουσα αντοχή του ελάσματος. Όπως αναφέρθηκε, η ανάπτυξη μίας ρωγμής χαλαρώνει τις τάσεις στη διεύθυνση κάθετη σε αυτή και τις επανακατανέμει στη διεύθυνση παράλληλη με αυτή, συνεπώς, συνδέεται άρρηκτα με την περαιτέρω αντίσταση που προβάλλει το έλασμα.

Ακολουθούν κάποια συμπεράσματα που αφορούν τη συμπεριφορά του αριθμητικού μοντέλου:

→ Η παραμόρφωση του στοιχείου σχετίζεται με τη μετατόπιση των κόμβων του. Σε περιοχές με τοπικές συγκεντρώσεις παραμόρφωσης, τα μικρά στοιχεία ενός πυκνού πλέγματος δέχονται μεγαλύτερες παραμορφώσεις σε σχέση με τα μεγαλύτερα στοιχεία ενός αραιότερου πλέγματος. Για να μην επηρεάζονται τα αποτελέσματα από την πυκνότητα της διακριτοποίησης, όταν προβλέπεται η δημιουργία συγκεντρώσεων παραμόρφωσης, το μοντέλο του υλικού πρέπει να προσαρμόζεται στο εκάστοτε μέγεθος πεπερασμένου στοιχείου. Αυτό γίνεται με την προσομοίωση της δοκιμής εφελκυσμού, στην οποία δημιουργείται συγκέντρωση παραμόρφωσης, και την εφαρμογή της μεθόδου αντίστροφης μηχανικής για κάθε μέγεθος στοιχείου. Το μοντέλο του υλικού που κατασκευάζεται μέσω αυτής της διαδικασίας περιγράφει καλά τη συμπεριφορά του υλικού σε παρόμοιες συνθήκες (τοπικές συγκεντρώσεις παραμορφώσεων). Η διαφοροποίηση στην καμπύλη του μοντέλου του υλικού κάθε μεγέθους στοιχείου εντοπίζεται μετά το όριο αντοχής σε μονοαξονικό εφελκυσμό, όπου το μεγαλύτερο στοιχείο αναπτύσσει μικρότερες τάσεις σε σχέση με το μικρότερο

για ίδια τιμή παραμόρφωσης (μικρότερη κλίση της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης). Δηλαδή, το μοντέλο υλικού των μεγαλύτερων στοιχείων, που προκύπτει από την διαδικασία αντίστροφης μηχανικής, είναι λιγότερο ισχυρό από αυτό των μικρότερων στοιχείων, για να εξισορροπείται η αδυναμία του να περιγράψει καλά τις συγκεντρώσεις παραμορφώσεων. Επιπλέον, γίνεται κατάλληλη προσαρμογή του κριτηρίου θραύσης στο μέγεθος του στοιχείου, εάν το κριτήριο βασίζεται στην παραμόρφωση. Η κρίσιμη ισοδύναμη παραμόρφωση αστοχίας του μοντέλου του υλικού πρέπει να μειώνεται με την αύξηση του μεγέθους του στοιχείου. Τα παραπάνω ισχύουν για την περίπτωση που το υλικό θραύεται εντός ζώνης τοπικής παραμόρφωσης. Όταν η θραύση επέρχεται σε περιοχή ομοιόμορφης καταπόνησης, το μέγεθος του στοιχείου δεν διαδραματίζει τόσο μεγάλο ρόλο στην σύλληψη του παραμορφωσιακού πεδίου και η προσαρμογή του μοντέλου του υλικού δεν είναι απαραίτητη. Απεναντίας, το μοντέλο υλικού που έχει προκύψει από τη διαδικασία αντίστροφης μηχανικής και αφορά το μικρότερο στοιχείου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανεξαρτήτως της πυκνότητας του πλέγματος. Στις διατάξεις των ενισχυμένων ελασμάτων που μελετώνται στην παρούσα δουλειά, τέτοιες περιοχές εντοπίζονται μακριά από τις οριακές συνθήκες που δημιουργούν οι περιφερειακές στηρίξεις και οι συγκολλήσεις με τα ενισχυτικά.

→ Κρίνεται, ότι η κατασκευή μίας καμπύλης υλικού που παρεμβάλλεται μεταξύ constant – power law - tangent, μετά το όριο αντοχής, με διαφορετικό συντελεστή παρεμβολής, w, ανάλογα με το μέγεθος του στοιχείου, οδηγεί σε καλή προσέγγιση της πραγματικής καμπύλης και δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Όσο μειώνεται το χαρακτηριστικό μέγεθος του στοιχείου και αυξάνεται η ευαισθησία του, απαιτείται η ισχυροποίηση του υλικού του με την αύξηση του w.

→ Με τη χρήση του Damage Evolution αποφεύγεται η δημιουργία διαταραχών στην απόκριση, που οφείλεται στη βίαιη απομάκρυνση του στοιχείου από το πλέγμα. Ακόμη, με τη χρήση αυτής της ρύθμισης, η πειραματική καμπύλη της δοκιμής εφελκυσμού κάθε υλικού προσεγγίζεται με μεγάλη ακρίβεια στην αριθμητική προσομοίωσή της.

→ Στην αριθμητική προσομοίωση του πειράματος εφελκυσμού, στο ενσωματωμένο στο πρόγραμμα κριτήριο αστοχίας Ductile Damage, δίνεται μία τιμή κρίσιμης ισοδύναμης παραμόρφωσης για όλο το εύρος τριαξονικότητας (για κάθε μέγεθος στοιχείου). Ουσιαστικά, λοιπόν, η αστοχία του επιπέδου κατά το πάχος του στοιχείου επέρχεται, όταν η ισοδύναμη παραμόρφωσή του φτάσει την κρίσιμη. Η τιμή αυτή προσδιορίζεται μέσω της διαδικασίας αντίστροφης μηχανικής και είναι η παραμόρφωση με την οποία αργότερα καλιμπράρεται το κριτήριο Rice Tracey. Η προσαρμογή της κρίσιμης παραμόρφωσης ανάλογα με την τριαξονικότητα δεν χρειάζεται γι αυτήν την προσομοίωση, καθώς η τριαξονικότητα λαμβάνει σταθερή τιμή (η~1/3) καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος.

→ Παρατηρείται, ότι όταν γίνεται η ρύθμιση chm=0 (chm, η παράμετρος του κριτηρίου Rice Tracey, 3.3.1), στο κριτήριο αστοχίας, η πρόβλεψη για τη μέγιστη δύναμη αντίστασης του ενισχυμένου ελάσματος είναι ακριβέστερη. Αυτό αποτελεί μία

ένδειξη, πως η τιμή της κρίσιμης παραμόρφωση σε συνθήκες διαξονικού εφελκυσμού είναι παρόμοια με την αντίστοιχη για μονοαξονικό εφελκυσμό. Το κριτήριο Rice-Tracey, το οποίο περιλαμβάνει μία φθίνουσα σχέση παραμόρφωσης – τριαξονικότητας, ευθύνεται μάλλον για την υποεκτίμηση της αντοχής του ελάσματος, όταν η θραύση γίνεται υπό συνθήκες διαξονικού εφελκυσμού.

→ Επειδή η ρηγμάτωση του υλικού συμβαίνει υπό συνθήκες διαξονικού εφελκυσμού, στις συγκεκριμένες εφαρμογές, η επιλογή ενός κριτηρίου αστοχίας που συμφωνεί με πειραματικά αποτελέσματα μόνο για το εύρος $1/3<\eta<2/3$ δεν οδηγεί σε μεγάλα σφάλματα. Αποδείχθηκε, ότι η εισαγωγή ή μη της τιμής αποκοπής, σε $\eta= -1/3$, δεν επιδρά σημαντικά στην απόκριση της κατασκευής, για αυτήν την εφαρμογή. Παρατηρείται μία - αναμενόμενη - αύξηση στην μέγιστη αντίσταση της τάξης του 0.1-0.5% και καμία διαφορά στην προβλεπόμενη μορφή αστοχίας. Σε άλλες εφαρμογές, όπου το στοιχείο θα παραλαμβάνει μεγάλες παραμορφώσεις ευρισκόμενο στη θλιπτική περιοχή, η επίδραση της τιμής αποκοπής αναμένεται να είναι μεγαλύτερη.

→ Φαίνεται, όπως και είναι λογικό, ότι τα αριθμητικά μοντέλα που διακριτοποιήθηκαν με μικρότερο μέγεθος πεπερασμένου στοιχείου παράγουν τα πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα. Η ικανότητα του πυκνού πλέγματος να περιγράφει με ακρίβεια τις συγκεντρώσεις τάσεων/παραμορφώσεων δίνει αυτό το πλεονέκτημα. Η διαφορά στα αποτελέσματα της προσομοίωσης του ίδιου προβλήματος με διαφορετικό μέγεθος στοιχείου γίνεται μεγαλύτερη στις περιπτώσεις όπου η ρηγμάτωση εντοπίζεται σε περιοχές συγκέντρωσης τάσεων/παραμορφώσεων ενώ συνυπάρχουν ομοιόμορφα αυξημένες τάσεις μακριά από τη συμβολή ελασμάτων. Συνεπώς, συνίσταται η χρήση του μικρότερου δυνατού μεγέθους πεπερασμένου στοιχείου, με $l_e/t>1$. Σε περιπτώσεις όπου η μείωση του μεγέθους του στοιχείου είναι υπολογιστικά ασύμφορη και, επιπροσθέτως, χρησιμοποιείται κριτήριο θραύσης με βάση την παραμόρφωση, συνίσταται η αξιοποίηση του νόμου συσχέτισης παραμόρφωσης θραύσης (fracture scaling law) στις περιοχές που αναμένεται να εμφανιστεί συγκέντρωση παραμόρφωσης κατά τον τρόπο που έχει προταθεί.

→ Επειδή το έλασμα της πλάκας έχει λόγο αναλογίας 5/3, οι εγκάρσιες ορθές τάσεις είναι μεγαλύτερες από τις διαμήκεις και, γι αυτό το λόγο, η πρώτη ρωγμή δημιουργείται κατά τη διαμήκη διεύθυνση (κάθετα στις μέγιστες τάσεις). Η ανακατανομή των τάσεων, μετά την έναρξη της ρηγμάτωσης, μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία δεύτερης, εγκάρσιας ρωγμής, σε κάποια αριθμητικά μοντέλα, λόγω των αυξημένων διαμήκων τάσεων.

→ Στα μοντέλα που εξετάστηκαν, το μέγεθος του στοιχείου δεν επηρεάζει τον τρόπο διάδοσης αλλά μόνο τη θέση έναρξης της ρωγμής, μέσω της καμπύλης κρίσιμης παραμόρφωσης αστοχίας που το χαρακτηρίζει και της αποτελεσματικότητάς του στο να περιγράψει ικανοποιητικά το παραμορφωσιακό πεδίο.

→ Παρατηρήθηκε, ότι, στις παρούσες εφαρμογές, όσο πιο δύσκολο είναι να παραμορφωθεί το ενισχυτικό, τόσο νωρίτερα ξεκινά η θραύση στο έλασμα της

πλάκας. Αυτό συμπεραίνεται από τη μελέτη των διαφορετικών σχετικών θέσεων των γεωμετρικών ατελειών, που αφορά τη διαμόρφωση 1FB και περιγράφεται στο εδάφιο 4.3.2. Όπως εξηγήθηκε, η αύξηση της κρίσιμης τάσης λυγισμού του ενισχυτικού και η καθυστέρηση αυτού, δυσχεραίνει τη διάχυση της ενέργειας παραμόρφωσης σε όλη την πλάκα και οδηγεί στην ανάπτυξη μεγαλύτερων παραμορφώσεων για την ίδια δύναμη αντίστασης.

→ Είναι εμφανές, ότι η σχετική θέση του διεισδυτή ως προς το κέντρο του ενισχυμένου ελάσματος, έχει σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα, γιατί μεταβάλλει το τασικό και παραμορφωσιακό πεδίο στην πλάκα.

→ Η τοποθέτηση της προσαύξησης πάχους, λόγω της ύπαρξης της ραφής συγκόλλησης, από τη μία πλευρά του ελάσματος – προσέγγιση που θεωρείται πιο ρεαλιστική -, επηρεάζει τα αποτελέσματα, επειδή εντείνει την συγκέντρωση τάσεων και παραμορφώσεων στη γειτονική περιοχή.

→ Οι παραμένουσες τάσεις δεν επηρεάζουν την απόκριση των ενισχυμένων ελασμάτων, όταν φορτίζονται έως τη θραύση, γιατί η γενικευμένη πλαστικοποίηση εξισορροπεί το τασικό πεδίο.

→ Αριθμητικά μοντέλα, τα οποία προβλέπουν ικανοποιητικά την καμπύλη απόκρισης του φυσικού μοντέλου και το ύψος της μέγιστης δύναμης, δεν σημαίνει ότι προβλέπουν επαρκώς τη μορφή αστοχίας. Στην παρούσα δουλειά, δόθηκε βαρύτητα στην πρόβλεψη της απόκρισης του φυσικού μοντέλου, ως συνδυασμός της καμπύλης δύναμης - μετατόπισης και της μορφής αστοχίας.

→ Η αντιμετώπιση του προβλήματος ως ψευδοστατικό κρίνεται αποδεκτή, καθώς ο λόγος της κινητικής προς την εσωτερική ενέργεια είναι μικρότερος του 2% και τα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιώσεων δεν μεταβάλλονται με την μείωση του ρυθμού επιβολής του φορτίου. Η αντιμετώπιση του προβλήματος ως ψευδοστατικό, απαιτεί την επιτάχυνση της διεργασίας στην αριθμητική της μοντελοποίηση και όχι την προσομοίωσή της στη φυσική χρονική της κλίμακα, για λόγους οικονομίας υπολογιστικού χρόνου (10^4 φορές ταχύτερα, στην παρούσα εφαρμογή).

5.3 Προτάσεις για μελλοντική δουλειά

Σε αυτό το σημείο, ολοκληρώνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων και πορισμάτων της διπλωματικής εργασίας. Μερικές προτάσεις της συγγραφέα για επέκταση της μελετητικής δουλειάς που εκπονήθηκε, είναι οι εξής:

⌛ Συμπλήρωση του κριτηρίου Rice-Tracey, για την περιοχή $1/3<\eta<2/3$, με το κριτήριο Cockcroft-Latham για τη θλιπτική περιοχή. Επίσης, τιμή αποκοπής μπορεί να τεθεί εύκολα με τον τρόπο που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4.4. Εφόσον το ABAQUS χρησιμοποιεί ολοκλήρωση, για τον υπολογισμό της κρίσιμης παραμέτρου του Ductile

Damage, το κριτήριο αστοχίας RTCL μπορεί να εισαχθεί στο πρόγραμμα απευθείας, χωρίς να απαιτείται η συγγραφή συνοδευτικής υπορουτίνας, όπως γίνεται στη βιβλιογραφία.

- Δοκιμή ενός κριτηρίου θραύσης, σύμφωνα με το οποίο ισχύει $\varepsilon_{cr}(\eta = 1/3) \approx \varepsilon_{cr}\ (\eta = 2/3)$, αλλά $\varepsilon_{cr}(\eta > 1/3) < \varepsilon_{cr}\ (\eta = 2/3)$ και σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με c_{hm}=0. Ένα υποσχόμενο τέτοιο κριτήριο, με βάση την ισοδύναμη παραμόρφωση, είναι το Κριτήριο Μέγιστης Διατμητικής Τάσης, που αναλύθηκε στο εδάφιο 3.3.1. Σύμφωνα με τους Wierzbicki και Bao [4], οι προβλέψεις του κριτηρίου συνάδουν με τα πειραματικά αποτελέσματα. Το κριτήριο θα μπορούσε να ορισθεί στο πρόγραμμα ABAQUS μέσω ενός άλλου κριτηρίου αστοχίας.

- Ο συνδυασμός ενός κριτηρίου αστοχίας με το Damage Evolution, αποδείχθηκε επιτυχής. Παρόλα ταύτα, υπάρχει πεδίο για περαιτέρω διερεύνηση του τρόπου ρύθμισης των παραμέτρων του Damage Evolution. Θα μπορούσε να εξετασθεί εάν το Damage Evolution χρειάζεται να μεταβάλλεται, για διαφορετικές συνθήκες τριαξονικότητας. Γι αυτό, ίσως, θα ήταν αναγκαία η αριθμητική προσομοίωση περισσότερων καταστρεπτικών δοκιμών.

- Στην παρούσα δουλειά, κατασκευάζονται ξεχωριστά μοντέλα υλικού, για κάθε χαρακτηριστικό μέγεθος στοιχείου. Στην βιβλιογραφία χρησιμοποιείται μία συνάρτηση παρεμβολής (fracture scaling law) για τη ρύθμιση της κρίσιμης ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης ανάλογα με το μέγεθος του στοιχείου. Το ίδιο θα μπορούσε να γίνει και για όλο το εύρος της καμπύλης, μετά το όριο αντοχής, με συγγραφή υπολογιστικής υπορουτίνας. Επεξηγηματικά, θα μπορούσε η καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης να προκύπτει από παρεμβολή μεταξύ των καμπυλών του μοντέλου υλικού, που έχουν καλιμπραριστεί για συγκεκριμένα μεγέθη στοιχείων. Ακόμη, η καμπύλη του μοντέλου του υλικού, θα μπορούσε να εξαρτάται, πέρα από το μέγεθος του στοιχείου, από την κατανομή του τασικού πεδίου (ομοιόμορφη ή συγκεντρωμένη), σε συνέχεια όσων αναφέρθηκαν στο προηγούμενο εδάφιο.

- Εκτέλεση προσομοιώσεων με αρκετά μεγάλο μέγεθος στοιχείου. Στα αριθμητικά μοντέλα μεγάλων τμημάτων της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου, συνήθως είναι ασύμφορη, από άποψη υπολογιστικού χρόνου, η χρήση στοιχείων με $l_e/t<5$. Στα μοντέλα που κατασκευάστηκαν στην παρούσα δουλειά ίσχυε $1<l_e/t<3$ και πάρα ταύτα η επίδραση του μεγέθους του στοιχείου ήταν εμφανής. Η κατάλληλη προσαρμογή της καμπύλης του υλικού για κάθε εντατική κατάσταση και για κάθε μέγεθος στοιχείου είναι ο δρόμος για την επίτευξη ακρίβειας αποτελέσματος παρά τη χρήση στοιχείων με μεγάλο λόγο l_e/t.

- Εξέταση της επίδρασης του είδους του στοιχείου στα αποτελέσματα της προσομοίωσης κρούσης λεπτότοιχων ενισχυμένων ελασμάτων. Στα αριθμητικά μοντέλα των πειραμάτων αυτών μπορεί να δοκιμαστεί η διακριτοποίηση με: τετραγωνικά-τετρακομβικά στοιχεία κελύφους πλήρους ολοκλήρωσης (S4),

τετραγωνικά-οκτακομβικά στοιχεία κελύφους μερικής/πλήρους ολοκλήρωσης (S8R/S8) και στερεά πεπερασμένα στοιχεία.

- Εισαγωγή αβεβαιοτήτων στις ιδιότητες των υλικών που συμμετέχουν στο αριθμητικό μοντέλο και έλεγχος της ευαισθησίας του αποτελέσματος.

Αυτή η σελίδα αφέθηκε σκοπίμως κενή

a

Βιβλιογραφία

[1] International Maritime Organization (2021). Global Integrated Shipping Information System - Marine Casualties and Incidents. IMO [assessed Dec. 2021]; https://gisis.imo.org/Public/Default.aspx

[2] Samuelides, M.S. (2009). Design against collision: Fifty tears of research. In Proceedings of 10th International Marine Design Conference IMDC2009, Trondheim, Norway.

[3] Hogström P., Ringsberg J. W. (2012). An extensive study of a ship's survivability after collision – A parameter study of material characteristics, non-linear FEA and damage stability analyses. Journal of marine Structures 27, 1-28.

[4] Wierzbicki T., Bao Y., Lee Y.W., Bai Y (2005). Calibration and evaluation of seven fracture models. International Journal of Mechanical Sciences 47, 719–743.

[5] Törnqvist R. (2003). Design of Crashworthy Ship Structures, PhD Thesis. Technical University of Denmark, Department of Mechanical Engineering, Maritime Engineering. Lyngby, Copenhagen, Denmark.

[6] Ehlers S., Broekhuijsen J., Alsos H. S., Biehl F., Tabri K. (2008). Simulating the collision response of ship side structures: A failure criteria benchmark study. International Shipbuilding Progress 55, 127–144.

[7] Alsos H. S., Amdahl J. (2009). On the resistance to penetration of stiffened plates, Part I – Experiments. International Journal of Impact Engineering, 36, 799-807.

[8] Alsos H. S., Amdahl J., Hopperstad O. S. (2009). On the resistance to penetration of stiffened plates, Part II Numerical analysis. International Journal of Impact Engineering, 36, 875-887.

[9] Marinatos J. N., Samuelides M. S. (2015). Towards a unified methodology for the simulation of rupture in collision and grounding of ships. Journal of Marine Structures 42, 1-32.

[10] Χρυσουλάκης Γ. Δ., Παντελής Δ. Ι. (2008). Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου.

[11] Παπάζογλου Β. Ι., Τσούβαλης Ν. Γ. (2018). Πανεπιστημιακές Σημειώσεις μαθήματος «Ναυπηγική Τεχνολογία». Αθήνα: Εκδόσεις ΕΜΠ.

[12] Pineau A., Pardoen, T. (2003). Fracture Mechanisms of Metals. In Pineau A., Pardoen, T., Comprehensive Structural Integrity, Fracture of Materials from Nano to Macro. Elsevier Science.

[13] ISO 6892-1: Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature.

[14] Levanger H. (2012). Simulating Ductile Fracture in Steel using the Finite Element Method Comparison of Two Models for describing local instability due to ductile fracture, Master Dissertation. University of Oslo, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Oslo, Norway.

[15] Pardoen T., Delannay F. (1998). On the coalescence of voids in prestrained notched round copper bars. Fatigue, Fracture Engineering Material Structures, 21, 1459-1472.

[16] Wierzbicki T., Bao Y. (2004). On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space. International Journal of Mechanical Sciences 46, 81-98.

[17] Bridgeman P. W. (1964). Studies in large plastic flow and fracture. Cambridge, MA: Harvard University Press.

[18] ANSYS Inc. (2018). 5.2 Shell Elements. Muegyetem, Department of Applied Mechanics.

[19] Hillerborg A., Modeer M., Petersson P. E. (1976) Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. Cement and concrete research; 6: 773-782. Pergamon Press, Inc. United States of America.

[20] Smith, M. (2009). ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.9. Dassault Systèmes Simulia Corp.

[21] Karlsson U., Ringsberg J.W., Johnson E., Hoseini M., Ulfvarson A. (2008). Experimental and numerical investigation of bulb impact with side-shell structure. Marine Technology; 46(1):16–26.

[22] Hogström P., Ringsberg J.W., Johnson E. (2009). An experimental and numerical study of the effects of length scale and strain state on the necking and fracture behaviors in sheet metals. International Journal of Impact Engineering, Elsevier, 36 (10-11), pp.1194.

[23] Marinatos J. N. (2015). Determination of failure criteria and incorporation in FE codes for the simulation of ship's hull in extreme loading conditions. PhD Thesis. National Technical University of Athens, Marine Engineering, Marine Structures Division. Athens, Greece.

[24] Ling Z. (1996). Uniaxial true stress-strain after necking. AMP Journal of Technology; 5: 37-48.

[25] Marciniak Z., Duncan J.L., Hu S.J. (2002). Mechanicals of Sheet Metal Forming. Butterworth-Heinemann.

[26] Alsos H. S., Hopperstad O. S., Törnqvist R., Amdahl J. (2008). Analytical and numerical analysis of sheet metal instability using a stress-based criterion. International Journal of Solids and Structures; 45: 2042–2055.

[27] Jesper U. (2003). Crushing and Fracture of Lightweight Structures, PhD Thesis. Technical University of Denmark, Department of Mechanical Engineering, Maritime Engineering. Lyngby, Copenhagen, Denmark.

[28] Παντελής Δ., Παπάζογλου Β., Χαϊδεμενόπουλος Γ. (2017). Παραμένουσες Τάσεις. Στο Επιστήμη και Τεχνολογία των Συγκολλήσεων (σελ. 261-278). Αθήνα: Εκδόσεις Τζιόλα.

[29] Masubuchi K., Blodgett O.W., Matsui S., Ruud C.O., Tsai C.L. (2019). Chapter 7: Residual Stress and Distortion. In Sinnes, K., Welding Handbook: Welding and Cutting Science and Technology (10th Edition, Volume I). American Welding Society.

[30] Michaleris, P. (2011). Introduction to welding residual stress and distortion. In Minimization of welding distortion and buckling: Modelling and implementation. essay, Woodhead Publishing.

[31] Radaj, D. (1992). Heat effects of welding: Temperature field, residual stress, distortion. Springer-Verlag.

[32] Masubuchi, K. (1980). Analysis of welded structures residual stresses, distortion, and their consequences. Pergamon Press.

[33] Lou Y., Huh H. (2013). Extension of a shear-controlled ductile fracture model considering the stress triaxiality and the Lode parameter. International Journal of Solids and Structures: 50, 447-455.

d