

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



Διδακτορική Διατριβή

**Σχηματισμός ρωγμών συγκολλητών κόμβων
δοκών-υποστυλωμάτων υπό σεισμικές καταπονήσεις**

Βασίλειος Κάρλος

Επιβλέπων: Ι. Βάγιας, Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Απρίλιος 2013

*Εστί οικογένειά μου
για την αμέριστη στήριξή της*

Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή	1
1.1	Γενικά	1
1.2	Βασικά χαρακτηριστικά θραύσης των υλικών	2
1.3	Αστοχίες ψαθυρής μορφής	3
1.3.1	Ιστορικό αστοχιών	3
1.3.2	Αστοχίες λόγω σεισμού	5
1.3.3	Αίτια αστοχιών	9
1.3.4	Μέτρα βελτίωσης της συμπεριφοράς των πλαισίων ροπής	11
1.4	Αναγκαιότητα διερεύνησης ψαθυρής αστοχίας συγκολλητών κόμβων δοκού-υποστυλώματος	14
2	Σύγχρονη έρευνα στον τομέα της θραύσης, της κόπωσης και των απαιτήσεων δυσθραυστότητας μεταλλικών υλικών	15
2.1	Εφαρμογή πλαστικής ανάλυσης με κριτήριο τη δυσθραυστότητα	15
2.2	Υπάρχοντα κριτήρια επιλογής υλικού για πλαστικό σχεδιασμό	16
2.3	Μέθοδοι επιλογής υλικού για την αποφυγή ψαθυρής θραύσης	23
2.3.1	Χρήση των αρχών της θραυστομηχανικής	23
2.3.2	Χρήση των αρχών της μηχανικής της βλάβης	28
2.4	Μηχανισμοί αστοχίας στο δομικό χάλυβα	31
2.4.1	Τύποι κόπωσης	31
2.4.2	Ο μηχανισμός της υπέρ-ολιγοκυκλικής κόπωσης	32
2.4.3	Επίδραση της ταχύτητας φόρτισης στο μηχανισμό αστοχίας	34
2.4.4	Επίδραση των παραμενουσών τάσεων της συγκόλλησης στο μηχανισμό αστοχίας	36
3	Καθορισμός μικρομηχανικών χαρακτηριστικών και ιδιότητες υλικών	39
3.1	Καταγραφή υλικών	39
3.2	Μονοαξονικές εφελκυστικές δοκιμές	40
3.3	Δοκιμές Charpy	45
3.4	Μετρήσεις θραυστομηχανικής	49
3.5	Χημική σύσταση	50
3.6	Κοκκομετρική ανάλυση	51

3.7	Χαρακτηριστικό μήκος.....	52
3.7	Συσχετισμός δοκιμής Charpy και παραμέτρων θραυστομηχανικής.....	54
3.8	Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις.....	59
4	Συμπεριφορά επιλεγμένων μεταλλικών φορέων υπό σεισμικές καταπονήσεις.....	61
4.1	Απαιτήσεις σχεδιασμού.....	61
4.2	Βασικές διατάξεις μεταλλικών κατασκευών.....	63
4.2.1	Χαρακτηριστικά πλαισίων.....	63
4.2.2	Πλαίσια ροπής (Moment Resisting Frames).....	64
4.3	Αναλύσεις μεταλλικών φορέων με πλαίσια ροπής.....	66
4.3.1	Διαδικασία ανάλυσης.....	67
4.3.2	Τρισδιάστατη ανάλυση.....	67
4.3.3	Δισδιάστατη μη γραμμική ανάλυση.....	69
4.3.4	Χρονοϊστορίες φορτίσεων-Απαιτήσεις σε όρους παραμορφώσεων.....	74
4.4	Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις.....	76
5	Πειραματικές διερευνήσεις συγκολλητών κόμβων δοκού-υποστυλώματος... 77	77
5.1	Πειραματική διάταξη και περιγραφή δοκιμών δοκού-υποστυλώματος.....	77
5.2	Τύποι φορτίσεων.....	83
5.3	Αποτελέσματα μονοτονικών φορτίσεων.....	86
5.4	Αποτελέσματα ανακυκλιζόμενων φορτίσεων.....	89
5.5	Συμπεράσματα- Παρατηρήσεις.....	94
6	Αριθμητική διερεύνηση της συμπεριφοράς των συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος.....	95
6.1	Γενικά.....	95
6.2	Διερεύνηση της συμπεριφοράς συγκολλητών συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.....	95
6.2.1	Γενικές πληροφορίες και χαρακτηριστικά των προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων.....	95
6.2.2	Σύγκριση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων – Μονοτονική φόρτιση.....	98
6.2.3	Σύγκριση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων- Ανακυκλιζόμενες φορτίσεις.....	102
6.3	Συμπεράσματα συγκρίσεων.....	117
7	Ανάλυση συνδέσεων με τις αρχές της μηχανικής της βλάβης.....	119

7.1	Εισαγωγή	119
7.2	Μοντέλα όλκιμης αστοχίας του χάλυβα	119
7.2.1	Μοντέλο Gurson-Tvergaard-Needleman	119
7.2.2	Μοντέλο Leblond	122
7.2.3	Μοντέλο Lemaitre	123
7.2.4	Μοντέλο Bonora.....	124
7.2.5	Μοντέλο ανακυκλιζόμενης διόγκωσης των κενών	126
7.2.6	Καμπύλες Βλάβης.....	130
7.2.7	Αρχή ενεργού βλάβης	136
7.3	Αποτελέσματα αναλύσεων	139
7.4	Σύνοψη αποτελεσμάτων	142
8	Εξαγωγή καμπυλών υπέρ-ολιγοκυκλικής κόπωσης	147
8.1	Εισαγωγή	147
8.2	Σχέση των Manson- Coffin	147
8.3	Υπολογισμός αντοχής έναντι κόπωσης	148
8.4	Ορισμός απαιτήσεων παραμόρφωσης	149
8.5	Συμπεράσματα επεξεργασίας των αποτελεσμάτων	154
9	Επιρροή της παρουσίας οπών συγκόλλησης σε συνδέσεις δοκού-υποστυλώματος	155
9.1	Γενικά	155
9.2	Γεωμετρία οπών συγκόλλησης	155
9.3	Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων	156
9.4	Αποτελέσματα αναλύσεων	158
9.5	Συμπεράσματα αποτελεσμάτων	163
10	Επιρροή της παρουσίας βοηθητικών υποθεμάτων σε συνδέσεις δοκού-υποστυλώματος	165
10.1	Γενικά	165
10.2	Μορφή αστοχιών	166
10.3	Αίτια βλαβών	168
10.4	Γεωμετρία μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων	170
10.5	Αποτελέσματα αναλύσεων	171
10.6	Συμπεράσματα αναλύσεων	177
11	Συμπεράσματα-Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση	179

11.1	Συμπεράσματα	179
11.2	Πρωτότυπη συμβολή	183
11.3	Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση	183
12	Βιβλιογραφία.....	185
	Παράρτημα Α: Ανάλυση υλικών	193
	Παράρτημα Β: Σχέδια κόμβων	201
	Παράρτημα Γ: Πειραματικά αποτελέσματα συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος.....	209
	Παράρτημα Δ: Αναλυτικά αποτελέσματα συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος.....	223
	Παράρτημα Ε: Αποτελέσματα απαρχής ρηγμάτωσης με την αρχή της ενεργού βλάβης..	237

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ
Του Βασιλείου Κάρλου

Σχηματισμός ρωγμών συγκολλητών κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων υπό σεισμικές καταπονήσεις

Επιβλέπων: Ιωάννης Βάγιας, Καθηγητής ΕΜΠ

Περίληψη

Ο βασικότερος στόχος της παρούσας διατριβής ήταν η ανάπτυξη μια απλής μεθοδολογίας που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την επιλογή της ποιότητας χάλυβα με κριτήριο το σχηματισμό ρωγμών σε συγκολλητούς κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων υπό σεισμικές καταπονήσεις. Η μέθοδος αναπτύχθηκε στα πλαίσια κοινού Ευρωπαϊκού Προγράμματος με το όνομα “Modern Plastic Design for Steel Structures”, αποκαλούμενου εν συντομία PLASTOTOUGH.

Σκοπός του προγράμματος αυτού ήταν η πρόβλεψη της περιοχής και του μέγιστου αριθμού κύκλων φόρτισης στους οποίους δημιουργείται μια ρωγή υπό συνθήκες ανακυκλιζόμενων φορτίσεων, ανάλογα με την ποιότητα χάλυβα της κατασκευής συγκολλητών κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων. Με τον τρόπο αυτό γίνεται εφικτή η αποφυγή πρόωρων αστοχιών εξαιτίας εκτεταμένης ρηγμάτωσης που παρουσιάστηκαν σε πρόσφατα σεισμικά γεγονότα (Northridge, Kobe, Tohoku).

Η μεθοδολογία που αναπτύσσεται έχει ως βάση τις αρχές της μηχανικής της βλάβης προκειμένου να προσομοιωθεί η δημιουργία μιας ρωγμής στο χάλυβα. Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της βαθμιαίας αστοχίας του υλικού είναι οι τοπικές παραμορφώσεις και η εντατική του κατάσταση. Ο συνδυασμός των παραμέτρων αυτών, αποτελεί κριτήριο της ύπαρξης ρωγμών εξαιτίας της φόρτισης που μπορεί να οδηγήσουν σε αστοχία της σύνδεσης.

Η παρούσα διατριβή κινείται σε δύο άξονες. Αφενός, το υλικό των κόμβων μελετήθηκε εκτενώς ώστε να προκύψουν οι βασικές του ιδιότητες, όπως το όριο διαρροής και θραύσης, οι παράμετροι κράτυνσης και οι καμπύλες βλάβης μέσω της χρήσης εφελκόμενων δοκιμών με και χωρίς εγκοπή. Αφετέρου, εξετάστηκαν πειραματικά και αναλυτικά συγκολλητές συνδέσεις δοκών-υποστυλωμάτων με ιστορικά φόρτισης που προέκυψαν από την εφαρμογή χρονοϊστοριών διαφόρων σεισμικών γεγονότων σε οκτώ διαφορετικούς τύπους κτιρίων. Αναπτύχθηκε μία μέθοδος βασισμένη στις καμπύλες βλάβης η οποία επέτρεψε την πρόβλεψη της έναρξης της ρηγμάτωσης εμφανίζοντας καλή σύγκλιση ανάμεσα σε πειραματικά και αναλυτικά αποτελέσματα. Αυτά αποτυπώθηκαν σε καμπύλες $S-N$, παρόμοιες με αυτές που προτείνονται από τον EN1993 για την περίπτωση της κόπωσης, όπου για τη μεταβλητή του S χρησιμοποιήθηκαν οι στροφές του συγκολλητού κόμβου και για το N ο αριθμός των κύκλων φόρτισης. Οι καμπύλες $S-N$ χαρακτηρίζονται από την ευκολία εφαρμογή τους στην καθημερινή πρακτική καθώς έχουν χρησιμοποιηθεί ευρύτατα κατά τον υπολογισμό της αστοχίας διαφόρων γεωμετριών έναντι κόπωσης.

Η μεθοδολογία εφαρμόστηκε σε διαφορετικές γεωμετρίες, ώστε να εξεταστεί η επίδραση της διατομής της δοκού, της τεχνικής συγκόλλησης και της παρουσίας βοηθητικών οπών ή μεταλλικών υποθεμάτων στη ρίζα της συγκόλλησης της δοκού.

Δημοσιεύσεις

Τεχνικές Εκθέσεις:

- PLASTOTOUGH: Modern Plastic Design of Steel Structures. Research Fund for Coal and Steel RDT, RFSR-CT-2005-00039, Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel, Final Report, (not yet published).
- V. Karlos , M. Feldmann, B. Eichler, D. Schäfer, B. Hoffmeister, J. Kuck, G. Sedlacek, I. Vayas (2011) “Choice of steel material for the plastic design of steel frames including seismic resistant structures“, JRC Scientific and Technical Reports, (not yet published).

Επιστημονικά περιοδικά:

- V. Karlos , M. Feldmann, B. Eichler, D. Schäfer, G. Sedlacek, I. Vayas, and A. Spiliopoulos (2011) “Toughness requirements for plastic design with structural steel”, Steel Construction, Volume 4, Issue 2, 2011, pp. 94-113.
- V. Karlos, I. Vayas (2012) “Ultra-Kurzzeitermüdung geschweisster Träger-Stützen Knotenverbindungen aus Stahl“, Bauingenieur, Band 87, März 2012, pp.130-136.

Διεθνή συνέδρια:

- V. Karlos , I. Vayas (2011). “Crack Initiation at Steel Welded Connections” European Conference on Steel Structures "EUROSTEEL 2011", Budapest, Hungary, 31 August-2 September 2011.
- V. Karlos , M. Feldmann, D. Schaefer, B. Eichler, A. Spiliopoulos, I. Vayas (2009). “An Upper Shelf Criterion for the Choice of Steel based on Damage Mechanics”, 33rd IABSE Symposium, Bangkok, Thailand, 9-11 September 2009.
- V. Karlos , A. Spiliopoulos, I. Vayas (2009). “Prediction of Crack Formation at Steel Welded Beam-to-Column Joints under Cyclic Loading” STESSA 2009, Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas, Philadelphia, 16-20 August 2009.
- V. Karlos , A. Spiliopoulos, I. Vayas (2008). “Prediction of ductile/brittle failure of steel joints”, European Conference on Steel Structures "EUROSTEEL 2008", Graz, Austria, 3–5 September 2008.
- V. Karlos , A. Spiliopoulos, I. Vayas (2008). “Inelastic deformation requirements for steel buildings”, European Conference on Steel Structures "EUROSTEEL 2008", Graz, Austria, 3–5 September 2008.

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES

PhD THESIS
by Vasilis Karlos

Crack initiation at welded beam-to-column connections under seismic loading

Supervisor: Ioannis Vayas, Professor NTUA

Abstract

The primary object of this dissertation was the development of a simple methodology that could be used for choosing the appropriate steel quality in terms of crack initiation at welded beam-to-column connections under seismic loading. These investigations were part of a joint European research project, named “Modern Plastic Design for Steel Structures” or, in short, PLASTOTOUGH.

The objective of this project was to predict the moment and location of crack initiation under cyclic loading, according to the used steel at welded beam-to-column connections in moment resisting frames. The success in such prediction ensures that premature failure due to extensive cracking as was witnessed during recent seismic events (Northridge, Kobe, Tohoku) will be avoided.

In order to simulate crack initiation and propagation within the used steel, an approach based on damage mechanics concepts was used. Progressive failure of the material is computed through local variables such as plastic strains and stress triaxiality values. The critical combination of these variables as computed through extensive experimental and analytical studies serves as the criterion for crack initiation.

The current thesis is divided in two basic parts. Firstly, the material of the joints was extensively tested and analysed, in order to derive its basic properties, such as its yield and tensile strength, its hardening parameters and its damage curve. The derivation of these values was performed by the use of smooth and notched tensile specimens. Secondly, fillet and butt welded beam-to-column connections were tested both experimentally and numerically with deformation histories defined from the application of earthquake time histories to eight different building configurations. A damage concept based on the use of damage curves that allowed for the prediction of crack formation was able to show good compliance between the experimental and numerical results. The results were plotted against an S-N curve similar to those proposed from EN1993-1-9 for high cycle fatigue, where S reflects deformation demand range rather than applied stress range. S-N curves provide an easy tool for estimating the damage of a joint during a seismic event, as they are similar to those used for failure evaluation purposes in high cycle fatigue.

The technique was applied to different geometrical configurations, examining the influence of the beam’s profile, the welding technique and the presence of weld access holes or backing bars at the welded joint.

Publications

Technical reports:

- PLASTOTOUGH: Modern Plastic Design of Steel Structures. Research Fund for Coal and Steel RDT, RFSR-CT-2005-00039, Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel, Final Report, (not yet published).
- V. Karlos , M. Feldmann, B. Eichler, D. Schäfer, B. Hoffmeister, J. Kuck, G. Sedlacek, I. Vayas (2011) “Choice of steel material for the plastic design of steel frames including seismic resistant structures“, JRC Scientific and Technical Reports, (not yet published).

Civil engineering journals:

- V. Karlos , M. Feldmann, B. Eichler, D. Schäfer, G. Sedlacek, I. Vayas, and A. Spiliopoulos (2011) “Toughness requirements for plastic design with structural steel”, Steel Construction, Volume 4, Issue 2, 2011, pp. 94-113.
- V. Karlos, I. Vayas (2012) “Ultra-Kurzzeitermüdung geschweisster Träger-Stützen Knotenverbindungen aus Stahl“, Bauingenieur, Band 87, März 2012, pp.130-136.

International conferences:

- V. Karlos , I. Vayas (2011). “Crack Initiation at Steel Welded Connections” European Conference on Steel Structures "EUROSTEEL 2011", Budapest, Hungary, 31 August-2 September 2011.
- V. Karlos , M. Feldmann, D. Schaefer, B. Eichler, A. Spiliopoulos, I. Vayas (2009). “An Upper Shelf Criterion for the Choice of Steel based on Damage Mechanics”, 33rd IABSE Symposium, Bangkok, Thailand, 9-11 September 2009.
- V. Karlos , A. Spiliopoulos, I. Vayas (2009). “Prediction of Crack Formation at Steel Welded Beam-to-Column Joints under Cyclic Loading” STESSA 2009, Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas, Philadelphia, 16-20 August 2009.
- V. Karlos , A. Spiliopoulos, I. Vayas (2008). “Prediction of ductile/brittle failure of steel joints”, European Conference on Steel Structures "EUROSTEEL 2008", Graz, Austria, 3–5 September 2008.
- V. Karlos , A. Spiliopoulos, I. Vayas (2008). “Inelastic deformation requirements for steel buildings”, European Conference on Steel Structures "EUROSTEEL 2008", Graz, Austria, 3–5 September 2008.

Πρόλογος

Οι μεταλλικές κατασκευές αποτελούν μια κατηγορία δομικών έργων οι οποίες κερδίζουν έδαφος ως προς τη χρησιμοποίησή τους στη σημερινή πρακτική. Τα πλεονεκτήματα που τις χαρακτηρίζουν, όπως η ολκιμότητα του χάλυβα, η μεγάλη ταχύτητα ανέγερσης, το μικρό τους βάρος και η πολύ καλή συμπεριφορά σε ανακυκλιζόμενες φορτίσεις μέσω των μηχανισμών απορρόφησης ενέργειας που έχουν, έχει επεκτείνει τη χρήση τους σε περιοχές μεγάλης σεισμικότητας.

Η επικρατούσα άποψη της εξαιρετικής αντισεισμικής συμπεριφοράς κλονίστηκε μετά τους σεισμούς του Northridge στην Καλιφόρνια και του Kobe στην Ιαπωνία, όπου παρατηρήθηκαν εκτεταμένες βλάβες σε συγκολλητές συνδέσεις δοκών-υποστυλωμάτων. Παρά το γεγονός ότι δεν παρατηρήθηκαν καταρρεύσεις δομημάτων από χάλυβα, εντούτοις ο ψαθυρός τρόπος αστοχίας των συνδέσεων χωρίς προηγουμένως να έχει υπάρξει εμφανής διαρροή προβλημάτισε τη διεθνή επιστημονική κοινότητα. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο η επιλογή της κατάλληλης ποιότητας χάλυβα σε όρους αντοχής έναντι κρούσης απέκτησε ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς μια τέτοια εξέλιξη θα απέτρεπε μηχανισμούς αστοχίας ψαθυρής φύσεως.

Το αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η εύρεση μιας διαδικασίας βάση της οποίας θα μπορεί να γίνει επιλογή ενός χάλυβα σύμφωνα με την αντοχή του έναντι κρούσης ώστε να μπορεί να ανταπεξέλθει υπό ανακυκλιζόμενες συνθήκες φόρτισης, όπως είναι οι σεισμικές δράσεις. Η προτεινόμενη διαδικασία ερευνά τη απαρχή ρηγμάτωσης στο χάλυβα στην περιοχή συγκολλητών συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος σε πλαίσια ροπή. Η δημιουργία και επέκταση των ρωγμών αυτών είναι υπεύθυνες για την τελική αστοχία της σύνδεσης, όπως αποδείχθηκε κατά τις έρευνες που ακολούθησαν τα σεισμικά γεγονότα του Northridge και του Kobe. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ο σχηματισμός πινάκων όμοιων με αυτούς που προτείνει ο EN1993 για την περίπτωση της κόπωσης. Με τον τρόπο αυτό γίνεται άμεση συσχέτιση της ιστορίας φόρτισης στην οποία καλείται να ανταπεξέλθει η κατασκευή και της αντοχής της ποιότητας χάλυβα σε όρους ρηγμάτωσης, έτσι ώστε να γίνεται τελικά εφικτή η επιλογή της κατάλληλης ποιότητας υλικού.

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μια γενική εισαγωγή σε μορφές αστοχίας ψαθυρής φύσεως που παρατηρήθηκαν στο παρελθόν σε μεταλλικές κατασκευές. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στις αστοχίες που παρατηρήθηκαν εξαιτίας των σεισμικών φορτίσεων του Northridge και του Kobe καθώς και στα πιθανά αίτια που οδήγησαν σε αυτού του τύπου τα προβλήματα. Δίνεται επίσης μια σύντομη περιγραφή νέων συστημάτων τα οποία προτάθηκαν για τη βελτίωση της συμπεριφοράς συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος υπό ανακυκλιζόμενες φορτίσεις ενώ μέσα από αυτή τη διαδικασία επισημαίνεται η ανάγκη ανάπτυξης μιας διαδικασίας ελέγχου και πρόβλεψης αστοχιών τέτοιου τύπου.

Στο Κεφάλαιο 2, γίνεται περίληψη των κανόνων που ισχύουν για την εφαρμογή πλαστικής ανάλυσης στις μεταλλικές κατασκευές και πραγματοποιείται προεπισκόπηση των μεθόδων για την επιλογή ενός υλικού προκειμένου να αποφευχθεί ψαθυρού τύπου αστοχία. Ταυτόχρονα, γίνεται αναφορά στην επίδραση που έχουν οι εναπομείνουσες τάσεις εξαιτίας των συγκολλήσεων καθώς και της ταχύτητας φόρτισης στη συμπεριφορά των συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η ανάλυση των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία. Συγκεκριμένα γίνεται αναφορά στα αποτελέσματα των εφελκυστικών και των δοκιμών Charpy, της χημικής σύστασης και της κοκκομετρικής ανάλυσης των υλικών. Μέσω αυτής της διαδικασίας καθορίζεται η τιμή του χαρακτηριστικού μήκους, η οποία είναι απαραίτητη για την επιλογή του μεγέθους των πεπερασμένων στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν κατά τις αναλυτικές διεργασίες.

Τα Κεφάλαια 4 και 5 σχετίζονται με τις πειραματικές διερευνήσεις συγκολλητών κόμβων δοκού-υποστυλώματος που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Στο κεφάλαιο 4 μετά από μια εισαγωγή στα βασικά χαρακτηριστικά των μεταλλικών φορέων, περιγράφεται η μέθοδος που ακολουθήθηκε για τον καθορισμό της χρονοϊστορίας φόρτισης των συνδέσεων της εργασίας. Για το σκοπό πραγματοποιήθηκαν τρισδιάστατες και δισδιάστατες αναλύσεις σε προσομοιώματα κτιρίων υπό δέκα διαφορετικά επιταχυνσιογραφήματα ελληνικών και διεθνών σεισμικών καταγραφών. Με βάση την ανάλυση αυτή προέκυψε η χρονοϊστορία πλαστικών στροφών για κάθε κόμβο η οποία και εφαρμόστηκε στη συνέχεια στην πειραματική διάταξη. Η γεωμετρία και τα αποτελέσματα των μονοτονικών και ανακυκλιζόμενων φορτίσεων στις συγκολλητές συνδέσεις δοκού-υποστυλώματος περιγράφονται στο Κεφάλαιο 5.

Στα Κεφάλαια 6 και 7 περιγράφονται οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων. Στο Κεφάλαιο 6 δίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των κόμβων δοκού-υποστυλώματος με πεπερασμένα στοιχεία. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στο μοντέλο του υλικού που χρησιμοποιήθηκε και το οποίο έλαβε υπόψη του τα συστατικά κράτησης του υλικού, μέσω αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν σε εφελκυστικά δοκίμια. Στο Κεφάλαιο 7 αναλύεται η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη της απαρχής ρωγμών στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και η οποία έχει ως βάση της τις αρχές της μηχανικής της βλάβης. Ταυτόχρονα γίνεται αναφορά και σε άλλα γνωστά μοντέλα αστοχίας τα οποία είχαν αρχικά εξεταστεί ως προς την εφαρμογή τους στα πλαίσια της εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 8 γίνεται επεξεργασία των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Η επεξεργασία αυτή οδηγεί τελικά σε πίνακες S-N όμοιους με αυτούς για την περίπτωση της κόπωσης. Ο ορισμός των παραμορφώσεων γίνεται σε όρους ολικών στροφών του κόμβου δοκού-υποστυλώματος. Η χρήση αυτών των πινάκων απελευθερώνει το μελετητή από την αναγκαιότητα των κοπιαστικών αναλύσεων που θα έπρεπε να πραγματοποιηθούν και του δίνει απαντήσεις ως προς την καταλληλότητα ενός χάλυβα.

Στα Κεφάλαια 9 και 10 αναλύεται η επίδραση που έχουν κατασκευαστικές λεπτομέρειες σε συγκολλητές συνδέσεις δοκού-υποστυλώματος με βάση των αρχή της ενεργού βλάβης η οποία περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 8. Στο Κεφάλαιο 9 αναλύεται η επίδραση της παρουσίας οπών συγκόλλησης στον κορμό της δοκού και γίνεται σύγκριση μεταξύ δύο διαφορετικών γεωμετριών ώστε να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση της κάθε μίας στην αντοχή του κόμβου. Στο Κεφάλαιο 10 γίνεται αναφορά στην επίδραση της παρουσίας βοηθητικών υποθεμάτων συγκόλλησης στις δοκούς των συνδέσεων, τεχνική η οποία ήταν ιδιαίτερα διαδεδομένη στην περιοχή του Los Angeles των ΗΠΑ.

Τέλος στο Κεφάλαιο 11 συνοψίζονται τα βασικότερα συμπεράσματα τα οποία αφορούν τη διαδικασία που ακολουθήθηκε για την επιλογή της κατάλληλης ποιότητας χάλυβα ως προς την αντοχή του έναντι κρούσης για κατασκευές οι οποίες

υπόκειται σε σεισμικά φορτία. Σημειώνεται ότι η παρούσα διατριβή κάνει μια πρώτη προσέγγιση στο θέμα της πρόβλεψης της απαρχής ρηγματώσεων σε δομικούς χάλυβες σε μια συγκεκριμένη γεωμετρία συνδέσεων. Με αυτό ως δεδομένο, στο Κεφάλαιο 11 αναφέρονται μερικές προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση του θέματος οι οποίες δεν αποτέλεσαν αντικείμενο έρευνας στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

Στο Κεφάλαιο 12 παρατίθενται τα στοιχεία για τις βιβλιογραφικές αναφορές του κειμένου, κατά σειρά εμφάνισης μέσα στην εργασία. Στο τέλος της εργασίας υπάρχουν πέντε παραρτήματα στα οποία παρατίθεται συνοπτικά το σύνολο των πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων του υλικού και των συνδέσεων δοκών-υποστυλωμάτων, καθώς στο κυρίως κείμενο της διατριβής επιλέχθηκε να αναλυθεί διεξοδικά ένα μόνο από τα πειράματα.

Στο σημείο αυτό οφείλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή ΕΜΠ κ. Ιωάννη Βάγια χωρίς τη βοήθεια του οποίου δεν θα είχε πραγματοποιηθεί η παρούσα έρευνα. Εκτός από τις πολύτιμες γνώσεις και συμβουλές του στο γνωστικό αντικείμενο της εργασίας, οφείλω να τον ευχαριστήσω για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο, το οποίο εκτός από τη θεωρητική του φύση είχε πρακτικές προεκτάσεις μέσω των πειραμάτων που διεξήχθησαν. Είναι χαρακτηριστικό ότι παρά τα όποια προσωπικά και μη εμπόδια ενέκυψαν στο μεγάλο αυτό χρονικό διάστημα της συνεργασίας μας, ήταν πάντα στη διάθεσή μου πρόθυμος να με βοηθήσει και να με καθοδηγήσει στο δύσκολο έργο της έρευνας και της συγγραφής. Δεν είναι εύκολο να αποτυπώσω τον ειλικρινή θαυμασμό και την εκτίμηση που τρέφω για το πρόσωπό του καθώς μέσα από την πολυετή γνωριμία μας, η οποία ανάγεται από τη διπλωματική μου εργασία σε προπτυχιακό επίπεδο, έχει αποτελέσει πρότυπο όχι μόνο καθηγητή, αλλά και ανθρώπου.

Ιδιαίτερος οφείλω να ευχαριστήσω τα μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής, κ. Ιωάννη Ερμούπουλο (καθηγητή ΕΜΠ), κ. Γεώργιο Ιωαννίδη (καθηγητή ΕΜΠ) και κ. Χαράλαμπο Γαντέ (καθηγητή ΕΜΠ) για τις πολύτιμες συμβουλές και παραινέσεις τους σε όλο το χρονικό διάστημα που χρειάστηκε για την ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής.

Είναι επίσης ιδιαίτερα σημαντικό να ευχαριστήσω όλους τους συντελεστές του προγράμματος PLASTOTOUGH, στα πλαίσια του οποίου πραγματοποιήθηκαν οι πειραματικές και πολλές από τις αναλυτικές διεργασίες της παρούσας εργασίας. Ξεχωριστή μνεία αξίζει στους συντελεστές από το RWTH πολυτεχνείου του Aachen, κ. Markus Feldmann (καθηγητή RWTH, Γερμανία) και των συναδέλφων κ. Dirk Schäfer (RWTH, Γερμανία), κ. Bjorn Eichler (RWTH, Γερμανία) και κ. Lars Amlung (RWTH, Γερμανία) για τη φιλοξενία και τη βοήθειά τους κατά τη διάρκεια της παραμονής μου στο πολυτεχνείο του Aachen. Τέλος, εξαιρετικά πολύτιμη ήταν η συμβολή του συναδέλφου κ. Ανδρέα Σπηλιόπουλου (ΕΜΠ) με τον οποίο συνυπήρξαμε στα πλαίσια του προγράμματος αυτού και με τον οποίο μοιραστήκαμε πολλές απόψεις, αγωνίες και αναζητήσεις.

Ταυτόχρονα οφείλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον κ. Αθανάσιο Σκάρπα (καθηγητής Delft, Ολλανδία) και στους συναδέλφους κ. Niki Kringos (Delft, Ολλανδία), κ. Core Kasbergen (Delft, Ολλανδία) και κ. Edwin Swart (Delft, Ολλανδία) για τη συνεργασία και την εξάισια φιλοξενία κατά το διάστημα της παραμονής μου στο Delft της Ολλανδίας, καθώς και για τις λύσεις που έδωσαν σε κρίσιμα σημεία της διδακτορικής μου διατριβής.

Για τη συμβολή τους σε θέματα που άπτονται τόσο της διδακτορικής διατριβής όσο και της γενικότερης συνύπαρξης και συνεργασίας οφείλω να ευχαριστήσω θερμά όλους τους υποψήφιους διδάκτορες του εργαστηρίου μεταλλικών κατασκευών του ΕΜΠ και συγκεκριμένα τους συναδέλφους Κατερίνα Μαρινέλλη, Μαρία-Ελένη Δασίου, Μαριλένα Παπαγεωργίου, Γεωργία Δούγκα, Δανάη Δημακογιάννη, Παύλο Θανόπουλο, Κώστα Αδαμάκο, Θοδωρή Αδαμάκο, Χριστόφορο Δημόπουλο και Κωστή Καλοχαιρέτη.

Σε προσωπικό επίπεδο, η διατριβή αυτή οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη στήριξη της οικογένειάς μου, είτε σε υλικό είτε σε ψυχολογικό επίπεδο. Ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου για τη συμπαράσταση σε όλες τις αποφάσεις που έχω λάβει μέχρι τώρα και την ανιδιοτελή αγάπη τους και στον αδερφό μου για τις παραινέσεις και τις προτάσεις του. Γνωρίζω ότι θα είναι πάντα εκεί σε ότι και αν χρειαστώ στη ζωή μου και για το λόγο αυτό τους οφείλω αιώνια ευγνωμοσύνη.

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η μελέτη σχηματισμού ρωγμών συγκολλητών κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων υπό σεισμικές καταπονήσεις. Ειδικότερα, παρουσιάζεται μια μεθοδολογία, με χρήση της οποίας γίνεται εφικτή η πρόβλεψη δημιουργίας ρηγματώσεων σε συγκολλητούς κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων πλαισίων ροπή τα οποία υποβάλλονται σε ανακυκλιζόμενη ιστορία φόρτισης.

Η μεθοδολογία αυτή αναπτύχθηκε στα πλαίσια κοινού Ευρωπαϊκού Ερευνητικού Προγράμματος, με το όνομα “PLASTOTOUGH-Modern Plastic Design for Steel Structures” ή “Σύγχρονος Πλαστικός Σχεδιασμός Κατασκευών από Χάλυβα”, αποκαλούμενου εν συντομία PLASTOTOUGH. Στο ερευνητικό πρόγραμμα, το οποίο εν μέρει χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Κοινότητα Άνθρακα και Χάλυβα (European Coal and Steel Community), συμμετείχαν δύο πανεπιστήμια και δύο χαλυβουργίες:

- Το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ελλάδα
- Το Πολυτεχνείο του Aachen (RWTH, Aachen), Γερμανία
- Η χαλυβουργία του Peine (Peiner Träger GmbH), μέλος του Ομίλου Salzgitter, με έδρα τη την κωμόπολη του Peine στη Γερμανία
- Η χαλυβουργία του Vitkovice (EVRAZ Vitkovice Steel), μέλος του Ομίλου EVRAZ με έδρα την πόλη της Ostrava στην Τσεχία

Η χαλυβουργία Peiner Träger GmbH προμήθευσε το χάλυβα για τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο Πολυτεχνείο του Aachen, ενώ μέρος της επεξεργασίας των πειραματικών αποτελεσμάτων, οι αναλυτικές και αριθμητικές διερευνήσεις πραγματοποιήθηκαν στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο[1]. Στη χαλυβουργία EVRAZ Vitkovice Steel πραγματοποιήθηκαν πειραματικές αναλύσεις της χημικής σύστασης και των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων του χρησιμοποιούμενου χάλυβα.

Η τεχνική που θα αναπτυχθεί στην παρούσα διατριβή είναι μέρος μόνο του ερευνητικού προγράμματος. Για την αναζήτηση περαιτέρω πληροφοριών σχετικά με τους στόχους του προγράμματος, ο αναγνώστης παραπέμπεται στη βιβλιογραφία[2]. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο παρόν προέκυψαν από πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο Πολυτεχνείο του Aachen και στη χαλυβουργία EVRAZ Vitkovice Steel. Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων, εξαιρουμένων αυτών της κράτνσης του υλικού, πραγματοποιήθηκαν στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο Aachen και οι αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιήθηκαν από το συγγραφέα της παρούσας διατριβής υπό τον επιβλέποντα καθηγητή ΕΜΠ Βάγια Ιωάννη.

Οι κύριοι στόχοι της μεθόδου που θα αναπτυχθεί στη συνέχεια είναι:

- Η όλκιμη δημιουργία ρωγμών σε συγκολλητές χαλύβδινες συνδέσεις υπό ανακυκλιζόμενες συνθήκες φόρτισης σταθερού και μεταβαλλόμενου εύρους. Συγκεκριμένα, οι κρίσιμες ρωγμές, οι οποίες είναι υπεύθυνες για την τελική αστοχία της σύνδεσης, σχηματίζονται είτε στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη της συγκόλλησης (εσωραφή ή εξωραφή) είτε στην περιοχή σχηματισμού της πλαστικής άρθρωσης.
- Η δημιουργία σχέσεων, ανάλογων με τις καμπύλες Wöhler που προτείνονται από τον EN1993-1-9[3] με σκοπό τη διευκόλυνση του μελετητή μηχανικού ως προς την εύρεση της

αντοχής συγκολλητών συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος σε όρους δημιουργίας ρωγμών στη σύνδεση.

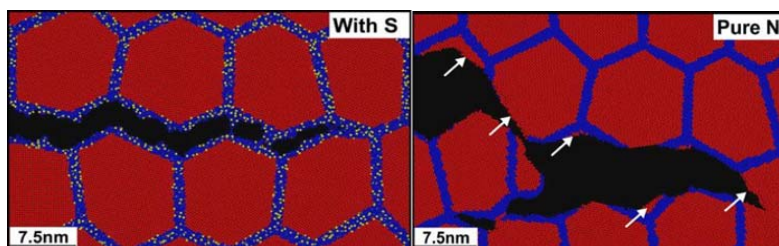
- Η επίδραση της ύπαρξης συνήθων κατασκευαστικών λεπτομερειών στις συγκολλητές συνδέσεις δοκού-υποστυλώματος, όπως βοηθητικών υποθεμάτων και οπών συγκόλλησης στις διατομές των δοκών του κόμβου, καθώς και πιθανές εναλλακτικές διατάξεις με στόχο τη μεγαλύτερη αντοχή ως προς τη δημιουργία ρωγμών.

Στη συνέχεια γίνεται αναδρομή στα προβλήματα θραύσης χαλύβδινων συγκολλητών κατασκευών που έχουν απασχολήσει τη διεθνή επιστημονική κοινότητα και περιγράφεται η ανάγκη για τη δημιουργία ενός αξιόπιστου μηχανισμού πρόβλεψης τέτοιου τύπου αστοχιών.

1.2 Βασικά χαρακτηριστικά θραύσης των υλικών

Η θραύση ενός υλικού εξαρτάται από πληθώρα παραγόντων, όπως τη φύση και την ταχύτητα επιβολής του φορτίου, τη θερμοκρασία, τη χημική σύσταση και την κοκκομετρία του υλικού.

Η θραύση διακρίνεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο διαχωρισμού των επιφανειών που λαμβάνουν μέρος σε αυτή. Η πρώτη είναι γνωστή ως περικρυσταλλική (intergranular) και η δεύτερη ως ενδοκοκκώδης (transgranular) θραύση. Στο Σχήμα 1.1 φαίνεται η διαφορά των δύο μορφών θραύσης για την περίπτωση του καθαρού Νικελίου και της πρόσμιξής του με θείο. Στην περίπτωση της περικρυσταλλικής θραύσης ο διαχωρισμός πραγματοποιείται στη διεπιφάνεια μεταξύ των κόκκων του υλικού, ενώ στην περίπτωση της ενδοκοκκώδους θραύσης κατά το διαχωρισμό τέμνονται και κόκκοι του υλικού.



Σχήμα 1.1: Περικρυσταλλική (αριστερά) και ενδοκοκκώδης (δεξιά) θραύση για την περίπτωση του νικελίου [4]

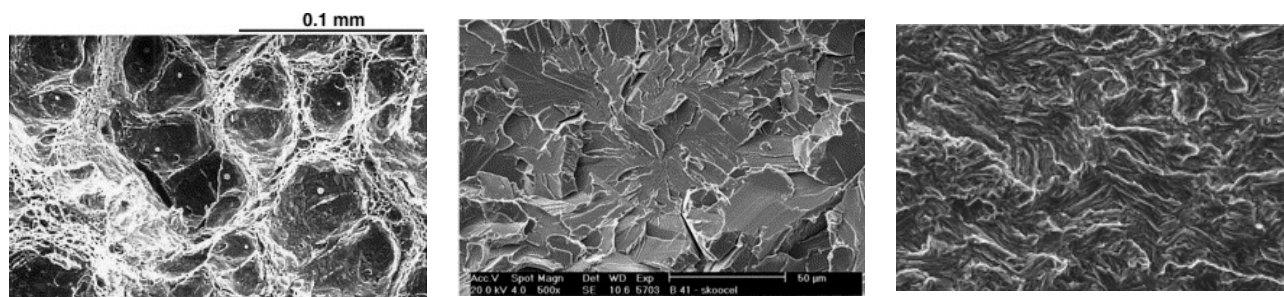
Η περικρυσταλλική θραύση συναντάται συνηθέστερα σε υψηλές θερμοκρασίες και σε φαινόμενα ερπυσμού ή κόπωσης. Η παρουσία φορτίσεων μακράς διάρκειας καθώς και ανακυκλιζόμενες φορτίσεις μικρής έντασης με ταυτόχρονη παρουσία υψηλών θερμοκρασιών, έχουν σαν αποτέλεσμα το διαχωρισμό του υλικού μεταξύ των κόκκων του και όχι διαμέσου αυτών, όπως συμβαίνει σε φορτίσεις μεγαλύτερης έντασης ή κατά τη διάρκεια συγκολλήσεων. Ειδικά στην περίπτωση των συγκολλήσεων, το υλικό κατά την ψύξη του υπόκειται σε μεγάλες παραμορφώσεις οι οποίες οδηγούν στο σχηματισμό ρωγμών που προκαλούν ενδοκοκκώδη θραύση του μετάλλου. Η ύπαρξη διαβρωτικού περιβάλλοντος σε συνδυασμό με φορτίσεις μικρής έντασης, έχει ως αποτέλεσμα η θραύση του υλικού να έχει περικρυσταλλική δομή εξαιτίας της εισχώρησης οξειδίων ανάμεσα στους κόκκους του υλικού.

Στα μέταλλα είναι γνωστοί και άλλοι δύο μηχανισμοί θραύσης οι οποίοι μπορούν να ενσωματωθούν στην κατηγορία της ενδοκοκκώδους θραύσης. Ο πρώτος εκμεταλλεύεται την ολκιμότητα των μετάλλων, με αποτέλεσμα η αστοχία να επέρχεται εξαιτίας του σχηματισμού και της συνένωσης μικροκενών στο σώμα του υλικού. Ο μηχανισμός αυτός είναι γνωστός ως ολκιμος μηχανισμός δημιουργίας ρωγμών. Ο δεύτερος μηχανισμός έχει να κάνει με την ολιγοκυκλική κόπωση του υλικού που προκαλείται από επαναλαμβανόμενες χρονοϊστορίες φόρτισης σταθερού ή

μεταβαλλόμενου εύρους. Η αστοχία λόγω ολιγοκυκλικής κόπωσης βασίζεται στην επέκταση υπαρχουσών ρωγμών στο σώμα του υλικού, μέσω της σταδιακής αύξησης των παραμορφώσεων στην ακμή της ρωγμής κατά τις διαδοχικές φορτίσεις.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής ο σχηματισμός των ρωγμών δεν ακολουθεί την ενδοκοκκώδη δομή, καθώς δεν εξετάζονται αστοχίες εξαιτίας ερπυσμού, υψηλής θερμοκρασίας ή διαβρωτικότητας του περιβάλλοντος. Αντίθετα, έμφαση δίνεται στον όλκιμο μηχανισμό θραύσης ο οποίος χαρακτηρίζει τις μορφές αστοχίας που παρατηρήθηκαν στις συνδέσεις δοκού-υποστυλώματος που εξετάστηκαν.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μορφή των επιφανειών σε δοκίμια τα οποία έχουν υποστεί θραύση, ανάλογα με τον τύπο αστοχίας που έλαβε χώρα. Στο Σχήμα 1.2 φαίνονται χαρακτηριστικά παραδείγματα επιφανειών θραύσης υπό τη μεγέθυνση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου. Από το Σχήμα 1.2 συμπεραίνουμε ότι στην περίπτωση όλκιμης αστοχίας, η επιφάνεια θραύσης εμφανίζει πολλά εξογκώματα και πτυχώσεις εξαιτίας των μεγάλων παραμορφώσεων στις οποίες υπόκειται το υλικό πριν το διαχωρισμό του. Στην περίπτωση ψαθυρής αστοχίας η επιφάνεια θραύσης χαρακτηρίζεται από εγκοπές και πιο έντονη υφή. Αντίθετα, όταν η επιφάνεια αστοχίας προέρχεται από κόπωση του μετάλλου, η υφή είναι πιο λεία ενώ στο υλικό παρατηρούνται κυματισμοί που σχηματίζονται εξαιτίας των επαναλαμβανόμενων φορτίσεων και της προοδευτικής μορφής της βλάβης.



Σχήμα 1.2: Μορφή επιφάνειας αστοχίας για όλκιμη (αριστερά) [5], ψαθυρή (μέσο) [6] και θραύση λόγω κόπωσης (δεξιά) [7]

1.3 Αστοχίες ψαθυρής μορφής

1.3.1 Ιστορικό αστοχιών

Με τον όρο της ψαθυρής αστοχίας σε κατασκευές από χάλυβα, περιγράφονται συνήθως θραύσεις στις οποίες δεν έχει υπάρξει εμφανής διαρροή του υλικού. Δηλαδή, η κατασκευή κατά τη φόρτισή της δεν μπόρεσε να εκμεταλλευτεί την ολκιμότητα του υλικού αλλά αστοχεί απότομα, με άμεση απώλεια της φέρουσας ικανότητάς της. Ωστόσο, σε πολλές από αυτές τις περιπτώσεις η δημιουργία και αύξηση του μήκους μιας ρωγμής ακολουθεί τον όλκιμο μηχανισμό και μόνο στο τελευταίο στάδιο πριν την αστοχία η επέκταση της ρωγμής γίνεται με απότομο τρόπο.

Οι πιο συνήθεις ψαθυρές αστοχίες λαμβάνουν χώρα στην περιοχή των συγκολλήσεων καθώς κατά την εφαρμογή τους ο χάλυβας υπόκειται σε αλλοίωση των χαρακτηριστικών του λόγω της υψηλής θερμοκρασίας στην οποία υποβάλλεται. Συγκεκριμένα, οι συγκολλήσεις χαρακτηρίζονται από υψηλές παραμένουσες τάσεις και από ρηγματώσεις οι οποίες δημιουργούνται κατά τη συστολή του χάλυβα λόγω της ψύξης του μετά το πέρας της συγκόλλησης. Επιπλέον, στη συγκόλληση μπορούν να εισέλθουν επιβλαβή εγκλείσματα, όπως σκωρία ή υδρογόνο, τα οποία έχουν δυσμενή επίδραση στην αντοχή του μέλους ή της σύνδεσης.

Οι πρώτες μεγάλες εκτεταμένες αστοχίες ψαθυρής μορφής παρατηρήθηκαν σε μεταλλικές αποθήκες (σιλό) καθώς και σε ορισμένες γέφυρες (γέφυρα Husselt στο Βέλγιο, 1938). Ωστόσο μεγάλη έμφαση δόθηκε όταν διαπιστώθηκαν αστοχίες σε μεγάλο αριθμό πλοίων τα οποία κατασκευάστηκαν την περίοδο του Δεύτερου Παγκοσμίου Πολέμου καθώς και σε επιβατικά αεροσκάφη. Τα πλοία αυτά κατασκευάζονταν με χρήση συγκολλήσεων οι οποίες όμως δεν είχαν χρησιμοποιηθεί προηγουμένως σε κατασκευές μεγάλης κλίμακας. Το αποτέλεσμα ήταν τα μισά σχεδόν από τα πλοία που κατασκευάστηκαν στις ΗΠΑ σε αυτή την περίοδο να παρουσιάσουν ολική ή μερική θραύση [8]. Είναι χαρακτηριστικό ότι 16 από τα πλοία αυτά (γνωστά με την ονομασία Liberty και 530T2) κόπηκαν στη μέση όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3. Η έρευνα που ακολούθησε αυτές τις αστοχίες κατέδειξε ως υπεύθυνα διάφορα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πλοίων καθώς και το υλικό που χρησιμοποιείτο στη συγκόλληση. Η βελτίωση της γεωμετρίας των συνδέσεων σε συνεργασία με τη πρόοδο της τεχνικής της συγκόλλησης είχε ως αποτέλεσμα τη δραστική μείωση φαινομένων ψαθυρής θραύσης σε πλοία μετά το 1960. Ωστόσο τέτοιου τύπου αστοχίες δεν εξαλείφθηκαν καθώς ο συνδυασμός χαμηλής θερμοκρασίας, διαβρωτικού περιβάλλοντος και επαναλαμβανόμενων φορτίσεων στα οποία υποβάλλεται ένα πλοίο κατά τη διάρκεια της ζωής του, το καθιστούν ευάλωτο σε ψαθυρής μορφής θραύσεις.



Σχήμα 1.3: Ολική αστοχία τάνκερ τύπου 530T2 το 1943 [9]

Μεγάλη αίσθηση προκάλεσαν και δύο αστοχίες επιβατικών αεροπλάνων (τύπου Comet) το 1954, τα οποία καταστράφηκαν εν ώρα πτήσης. Για τις ανάγκες της έρευνας που ακολούθησε και καθώς είχε απαγορευθεί η πτήση του συγκεκριμένου τύπου αεροσκαφών, έγιναν επαναλαμβανόμενες φορτίσεις της ατράκτου μέσα σε νερό προκειμένου να προσομοιωθεί η πίεση που ασκείται στο αεροσκάφος κατά τη διάρκεια της πτήσης. Από τα πειράματα εξακριβώθηκε ότι οι αστοχίες οφείλονταν στο σχηματισμό ρωγμών εξαιτίας κόπωσης του μετάλλου [10]. Η διαπίστωση αυτή οδήγησε σε πλήθος βελτιώσεων στο σχεδιασμό και τη διαδικασία ελέγχου των αεροσκαφών και των συγκολλήσεων οι οποίες πραγματοποιούνται σε αυτά. Παρόλα αυτά οι ψαθυρής μορφής αστοχίες δεν έχουν αποφευχθεί ολοκληρωτικά, παρά το γεγονός ότι μπορεί να έχουν ακόμα και σήμερα καταστροφικές συνέπειες. Στο Σχήμα 1.4 παρουσιάζεται η αστοχία της ατράκτου ενός αεροσκάφους, μεγέθους 1,50x0,30m και η οποία πραγματοποιήθηκε εν ώρα πτήσης το 2011.

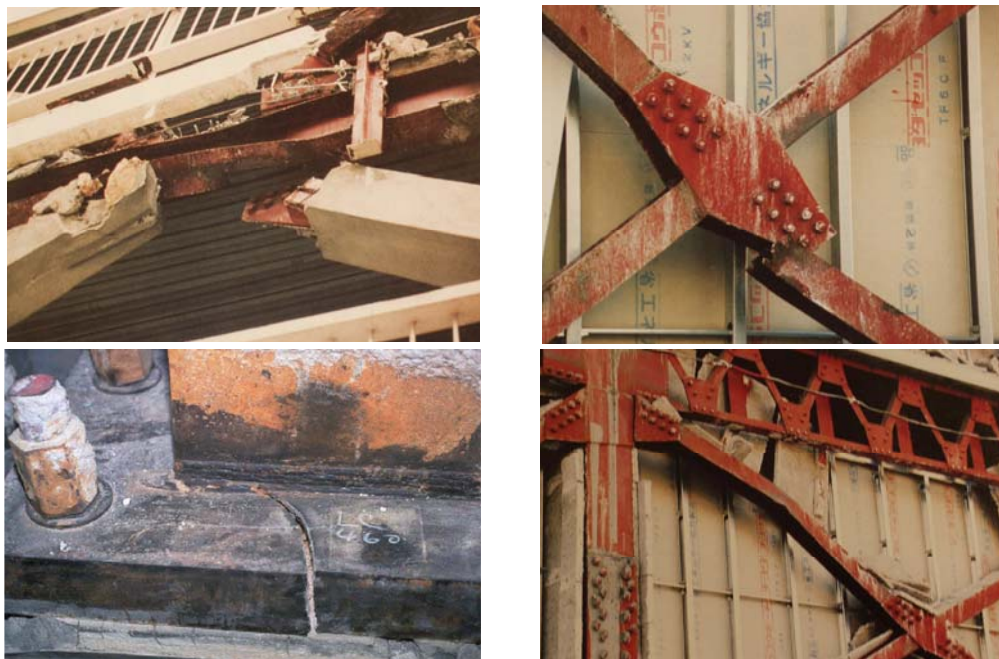


Σχήμα 1.4: Ψαθυρή αστοχία λόγω κόπωσης στην άτρακτο ενός αεροσκάφους [11]

1.3.2 Αστοχίες λόγω σεισμού

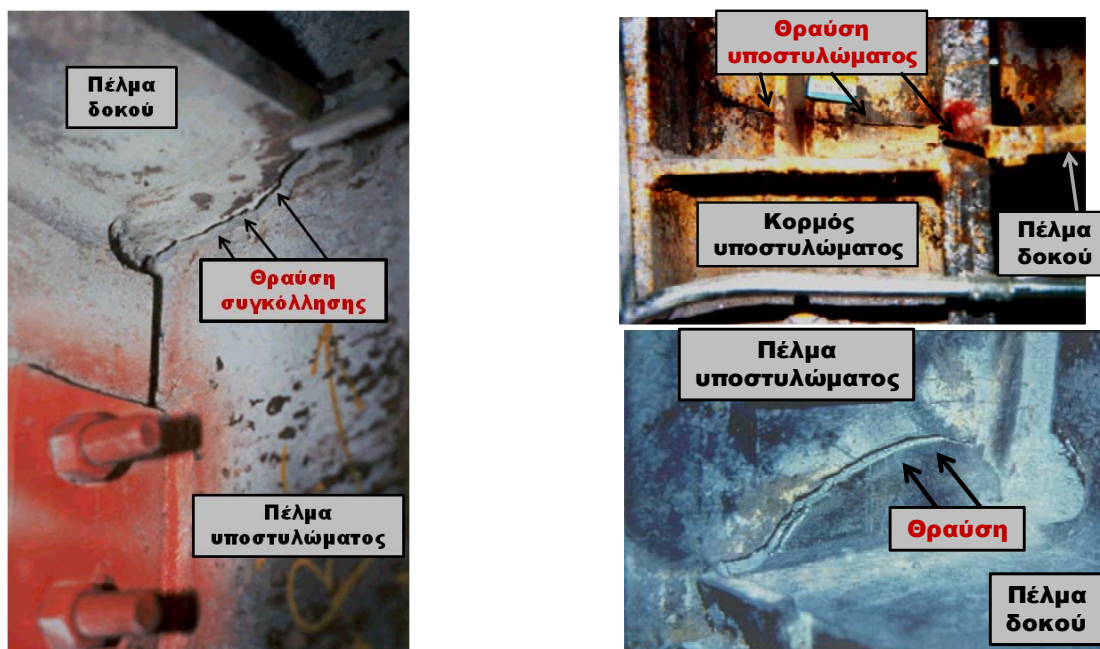
Στις σύγχρονες κατασκευές η ευρεία χρήση του χάλυβα οφείλεται στη μεγάλη αντοχή του και τη δυνατότητα να χρησιμοποιείται για τη σύζευξη μεγάλων ανοιγμάτων. Για το λόγο αυτό η πλειοψηφία των υψηλών κτιρίων έχουν ως δομικό υλικό το χάλυβα, ενώ εκτεταμένη είναι η χρήση του και στη γεφυροποιία. Η ολκιμότητα του χάλυβα ως δομικού υλικού εξασφαλίζει υπό προϋποθέσεις την απουσία ψαθυρών μορφών αστοχίας, καθώς οι μεγάλες παραμορφώσεις που θα έχουν προηγηθεί δίνουν τη δυνατότητα ανακατανομής της έντασης και έγκαιρης επέμβασης με σκοπό την αποφυγή της κατάρρευσης ή της απώλειας της φέρουσας ικανότητας μιας κατασκευής. Η άποψη αυτή όμως κλονίστηκε μετά τα σεισμικά γεγονότα του Northridge στο Los Angeles (1994) και του Hansin στο Kobe (1995), 6,7 και 7,2 βαθμών στην κλίμακα Richter αντίστοιχα. Καθώς η κλίμακα Richter μετρά τη συνολική ενέργεια που εκλύεται κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, σημαντικό στοιχείο αποτελεί η διάρκεια του σεισμού αυτού ώστε να προσδιοριστεί ο χρόνος στον οποίο εκλύεται η συγκεκριμένη ενέργεια. Η ομοιότητα μεταξύ των δύο αυτών σεισμικών γεγονότων ήταν η μικρή διάρκεια που τα χαρακτήριζε με αποτέλεσμα οι κατασκευές να μη δεχθούν μια βαθμιαία δόνηση, αλλά μια απότομη κρούση. Επιπλέον, καταγράφηκαν πολύ μεγάλες επιταχύνσεις τόσο στις οριζόντιες όσο και στην κατακόρυφη διεύθυνση. Η χρονική διάρκεια της ισχυρής δόνησης στην περίπτωση του Northridge ήταν περίπου 6 δευτερόλεπτα, ενώ στην περίπτωση του Kobe περίπου 10 δευτερόλεπτα [12].

Οι δύο αυτοί σεισμοί προκάλεσαν αστοχίες σε διάφορα μέλη μεταλλικών κατασκευών, όπως πλάκες έδρασης και συνδέσμους δυσκαμψίας, χαρακτηριστικές περιπτώσεις των οποίων απεικονίζονται στο Σχήμα 1.5. Ωστόσο, μεγαλύτερη έμφαση δόθηκε στις βλάβες που προκάλεσαν σε πλαίσια ροπής εξαιτίας του μεγάλου αριθμού συνδέσεων που υπέστησαν μερική ή ολική θραύση. Η σχεδιαστική φιλοσοφία των πλαισίων ροπής είναι η απορρόφηση της σεισμικής ενέργειας μέσω της πλαστικής παραμόρφωσης της δοκού χωρίς την αστοχία της σύνδεσης με το υποστυλώμα. Στα όλκιμα μέλη δηλαδή του κόμβου δοκού-υποστυλώματος δεν περιλαμβάνεται η σύνδεση, είτε αυτή είναι συγκολλητή είτε κοχλιωτή.



Σχήμα 1.5: Αστοχίες σε συνδέσμους δυσκαμψίας και σε εδράσεις υποστυλωμάτων [13]

Αν και οι δύο αυτοί σεισμοί είχαν μεγάλη ένταση και προκάλεσαν καταρρεύσεις σε κτίρια και λοιπές κατασκευές κυρίως από οπλισμένο σκυρόδεμα, σε μεταλλικές κατασκευές με χρήση πλαισίων ροπής δεν παρατηρήθηκαν καταρρεύσεις, ενώ κατά τις πρώτες έρευνες μετά τους σεισμούς δεν φάνηκε να έχουν υποστεί σοβαρές βλάβες. Η έλλειψη βλαβών σε μη φέροντα στοιχεία των κατασκευών, όπως επικαλύψεις και ηλεκτρικά ή αποχετευτικά δίκτυα, οδήγησε στο συμπέρασμα ότι ο σεισμός δεν είχε επηρεάσει τη δομική τους επάρκεια. Ωστόσο, η προσεκτικότερη εξέταση των συνδέσεων οι οποίες καλύπτονταν από ψευδοροφές, επικαλύψεις, σκεπές και πάνελ πυροπροστασίας, κατέδειξε το πρόβλημα της παρουσίας μορφών αστοχίας, όπως αυτές που φαίνονται στο Σχήμα 1.6. Στο Σχήμα αυτό φαίνονται αστοχίες οι οποίες έχουν ως σημείο εκκίνησης τη ρίζα της συγκόλλησης μεταξύ του άνω ή του κάτω πέλματος της δοκού και του πέλματος του υποστυλώματος από το σεισμό του Northridge. Η ρωγμή στις περιπτώσεις αυτές επεκτάθηκε είτε κατά πλάτος του πέλματος της δοκού προκαλώντας την πλήρη αποκόλληση του από το πέλμα του υποστυλώματος, είτε καθ' ύψος του κορμού του υποστυλώματος με αποτέλεσμα την αστοχία του υποστυλώματος. Η απουσία καταρρεύσεων ή ορατών αστοχιών κατά τους σεισμούς αυτούς, παρά το γεγονός ότι σε ορισμένες περιπτώσεις το υποστυλώμα αστόχησε σε όλο το ύψος του, οφείλεται στην ευεργετική επίδραση των πλακών σκυροδέματος των ορόφων που προσέφεραν πλευρική εξασφάλιση στα υποστυλώματα στα οποία η κύρια φόρτιση μετά το σεισμό ήταν αξονική θλίψη.



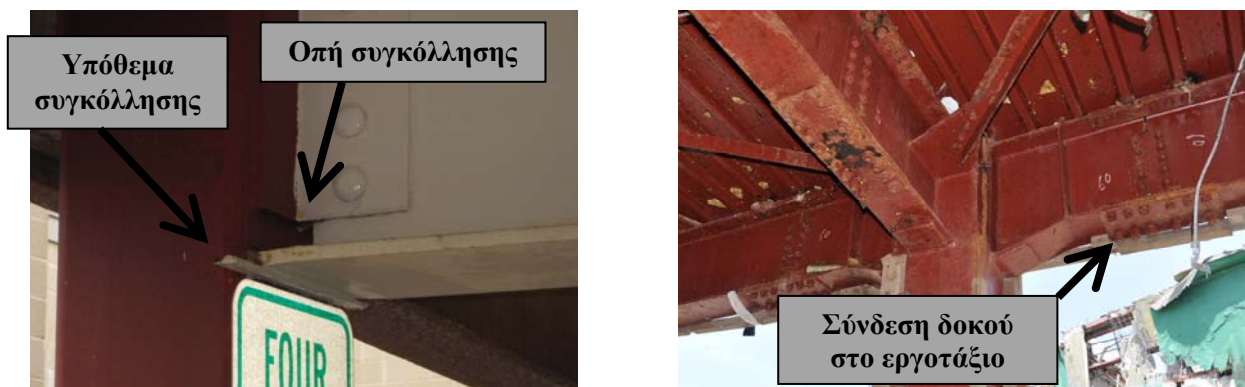
Σχήμα 1.6: Ψαθυρές αστοχίες συγκολλητών συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος [13]

Συγκεκριμένα, στις περισσότερες περιπτώσεις οι αστοχίες στις συγκολλητές συνδέσεις δοκών-υποστυλωμάτων οι οποίες έλαβαν χώρα στην California παρατηρήθηκαν στο κάτω πέλμα των δοκών. Η κρίσιμη ρωγμή που οδήγησε στην αστοχία της σύνδεσης ξεκινούσε στη ρίζα της συγκόλλησης ενώ στη συνέχεια επεκτεινόταν σε διαφορετικές κατευθύνσεις, οι οποίες και καταγράφηκαν. Σε ορισμένες περιπτώσεις επεκτεινόταν στο πέλμα του υποστυλώματος, είτε καθ' ύψος είτε κατά πλάτος, ενώ σε άλλες αφού διαπερνούσε όλο το πάχος της συγκόλλησης επεκτεινόταν στον κορμό της δοκού. Στο άνω πέλμα των δοκών δεν παρατηρήθηκαν εκτεταμένες αστοχίες παρά το γεγονός ότι η γεωμετρία της συγκόλλησης είναι η ίδια, γεγονός που αποδίδεται στην ευεργετική επίδραση των πλακών σκυροδέματος του ορόφου οι οποίες είναι σε επαφή με το άνω πέλμα των δοκών.

Οι αστοχίες αυτές έλαβαν χώρα χωρίς να υπάρχει εμφανής πλαστικοποίηση της υπόλοιπης σύνδεσης, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από την απουσία παραμενουσών μετατοπίσεων των ορόφων. Οι κατασκευές, παρά τη βλάβη στις συνδέσεις τους, δεν εμφάνισαν επιπλέον προβλήματα κατά τους μετασεισμούς που ακολούθησαν, γεγονός που οδήγησε στη λανθασμένη αντίληψη ότι ο σεισμός τις άφησε ανεπηρέαστες.

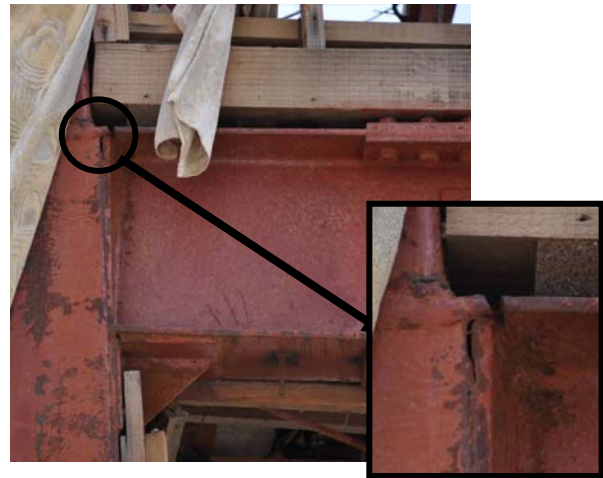
Ανάμεσα στις κατασκευές με συνδέσεις ροπής που χρησιμοποιούνταν στις ΗΠΑ και σε αυτές της Ιαπωνίας υπήρχαν αρκετές διαφορές. Η κατασκευαστική πρακτική στις ΗΠΑ ήταν η ύπαρξη περιμετρικών πλαισίων ροπής, σε συνδυασμό με περιορισμένο αριθμό εσωτερικών πλαισίων ανάλογα με το μέγεθος της κατασκευής. Οι υπόλοιπες συνδέσεις ήταν απλές συνδέσεις τέμνουσας. Το γεγονός αυτό οδηγούσε σε μεγάλες διατομές των πλαισίων ροπής σε σχέση με αυτές του υπόλοιπου κτιρίου εξαιτίας του μικρού αριθμού ενεργών πλαισίων τα οποία καλούνταν να αναλάβουν τις σεισμικές και πλευρικές φορτίσεις της κατασκευής. Αντίθετα, στην Ιαπωνία το σύνολο σχεδόν των κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων διαμορφώνονταν με χρήση συνδέσεων ροπής με αποτέλεσμα τα μέλη των πλαισίων να έχουν μικρότερη διατομή και άρα μικρότερες συγκολλήσεις σε σχέση με τις αντίστοιχες που εμφανίζονταν στην California. Εξαιτίας των μικρότερων διατομών των μελών που απαρτίζουν τη σύνδεση ροπής, στην Ιαπωνική πρακτική χρησιμοποιούνταν εξωραφές για τη συγκόλληση μεταξύ δοκών και υποστυλωμάτων. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το μικρό πάχος των εξωραφών δεν παρείχε στις συγκολλήσεις τη δυνατότητα μεταφοράς των τάσεων που δημιουργούνταν στη σύνδεση με αποτέλεσμα τη θραύση τους. Επιπλέον, στην Ιαπωνία είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη η χρήση κλειστών διατομών για τη μόρφωση των υποστυλωμάτων εξαιτίας της αυξημένης αντοχής που παρουσιάζουν έναντι στρέψης [14] και συνήθως είναι ψυχρής ελάσεως σε αντίθεση με τα αμερικάνικα πρότυπα όπου τα υποστυλώματα είναι συνήθως διατομές θερμής ελάσεως διπλού T.

Η χρήση των συνδέσεων ροπής κατά την αμερικάνικη πρακτική γίνεται με κοχλίωση του κορμού της δοκού σε έλασμα το οποίο έχει συγκολληθεί στο πέλμα του υποστυλώματος στο εργοστάσιο, ενώ τα πέλματα της δοκού συγκολλούνται στο υποστυλώμα στο εργοτάξιο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.7. Αν και αυτή η διαδικασία μόρφωσης των συνδέσεων ροπής χρησιμοποιείται και στην Ιαπωνία, σε πολλές περιπτώσεις και ιδιαίτερα σε νεώτερες κατασκευές συνηθίζεται η σύνδεση μεταξύ δοκού και υποστυλώματος να είναι συγκολλητή τόσο μεταξύ του κορμού της δοκού και του υποστυλώματος, όσο και μεταξύ των πελμάτων της δοκού με το πέλμα του υποστυλώματος. Στην περίπτωση αυτή όμως η πραγματοποίηση των συγκολλήσεων πραγματοποιείται στο εργοστάσιο και όχι στο εργοτάξιο. Στη διατομή του υποστυλώματος δηλαδή, συγκολλούνται τμήματα μικρού μήκους των δοκών και μεταφέρονται στη συνέχεια στο εργοτάξιο. Εκεί τα υπόλοιπα τμήματα των δοκών που απαιτούνται συνδέονται κοχλιωτά με τα υπάρχοντα μικρού μήκους τμήματα, όπως αποτυπώνεται στο Σχήμα 1.7. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται οι συγκολλήσεις στο εργοτάξιο οι οποίες είναι χρονοβόρες, εκτεθειμένες στις καιρικές συνθήκες και συνήθως χαμηλότερης ποιότητας από αυτές που πραγματοποιούνται στο εργοστάσιο.



Σχήμα 1.7: Σύνδεση ροπής κατά την αμερικανική (αριστερά) και ιαπωνική (δεξιά) πρακτική

Παρά τις βελτιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στον αντισεισμικό σχεδιασμό μεταλλικών κατασκευών, οι ψαθυρές αστοχίες μετά από σεισμικά γεγονότα, τόσο σε πλαίσια ροπής όσο και σε άλλα συστήματα απορρόφησης ενέργειας δεν απεφεύχθησαν πλήρως. Παράδειγμα αποτελεί ο σεισμός Tohoku στην Ιαπωνία το 2011, τον οποίο ακολούθησε η δημιουργία Tsunami που επέτεινε τις καταστροφικές ζημιές και επέφερε δεκάδες χιλιάδες θανάτους. Στο Σχήμα 1.8 φαίνονται τυπικές βλάβες που παρατηρήθηκαν σε μεταλλικές κατασκευές μετά από αυτό το σεισμό [15]. Σε αυτές διακρίνεται η διαρροή ενός πλαισίου ροπής εντός του επιπέδου του καθώς και η ψαθυρή αστοχία που παρατηρήθηκε στη σύνδεση δοκού-υποστυλώματος ενός άλλου. Τα συγκεκριμένα πλαίσια ροπής αποτελούνται από ανοικτές διατομές, γεγονός το οποίο αποδεικνύει ότι οι συγκεκριμένες κατασκευές είναι σχετικά παλιές (δεκαετίας 1970), καθώς στις σύγχρονες κατασκευές χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον κλειστές διατομές. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται η αστοχία συνδέσμων δυσκαμψίας σε εφελκυσμό. Ειδικά στην τελευταία εικόνα διακρίνεται ο σχηματισμός ρωγμής στη ρίζα της συγκόλλησης μεταξύ του μέλους απορρόφησης ενέργειας και του κομβοέλασματος. Δυσμενής επίδραση έχει και το γεγονός ότι το κομβοέλασμα δεν φέρει νευρώσεις οι οποίες θα αποτρέψουν την εκτός επιπέδου κάμψη του. Οι αστοχίες που περιγράφονται στο Σχήμα 1.8 εμφανίστηκαν σε κτίρια περιοχών στις οποίες δεν έφτασε το Tsunami, οπότε αποτελούν βλάβες που οφείλονται αποκλειστικά στη σεισμική δράση. Άλλες αστοχίες που παρατηρήθηκαν στις ίδιες περιοχές εμπεριέχουν θραύσεις ελασμάτων σύνδεσης κατακόρυφων συνδέσμων δυσκαμψίας σε διάφορα κτίρια και στρεπτικό λυγισμό μελών συνδέσμων δυσκαμψίας από ανοικτές διατομές.



Σχήμα 1.8: Αστοχίες συνδέσεων κατά το σεισμό Tohoku στην Ιαπωνία το 2011 [15]

Η ύπαρξη ψαθυρών αστοχιών σε μέλη τα οποία θα έπρεπε να χαρακτηρίζονται από πλάστιμη συμπεριφορά αποδεικνύει τη χρησιμότητα που θα είχε ένας τρόπος πρόβλεψης της αστοχίας ενός μέλους εξαιτίας της δημιουργίας και επέκτασης ρωγμών στο σώμα του υλικού. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θα προταθεί μια μέθοδος πρόβλεψης του σημείου και του χρόνου στον οποίο σχηματίζεται μια ρωγή ανάλογα με τη χρονοϊστορία φόρτισης και τη γεωμετρία της κατασκευής. Ο σχηματισμός μιας ρωγμής μπορεί στη συνέχεια μέσω της επέκτασής της, να οδηγήσει στην ολική αστοχία του μέλους μιας κατασκευής.

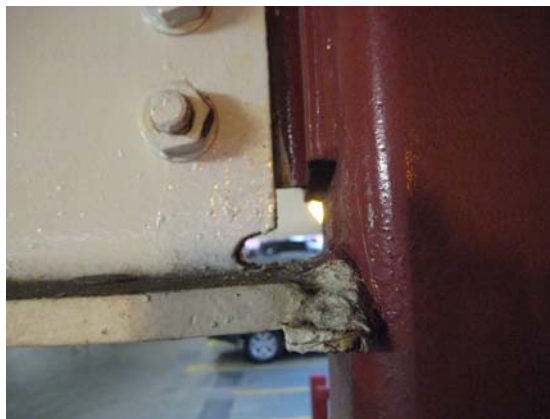
1.3.3 Αίτια αστοχιών

Μετά τις αστοχίες που παρατηρήθηκαν, ειδικά σε κτίρια με πλαίσια ροπής, κατά τα σεισμικά γεγονότα του Northridge και του Kobe ακολούθησαν εκτεταμένες έρευνες με σκοπό την εύρεση των αιτιών και τη σχεδιαστική και ποιοτική βελτίωση των συνδέσεων προκειμένου να αποφευχθούν φαινόμενα ψαθυρών αστοχιών στο μέλλον. Οι έρευνες επικεντρώθηκαν στον καθορισμό όχι μόνο των αιτιών που οδήγησαν στις αστοχίες, αλλά και σε τρόπους επισκευών συνδέσεων που παρουσίασαν προβλήματα καθώς και διατάξεων που θα αποκλείουν τέτοια φαινόμενα στο μέλλον. Μετά την καταγραφή των αστοχιών που έγινε κατά το πρώτο στάδιο μετά τους σεισμούς, ακολούθησε η πραγματοποίηση πληθώρας πειραμάτων και αριθμητικών αναλύσεων με τη βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων σε συγκολλητές συνδέσεις δοκών-υποστυλωμάτων τόσο σε παλιές, όσο και σε βελτιωμένες σχεδιαστικές διατάξεις. Στη συνέχεια γίνεται καταγραφή των σπουδαιότερων αιτιών που οδήγησαν σε βλάβες σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία και οι οποίες θα απασχολήσουν την παρούσα διατριβή.

Η αρχική αιτία για τις θραύσεις στις θέσεις των συγκολλήσεων δοκού-υποστυλώματος αναζητήθηκε στις ιδιότητες των υλικών των μελών που λάμβαναν μέρος στη σύνδεση. Κατά τον έλεγχο της δυσθραυστότητας του χάλυβα που χρησιμοποιείτο για τη συγκόλληση σε κατασκευές που αστόχησαν κατά το σεισμό του Northridge διαπιστώθηκε μειωμένη αντοχή έναντι κρούσης με τιμές δοκιμής Charpy χαμηλότερες από 10-15 J σε θερμοκρασία δωματίου [16]. Η διαδικασία υπολογισμού της δυσθραυστότητας καθώς και περιγραφή της δοκιμής Charpy πραγματοποιείται στο Κεφάλαιο 2. Οι εκτεταμένες ψαθυρές αστοχίες και ρηγματώσεις σε συνδέσεις πλαισίων ροπής κατά το σεισμό του Kobe οδήγησαν τους ερευνητές στην επανεξέταση των τεχνικών και των κανονισμών που διέπουν τις συγκολλήσεις σχετικά με το δυναμικό που χρησιμοποιείται και την ταχύτητα με την οποία πραγματοποιούνται. Και στις δύο περιπτώσεις ανακαλύφθηκαν κακής ποιότητας συγκολλήσεις οι οποίες οφείλονται τόσο σε λανθασμένους χειρισμούς των συγκολλητών όσο και στον ελλιπή έλεγχο, ειδικά στο κάτω πέλμα των δοκών όπου και η πρόσβαση των εργατών ήταν δυσκολότερη.

Μεγάλη επίδραση στη ψαθυρή θραύση των συνδέσεων απεδείχθη ότι είχε η παρουσία βοηθητικών υποθεμάτων συγκόλλησης στα πέλματα των δοκών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.9. Συγκεκριμένα, τοποθετούνταν ειδικά μεταλλικά ελάσματα στην κάτω επιφάνεια και των δύο πελμάτων της δοκού στο σημείο που θα γινόταν η συγκόλληση προκειμένου να αποτελέσουν τη βάση του συγκολλησίμου υλικού. Τα υποθέματα αυτά λόγω την μεγάλης θερμοκρασίας που αναπτύσσεται κατά τη συγκόλληση ενώνονταν με το πέλμα της δοκού και σε ορισμένα σημεία και με το πέλμα του υποστυλώματος με τυχαίο τρόπο, ενώ συνήθως δεν αφαιρούνταν μετά το πέρας των συγκολλήσεων. Μεταξύ του υποθέματος και του πέλματος του υποστυλώματος δημιουργείτο με αυτό τον τρόπο ένα πολύ μικρό κενό το οποίο βρέθηκε ότι έπαιζε ρόλο προϋπάρχουσας ρωγμής η οποία και επεκτεινόταν επιφέροντας την τελική αστοχία της σύνδεσης [17]. Περαιτέρω ανάλυση του ρόλου που έπαιξε η παρουσία των βοηθητικών υποθεμάτων συγκόλλησης στη συμπεριφορά των συγκολλητών συνδέσεων υπό σεισμικές καταπονήσεις θα γίνει στο Κεφάλαιο 10.

Στο σημείο της σύνδεσης δοκού-υποστυλώματος παρατηρείται μεγάλη συγκέντρωση τάσεων στην περιοχή των συγκολλήσεων. Ο λόγος για τις υψηλές τιμές παραμορφώσεων αναζητήθηκε σε μια πληθώρα παραγόντων, όπως η ύπαρξη οπών συγκόλλησης [18] οι οποίες επιτείνουν τη συγκέντρωση μεγάλων τάσεων στην περιοχή περιμετρικά της συγκόλλησης, όπως θα αναλυθεί και εκτενέστερα στο Κεφάλαιο 9. Στο Σχήμα 1.9 φαίνεται η περίπτωση ενός συγκολλητού κόμβου δοκού-υποστυλώματος στον οποίο συνυπάρχουν οπές συγκόλλησης και χαλύβδινα υποθέματα συγκόλλησης. Έμφαση δόθηκε επίσης στην αδυναμία του κορμού της δοκού, ο οποίος κοχλιώνεται μέσω ελάσματος στο υποστυλώμα, να αναλάβει σημαντικό μέρος της ροπής που αναπτύσσεται στη σύνδεση με αποτέλεσμα να καταπονούνται σε μεγαλύτερο βαθμό τα πέλματα της δοκού και οι συγκολλήσεις αυτών με το πέλμα του υποστυλώματος [19]. Στην Ιαπωνική πρακτική ο κορμός της δοκού συγκολλάται με το πέλμα του υποστυλώματος που είναι κοίλης διατομής στο εργοστάσιο. Κατά το σχηματισμό του διαφράγματος μεταξύ δοκού και υποστυλώματος δεν τοποθετούνταν ενισχυτικά ελάσματα στο πίσω μέρος της συγκόλλησης του κορμού της δοκού στο πέλμα του υποστυλώματος παρά το γεγονός ότι τα πέλματα του υποστυλώματος ήταν εύκαμπτα σε εκτός επιπέδου καταπονήσεις. Το γεγονός αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση των τάσεων στα πέλματα της δοκού εξαιτίας της μείωσης της ροπής που αναλαμβάνει ο κορμός της δοκού[20].



Σχήμα 1.9: Συνύπαρξη βοηθητικού ελάσματος και οπής συγκόλλησης σε σύνδεση ροπής δοκού-υποστυλώματος

Σημαντικό ρόλο στην εντατική κατάσταση της περιοχής της συγκόλλησης μεταξύ δοκού-υποστυλώματος στα πλαίσια ροπής παίζουν οι υψηλές τιμές τριαξονικότητας [17]. Η τριαξονικότητα εκφράζει την εντατική κατάσταση του υλικού κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Συγκεκριμένα, η ολκιμότητα ενός υλικού αποτυπώνει τη δυνατότητά του να παραμορφώνεται κατά τη διάρκεια μιας φόρτισης. Η ολκιμότητα όμως διαφοροποιείται ανάλογα με την εντατική κατάσταση του υλικού, έχοντας διαφορετική τιμή υπό συνθήκες μονοαξονικής ή πολυαξονικής καταπόνησης. Η τριαξονικότητα συνδέεται με το ρυθμό αύξησης της βλάβης σε ένα υλικό και ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ της υδροστατικής πίεσης ως προς την τάση διαρροής von Mises, όπως διατυπώνεται στην εξίσωση (1.1). Όπως θα αναλυθεί εντός της διατριβής, η υψηλή τριαξονικότητα έχει ως αποτέλεσμα η συγκόλληση να αστοχήσει σε συντομότερο διάστημα από ότι θα συνέβαινε σε περιπτώσεις μικρότερων τιμών. Η επίδραση της τριαξονικότητας μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με τη βοήθεια των καμπυλών βλάβης, όπως θα περιγραφεί στο Κεφάλαιο 8.

$$h = \frac{\sigma_m}{\sigma} \quad (1.1)$$

όπου σ_m είναι η συνιστώσα της υδροστατικής τάσης η οποία οδηγεί σε αύξηση του όγκου των κενών σε ένα πορώδες υλικό σύμφωνα με την εξίσωση (1.2).

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (1.2)$$

όπου σ_1 , σ_2 και σ_3 είναι οι κύριες τάσεις, ενώ

$\bar{\sigma}$ είναι η τάση von Mises η οποία περιγράφεται στην εξίσωση (1.3).

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (1.3)$$

Σε πολλές περιπτώσεις οι αστοχίες των συνδέσεων, δεν πρέπει να αναζητηθούν αποκλειστικά σε ένα μόνο αίτιο, αλλά στο συνδυασμό διαφορετικών στοιχείων. Η επιρροή καθενός από τους παράγοντες που αναλύθηκαν προηγουμένως καθώς και η επίδραση σύνθετων καταστάσεων με τη συμμετοχή επιπλέον μελών της κατασκευής, όπως των σύμμικτων ή μη πλακών των κτιρίων, αποτελεί θέμα το οποίο ακόμα και σήμερα δεν μπορεί να απαντηθεί κατηγορηματικά. Η ιδιαιτερότητα της γεωμετρίας κάθε κατασκευής, η απόστασή της από το επίκεντρο της δόνησης καθώς και ο αστάθμητος παράγοντας του ανθρώπινου σφάλματος κατά τη διενέργεια των συγκολλήσεων καθιστά δύσκολη την ποσοτικοποίηση του ποσοστού της βλάβης στο οποίο συνεισέφερε κάθε ένα από τα αίτια που εντοπίστηκαν κατά την έρευνα που ακολούθησε τους σεισμούς αυτούς.

1.3.4 Μέτρα βελτίωσης της συμπεριφοράς των πλαισίων ροπής

Η αναζήτηση των αιτιών που οδήγησαν σε αστοχία των συνδέσεων ροπής μετά τους σεισμούς του Northridge και του Kobe, αποτέλεσε το έναυσμα για τη διατύπωση προτάσεων που στόχο είχαν τη βελτίωση της συμπεριφοράς της σύνδεσης υπό σεισμικές φορτίσεις. Επιπλέον, δόθηκαν οδηγίες για διορθωτικές επεμβάσεις σε πλαίσια ροπής τα οποία παρουσίασαν βλάβη αλλά και μεθόδους ενίσχυσης αυτών που έμειναν ανέπαφα από τις σεισμικές δράσεις. Για το σχεδιασμό νέων κατασκευών προτάθηκαν καινούργιες γεωμετρικές διατάξεις, είτε διαφοροποιώντας το σχήμα των διατομών οι οποίες απαρτίζουν τη σύνδεση, είτε προσθέτοντας στοιχεία τα οποία βελτιώνουν τη συμπεριφορά της συγκόλλησης έναντι ψαθυρής θραύσης.

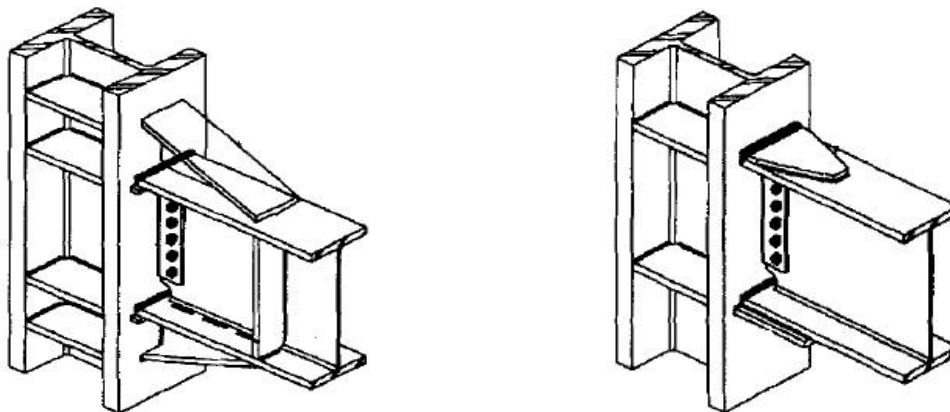
Όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, η γεωμετρία των συνδέσεων ροπής που χρησιμοποιούνταν μέχρι τα σεισμικά γεγονότα του Northridge και του Kobe τις καθιστούσε επιρρεπείς σε μεγάλες συγκεντρώσεις τάσεων και παραμορφώσεων στην περιοχή της συγκόλλησης δοκού-υποστυλώματος. Για το λόγο αυτό προτάθηκαν μεθοδολογίες επέμβασης οι οποίες είχαν ως στόχο τη μείωση των μεγάλων αυτών παραμορφώσεων. Ένα από τα πρώτα μέτρα που πάρθηκαν ήταν η αφαίρεση των βοηθητικών υποθεμάτων συγκόλλησης από τα πέλματα της δοκού. Η αφαίρεση των βοηθητικών υποθεμάτων επέτρεψε την ανίχνευση πιθανών σημείων ελλιπούς εισχώρησης υλικού στη ρίζα της συγκόλλησης είτε οπτικά είτε μέσω της χρήσης υπερήχων. Ειδικά η θέση του υποθέματος που βρίσκεται στην κάτω επιφάνεια του κάτω πέλματος της δοκού δυσκόλευε εξαιρετικά τη χρήση κατάλληλου εξοπλισμού για τον έλεγχο των συγκολλήσεων. Προτάθηκε κατά την αφαίρεση των βοηθητικών υποθεμάτων συγκόλλησης να πραγματοποιείται εξωραφή στο σημείο της ρίζας της συγκόλλησης προκειμένου να αποφευχθούν σημεία στα οποία δεν έχει πραγματοποιηθεί επαρκής διείδυση υλικού.

Η αναζήτηση των αιτιών αστοχίας των πλαισίων ροπής στις ιδιότητες του υλικού, οδήγησε στη βελτίωση της ποιότητας του χάλυβα που χρησιμοποιείται κατά τη συγκόλληση των μελών της σύνδεσης. Η αντοχή σε θραύση του υλικού της συγκόλλησης αυξήθηκε και το 1997 [21] εισήχθη στους αμερικάνικους κανονισμούς μια ελάχιστη τιμή δυσθραυστότητας δοκιμής Charpy για τον

χάλυβα που χρησιμοποιείται στις συγκολλήσεις και η οποία καθορίζεται στα 27J στους -29°C . Στην έκδοση των κανονισμών του 2005 η τιμή αυτή αναθεωρείται στα 27J στους -18°C [22]. Για το λόγο αυτό, τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται για τις συγκολλήσεις αποτελούνται πλέον από υλικό το οποίο ικανοποιεί τις ελάχιστες τιμές αντοχής σε θραύση, αν και η μεθοδολογία συγκόλλησης με ηλεκτρόδιο (Flux-Cored Arc Welding) δεν έχει αλλάξει εξαιτίας της δυνατότητάς του να χρησιμοποιείται σε υπαίθριες δραστηριότητες και του μεγάλου ρυθμού απόθεσης υλικού που το χαρακτηρίζει.

Εκτός από τη βελτίωση της τεχνικής και των υλικών της συγκόλλησης προτάθηκε η επανασχεδίαση των συνδέσεων ροπής οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν σε νέες κατασκευές ή θα ενισχύσουν υπάρχουσες. Η λογική που ακολουθήθηκε σε αυτή τη διαδικασία ήταν είτε η ενίσχυση της ίδιας της σύνδεσης ώστε να καταστεί ισχυρότερη από τη δοκό, είτε η τοπική απομείωση της διατομής της δοκού ώστε οι απαιτήσεις παραμορφωσιμότητας της σύνδεσης να είναι μικρότερες. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις η πλαστικοποίηση απαιτείται να πραγματοποιηθεί στη δοκό σε ικανή απόσταση από τη σύνδεση ώστε να μην επιβαρυνθεί η συγκόλληση από τη συγκέντρωση υψηλών τάσεων και πλαστικών παραμορφώσεων.

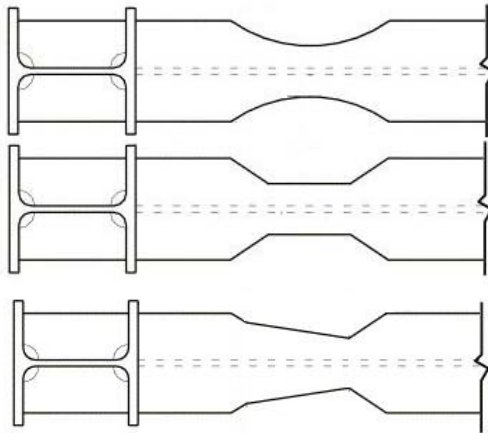
Στο Σχήμα 1.10 φαίνεται η γεωμετρία κόμβων οι οποίοι έχουν ως στόχο την ισχυροποίηση της σύνδεσης μέσω της προσθήκης κατάλληλων ελασμάτων τα οποία διασφαλίζουν την πλαστικοποίηση σε περιοχή της δοκού μακριά από τη διεπιφάνεια δοκού-υποστυλώματος. Η ενίσχυση αυτή πραγματοποιείται με την προσθήκη ενισχυτικών ελασμάτων στη στήριξη των πελμάτων της δοκού με το υποστύλωμα, τα οποία μπορεί να είναι διαφόρων γεωμετριών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.10.



Σχήμα 1.10: Γεωμετρία ενισχυμένων κόμβων ροπής μέσω χρήσης ενισχυτικών ελασμάτων [23]

Η προσέγγιση, βάσει της οποίας η διατομή της δοκού θα έπρεπε να εξασθενήσει τοπικά προκειμένου να αποφευχθεί η δημιουργία πλαστικής άρθρωσης σε μικρή απόσταση από τη διατομή του υποστυλώματος, οδήγησε στο σχεδιασμό δοκών στις οποίες αφαιρείτο υλικό από τα πέλματά τους. Αυτό πραγματοποιείται είτε μέσω απομείωσης των πελμάτων με κατάλληλα γεωμετρικά σχήματα είτε μέσω της δημιουργίας οπών σε αυτά προκειμένου να μειωθεί τοπικά η αντοχή τους. Με τον τρόπο αυτό προέκυψαν δοκοί οι οποίες προσομοιάζονται με κόκκαλο σκύλου (dogbone connections) όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.11. Το σχήμα της εγκοπής στη δοκό μπορεί να είναι κυκλικό, τραπεζοειδές ή μικτού τύπου όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.11. Στις περισσότερες κατασκευές έχει επικρατήσει ο κυλινδρικός σχεδιασμός της εγκοπής καθώς η απουσία γωνιών έχει ως αποτέλεσμα την ομαλότερη κατανομή των τάσεων στη δοκό. Η ιδέα της απομειωμένης διατομής της δοκού είχε προϋπάρξει των σεισμών του Northridge και του Kobe από τον Plumier [24], ωστόσο η χρησιμοποίησή της λόγω των πλεονεκτημάτων του μικρότερου κόστους και της ευκολίας εφαρμογής της σε σχέση με την ενισχυμένη σύνδεση με χρήση ελασμάτων προσέελκυσε το ενδιαφέρον των ερευνητών με αποτέλεσμα να πραγματοποιηθούν πολλές πειραματικές και

αναλυτικές διερευνήσεις με στόχο την ευρύτερη εισαγωγή της στην κατασκευαστική πρακτική [25,26].



Σχήμα 1.11: Γεωμετρία δοκών απομειωμένης διατομής

Οι παραπάνω αλλαγές στη σχεδιαστική φιλοσοφία των συνδέσεων ροπής εφαρμόστηκε κυρίως στην αμερικανική και ευρωπαϊκή πρακτική. Αντίθετα, μετά το σεισμό του Kobe και παρά το γεγονός ότι οι μορφές αστοχίας ήταν παρόμοιες με αυτές που παρατηρήθηκαν στο σεισμό του Northridge, η ιαπωνική προσέγγιση στη βελτίωση των συγκολλητών συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος χαρακτηρίστηκε από αλλαγές μικρότερης κλίμακας. Κύριο χαρακτηριστικό ήταν η έμφαση στη βελτίωση της ποιότητας των συγκολλήσεων τόσο από πλευράς χρησιμοποιούμενων υλικών, όσο και της διαδικασίας πραγματοποίησης και ελέγχου της συγκόλλησης. Εκτεταμένος έλεγχος πραγματοποιήθηκε επίσης σε ότι αφορά την επίδραση του βοηθητικού μεταλλικού υποθέματος συγκόλλησης στη συμπεριφορά της σύνδεσης. Το αποτέλεσμα αυτών των ερευνών ήταν η εξακρίβωση της επιβλαβούς επίδρασης της παρουσίας του, με αποτέλεσμα την πρόταση αφαίρεσής του μετά το πέρας των συγκολλήσεων, όπως και κατά την αμερικανική πρακτική. Η παρουσία της οπής συγκόλλησης στη δοκό βρέθηκε ότι επηρεάζει τη συγκέντρωση των τάσεων στην περιοχή της διεπιφάνειας δοκού-υποστυλώματος. Για το λόγο αυτό προτάθηκε η κατάργηση της οπής όπου αυτό είναι δυνατό ή η διαφοροποίηση του σχήματός της με σκοπό τη μείωση των παραμορφώσεων στη συγκόλληση και επομένως την αύξηση της αντοχής της σύνδεσης [27].

Τέλος, αναφοράς χρήζουν οι αλλαγές που παρατηρήθηκαν στον ευρωπαϊκό τρόπο σχεδιασμού και εκτέλεσης συνδέσεων ροπής. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το μικρότερο μέγεθος των δοκών που χρησιμοποιούνται λόγω του μεγαλύτερου αριθμού πλαισίων ροπής που σχεδιάζονται σε σχέση με την αμερικανική πρακτική, έχει ευεργετική επίδραση στην αντοχή και στη στρωφική ικανότητα των συγκολλητών κόμβων. Στην αυξημένη στρωφική ικανότητα ρόλο παίζει και η συνεισφορά της παραμόρφωσης του κορμού του υποστυλώματος καθώς και το γεγονός ότι συνήθως ο κορμός της δοκού συγκολλάται στο πέλμα του υποστυλώματος και δεν κοχλιώνεται όπως στο Σχήμα 1.10. Ωστόσο, παρά την καλύτερη συμπεριφορά των ευρωπαϊκών πλαισίων ροπής σε σχέση με τα αντίστοιχα των αμερικανικών και ιαπωνικών κατασκευών, οι αλλαγές στις συνδέσεις ακολούθησαν τη σχεδιαστική προσέγγιση που περιγράφηκε προηγουμένως. Η χρήση ενισχυτικών ελασμάτων με σκοπό την ισχυροποίηση των κόμβων καθώς και η πρακτική της τοπικής εξασθένησης των δοκών χρησιμοποιείται ευρέως στις ευρωπαϊκές κατασκευές, ταυτόχρονα με τη βελτίωση των τεχνικών συγκόλλησης και επίβλεψης [28-29].

1.4 Αναγκαιότητα διερεύνησης ψαθυρής αστοχίας συγκολλητών κόμβων δοκού-υποστυλώματος

Είναι φανερό, από όσα προαναφέρθηκαν, ότι οι αστοχίες σε συγκολλητούς κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων πλαισίων ροπής οφείλονται στο σχηματισμό και την επέκταση ρωγμών στο χάλυβα. Η ψαθυρή ή όλκιμη αστοχία των συνδέσεων οφείλεται σε πληθώρα παραγόντων οι πιο σημαντικοί από τους οποίους είναι η θερμοκρασία, η ταχύτητα φόρτισης, η γεωμετρία της σύνδεσης, η ποιότητα των συγκολλούμενων υλικών, η ανεπαρκής εφαρμογή των συγκολλήσεων και η παρουσία κατασκευαστικών λεπτομερειών οι οποίες αυξάνουν την εντατική κατάσταση στην περιοχή της σύνδεσης. Παρά το γεγονός ότι μετά τους σεισμούς του Northridge στο Los Angeles και του Hansin στο Kobe ακολούθησε εκτεταμένη έρευνα σχετικά με τις αιτίες των αστοχιών που παρατηρήθηκαν σε συνδέσεις μεταλλικών κτιρίων, οι αλλαγές στους κανονισμούς και στις κατασκευαστικές πρακτικές δεν εξάλειψαν το πρόβλημα. Αυτό φάνηκε από τον πρόσφατο σεισμό Tohoku στην Ιαπωνία το 2011 ο οποίος έγινε γνωστός παγκοσμίως εξαιτίας των καταστροφών που προκλήθηκαν από τη δημιουργία tsunami. Ωστόσο, ακόμα και σε περιοχές οι οποίες προσεβλήθησαν αποκλειστικά από το σεισμό, εμφανίστηκαν αστοχίες σε συγκολλητές και κοχλιωτές συνδέσεις λόγω της δημιουργίας ρωγμών οι οποίες επέφεραν αστοχία της σύνδεσης, κυρίως σε παλιότερες κατασκευές.

Σκοπός της παρούσας διατριβής είναι η εύρεση μιας μεθοδολογίας η οποία θα δίνει τη δυνατότητα να προβλέπεται ο χρόνος και το σημείο απαρχής της ρηγμάτωσης σε κόμβους μεταλλικών πλαισίων υπό ανακυκλιζόμενες φορτίσεις. Η χρήση αυτής της μεθόδου δεν περιορίζεται σε συγκολλητούς κόμβους πλαισίων ροπής αλλά μπορεί να επεκταθεί σε οποιοδήποτε σύστημα απορρόφησης ενέργειας υπό σεισμικές φορτίσεις. Η αναζήτηση αυτής της μεθοδολογίας περιλαμβάνει τον καθορισμό των ιδιοτήτων του υλικού και της συμπεριφοράς του σε συνθήκες ανακυκλιζόμενης φόρτισης. Μέσω αναλύσεων γίνεται εμφανής η επιρροή των διαφορετικών κατασκευαστικών λεπτομερειών που υπάρχουν στις συνδέσεις ροπής, στο χρόνο και τη θέση στην οποία πραγματοποιείται ρηγμάτωση.

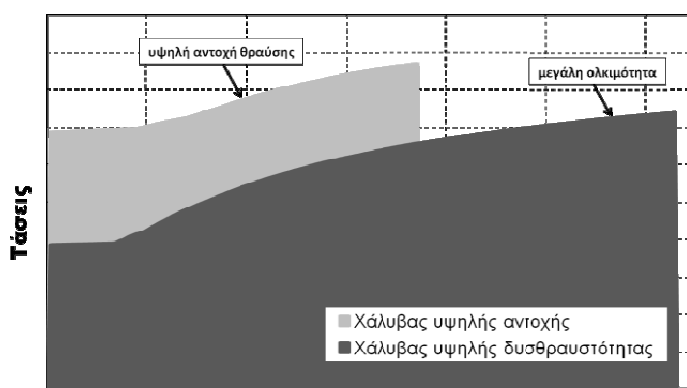
Η δυνατότητα άμεσης εφαρμογής της μεθοδολογίας που θα αναπτυχθεί στην καθημερινή πρακτική γίνεται με την υιοθέτηση σχέσεων ομοίων με αυτούς που προτείνονται από τον EN1993-1-9 [3] για την περίπτωση της αντοχής σε κόπωση. Η διαφοροποίηση έγκειται στο γεγονός ότι οι πίνακες που προτείνονται έχουν ως μεταβλητή την ολική στροφή των κόμβων, γεγονός που ευνοεί τη χρησιμότητά τους, καθώς αποτελεί ένα μέγεθος το οποίο μπορεί να υπολογιστεί αυτόματα από την πλειοψηφία των εμπορικών υπολογιστικών προγραμμάτων ανάλυσης κατασκευών. Ως ολική στροφή ενός κόμβου ροπής ορίζεται το άθροισμα του ελαστικού και πλαστικού τμήματος της στροφής αυτού κατά τη διάρκεια μιας φόρτισης. Η γνώση δηλαδή των ιδιοτήτων του υλικού και της χρονοϊστορίας στροφών ενός κόμβου κατά την εφαρμογή ενός ανακυκλιζόμενου ιστορικού φόρτισης σε μια συγκεκριμένη γεωμετρία σύνδεσης, οδηγεί σε αποτίμηση του ασφαλούς σχεδιασμού σε όρους ρηγματώσεων.

2 Σύγχρονη έρευνα στον τομέα της θραύσης, της κόπωσης και των απαιτήσεων δυσθραυστότητας μεταλλικών υλικών

2.1 Εφαρμογή πλαστικής ανάλυσης με κριτήριο τη δυσθραυστότητα

Οι κανόνες σχεδιασμού για την επίτευξη επαρκούς αντοχής και ευστάθειας μιας μεταλλικής κατασκευής ισχύουν σε συνθήκες θερμοκρασίας δωματίου και βασίζονται στην ελαστοπλαστική συμπεριφορά του χάλυβα. Για λόγους ασφαλείας καθίσταται απαραίτητο να διασφαλίζεται η ανακατανομή των πλαστικών ανηγμένων παραμορφώσεων, ιδιαίτερα σε σημεία όπου παρατηρούνται υψηλές τοπικές συγκεντρώσεις τους, όπως είναι οι συγκολλήσεις, οι οπές κοχλίωσης και τα σημεία αλλαγής γεωμετρίας. Επιπλέον, είναι απαραίτητο να διασφαλίζεται ανακατανομή των ροπών σε πλαίσια μέσω σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων. Η επιλογή του υλικού επομένως, πρέπει να μπορεί να ανταποκριθεί στις αυξημένες απαιτήσεις παραμορφώσεων του δομικού χάλυβα και του χάλυβα των συγκολλήσεων.

Η δυσθραυστότητα (toughness) ενός υλικού ορίζεται ως η ικανότητά του να ανθίσταται σε ελαστικές και πλαστικές παραμορφώσεις. Η δυσθραυστότητα δηλαδή καθορίζεται ως το ολικό ποσό της ενέργειας που δύναται να απορροφήσει ένα υλικό προτού υποστεί θραύση. Η αυξημένη δυσθραυστότητα στο χάλυβα είναι απαραίτητο ζητούμενο για την εφαρμογή πλαστικής ανάλυσης, καθώς με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η όλκιμη συμπεριφορά του και η απουσία θραύσεων ψαθυρής μορφής. Η υψηλή δυσθραυστότητα δεν εξασφαλίζεται αποκλειστικά από την υψηλή τιμή ολκιμότητας, αλλά από το συνδυασμό ολκιμότητας και εφελκυστικής αντοχής. Για το λόγο αυτό ένα υλικό μεγάλης ολκιμότητας και μικρής εφελκυστικής αντοχής μπορεί να έχει χαμηλότερη τιμή δυσθραυστότητας από ένα αντίστοιχο υλικό χαμηλότερης ολκιμότητας και μεγαλύτερης αντοχής. Στο Σχήμα 2.1 φαίνονται δύο υλικά από τα οποία εκείνο με τη μεγαλύτερη δυσθραυστότητα χαρακτηρίζεται από μικρότερη εφελκυστική αντοχή, αλλά μεγαλύτερη ολκιμότητα. Στο Σχήμα αυτό η δυσθραυστότητα περιγράφεται ως η περιοχή που βρίσκεται κάτω από την καμπύλη του διαγράμματος τάσεων-ανηγμένων παραμορφώσεων και δείχνει την απορροφούμενη ενέργεια ανά μονάδα όγκου. Η δυσθραυστότητα εξαρτάται από την ταχύτητα φόρτισης, τη θερμοκρασία και την πιθανή παρουσία ρωγμών στο υλικό κατά τη διαδικασία παραγωγής του.



Ανηγμένες παραμορφώσεις

Σχήμα 2.1: Διαφορά δυσθραυστότητας μεταξύ χαλύβων διαφορετικής αντοχής

Οι υψηλές τιμές δυσθραυστότητας στο δομικό χάλυβα και το χάλυβα των συγκολλήσεων κάνουν εφικτή τη χρήση της πλαστικής ανάλυσης καθώς ικανοποιούνται οι τοπικές και ολικές απαιτήσεις πλαστικών παραμορφώσεων οι οποίες μπορούν να διαχωριστούν σύμφωνα με την ακόλουθη λογική:

- Οι τοπικές απαιτήσεις παραμορφώσεων στις περιοχές συγκολλήσεων ή στην περίμετρο οπών κοχλίωσης, μπορούν να μελετηθούν με χρήση της τοπικής κατασκευαστικής λεπτομέρειας. Η μελέτη της λεπτομέρειας αυτής μπορεί να γίνει με απομόνωσή της από το προσομοίωμα του συνόλου της κατασκευής, όπως π.χ. η μελέτη μιας συγκόλλησης βραχέος ταυ η οποία αποτελεί μέρος μιας σύνδεσης δοκού υποστυλώματος.
- Οι ολικές απαιτήσεις παραμορφώσεων, όπως η αντοχή σε ροπή κάμψης, ο σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων και η στροφική ικανότητα ενός μέλους ή κόμβου, πρέπει να μελετηθούν με τη χρησιμοποίηση ολόκληρης της κατασκευής.

Η μέτρηση των απαιτήσεων σε όρους παραμορφώσεων σε τοπικό και σε επίπεδο ολόκληρης της κατασκευής θα πραγματοποιηθεί στα πλαίσια της παρούσας διατριβής με χρήση του κατάλληλου κάθε φορά προσομοιώματος. Για το λόγο αυτό προωθείται η χρήση προσομοιωμάτων της ολικής κατασκευής τόσο σε επίπεδο σύνδεσης δοκών-υποστυλωμάτων όσο και σε επίπεδο της λεπτομέρειας συγκόλλησης, ενώ στη συνέχεια γίνεται προσπάθεια συσχέτισης των τοπικών απαιτήσεων του υλικού σε όρους ανηγμένων παραμορφώσεων με τις ολικές απαιτήσεις της κατασκευής στην οποία ανήκει η λεπτομέρεια. Η μεθοδολογία που προτείνεται έχει το πλεονέκτημα οι απαιτήσεις παραμόρφωσης ολόκληρης της κατασκευής να υπολογίζονται συναρτήσει των απαιτήσεων κρίσιμων κατασκευαστικών λεπτομερειών, ενώ ταυτόχρονα καθιστά δυνατή την εφαρμογή πλαστικής ανάλυσης χωρίς την αναγκαιότητα καθορισμού της τιμής της δυσθραυστότητας του δομικού χάλυβα και του χάλυβα των συγκολλήσεων. Παρόλα αυτά στο παρόν κεφάλαιο θα αναπτυχθούν οι βασικές διατάξεις που διέπουν τους Ευρωπαϊκούς κανονισμούς σχετικά με τον τρόπο επιλογής ενός υλικού προκειμένου να αποφευχθεί η ψαθυρή αστοχία και να εφαρμοστεί πλαστικός σχεδιασμός.

Συγκεκριμένα, ψαθυρή θραύση του χάλυβα, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, μπορεί να συμβεί σε περιπτώσεις χαμηλής θερμοκρασίας και σε σημεία υψηλής συγκέντρωσης τάσεων, όπως είναι οπές κοχλίωσης, εγκοπές ή τοπικά ελαττώματα του υλικού ή της κατασκευής. Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου έχουν αναπτυχθεί έννοιες με χρήση των αρχών της θραυστομηχανικής οι οποίες έχουν εισαχθεί στους κανονισμούς EN 1993-1-10 [30] και EN 13445 [31] ή ακόμα και σε εγχειρίδια δομικής ευστάθειας όπως είναι ο BS7910 [32] ή ο SINTAP [33]. Σύμφωνα με τους υπάρχοντες κανονισμούς η ψαθυρή θραύση αποφεύγεται με την επιλογή υλικού κατάλληλης δυσθραυστότητας ανάλογα με τη χρονοϊστορία φορτίσεων και τις περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες υποβάλλεται η κατασκευή. Παράλληλα γίνεται αναφορά στις αρχές της θραυστομηχανικής και της μηχανικής της βλάβης οι οποίες αποτελούν τη βάση των αναλύσεων που θα ακολουθήσουν στα επόμενα κεφάλαια.

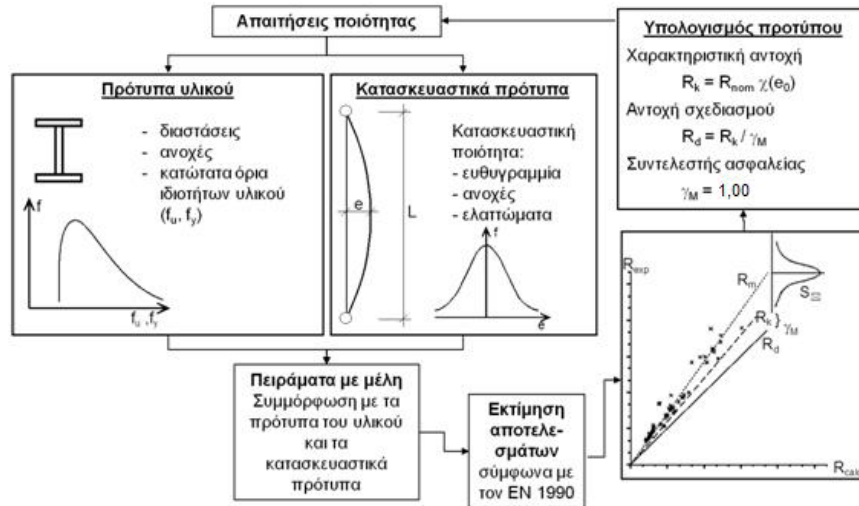
2.2 Υπάρχοντα κριτήρια επιλογής υλικού για πλαστικό σχεδιασμό

Σύμφωνα με τις αρχές του EN 1993-1-1 [34], για την ανάλυση μεταλλικών κατασκευών ο ασφαλής σχεδιασμός προϋποθέτει δύο βασικές προϋποθέσεις:

1. Έλεγχος επάρκειας στην οριακή κατάσταση αστοχίας, η οποία βασίζεται στην παραδοχή ότι παρέχεται επαρκής ολκιμότητα στο υλικό χωρίς την παρουσία ψαθυρής μορφής θραύσεων.
2. Επιλογή του υλικού ώστε να αποφεύγονται οι ψαθυρές αστοχίες και διασφάλιση επαρκούς δυσθραυστότητας.

Η επαρκής ολκιμότητα του υλικού αποτελεί βασική προϋπόθεση του EN1993-1-1 [34] κατά την ανάπτυξη των κανόνων σχεδιασμού μεταλλικών κατασκευών, όπως περιγράφεται στο Σχήμα 2.2. Η ανάπτυξη των κανονισμών και των κανόνων ασφαλείας έγινε με αξιοποίηση πειραματικών μετρήσεων μελών, συνδέσεων και διατάξεων μικρής και μεγάλης κλίμακας. Τα πειραματικά

δοκίμια που κατασκευάζονται πρέπει να ικανοποιούν τα σύγχρονα πρότυπα διατομών (π.χ. EN 10025) [35] ενώ οφείλουν να εκπληρώνουν τις σχετικές διατάξεις ανέγερσης (π.χ. EN 1090-2) [36]. Τα πειραματικά δοκίμια που χρησιμοποιούνται στα πλαίσια της παρούσας διατριβής ικανοποιούν τις παραπάνω προϋποθέσεις και επομένως είναι αντιπροσωπευτικά των μελών που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη των διατάξεων στον EN 1993-1-1 [34].



Σχήμα 2.2: Διαδικασία ανάπτυξης κανόνων σχεδιασμού στον EN 1993-1-1 με χρήση κατασκευαστικών προτύπων και προτύπων υλικού για οριακές καταστάσεις αστοχίας [37]

Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα πειραμάτων με όλκιμη συμπεριφορά δοκιμίων για τους αντίστοιχους συντελεστές ασφαλείας γ_M και χαρακτηριστική τιμή αντοχής R_k . Οι τιμές αυτές είναι έγκυρες με την προϋπόθεση ότι δεν παρουσιάζεται ψαθυρή αστοχία, αλλά μόνο αστοχία που προέρχεται εξαιτίας διαρροής του δοκιμίου. Η ψαθυρή αστοχία δηλαδή, πρέπει να έχει αποκλειστεί εκ των προτέρων μέσω κατάλληλης επιλογής υλικού.

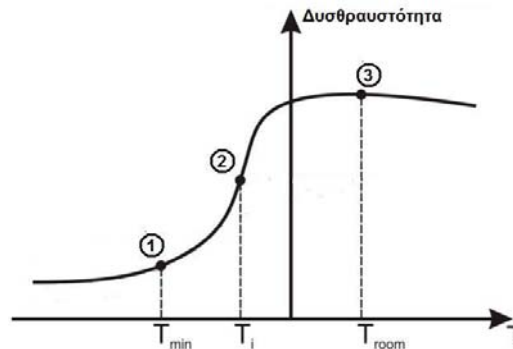
Όλκιμες μορφές αστοχίας			Ψαθυρή αστοχία
Τύπος 0 Αντοχή μέλους έναντι διαρροής, π.χ. εφελκυσμένο μέλος $R_d = \frac{R_k(f_y)}{\gamma_{M0}}$	Τύπος 1 Αστοχία μέλους λόγω απώλειας ευστάθειας, π.χ. λυγισμός $R_d = \frac{R_k(f_y, \bar{\lambda})}{\gamma_{M1}}$	Τύπος 2 Αστοχία λόγω εφελκυστικής θραύσης, π.χ. κοχλίας $R_d = \frac{R_k(f_u)}{\gamma_{M2}}$	Αποκλείεται μέσω κατάλληλης επιλογής υλικού
$\gamma_{M0} = 1,00$	$\gamma_{M1} = 1,00$	$\gamma_{M2} = 1,25$	
$R_k = \gamma_M R_d$			

Σχήμα 2.3: Διαγράμματα φορτίου-παραμόρφωσης μελών σε θερμοκρασία δωματίου

Από το Σχήμα 2.3 φαίνεται ότι στην οριακή κατάσταση αστοχίας η συμπεριφορά των δοκιμίων εξαρτάται αποκλειστικά από το όριο διαρροής f_y και από την αντοχή θραύσης f_u χωρίς να γίνεται αναφορά στην τιμή δυσθραυστότητας του υλικού. Γίνεται δηλαδή παραδοχή ότι η δυσθραυστότητα του υλικού έχει ασήμαντη επίδραση στην αντοχή του μέλους στην οριακή κατάσταση αστοχίας.

Άμεση αναφορά στον τρόπο υπολογισμού της δυσθραυστότητας ενός υλικού γίνεται μόνο στον EN1993-1-10 [30]. Συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά σε μια διαδικασία η οποία βασίζεται στη θραυστομηχανική σύμφωνα με την οποία υπολογίζεται μια ελάχιστη τιμή δυσθραυστότητας στη

μεταβατική περιοχή θερμοκρασιών του Σχήματος 2.4 προκειμένου να αποφεύγεται η ψαθυρή θραύση. Το Σχήμα 2.4 δείχνει τον τρόπο εναλλαγής της δυσθραυστότητας ανάλογα με τη θερμοκρασία και γίνεται διάκριση σε τρεις περιοχές. Η κατώτερη (1) περιοχή χαρακτηρίζεται από χαμηλές θερμοκρασίες στις οποίες η δυσθραυστότητα λαμβάνει μικρές τιμές και η συμπεριφορά του υλικού είναι ψαθυρής φύσεως ενώ η ανώτερη (3) περιοχή έχει μεγαλύτερες τιμές θερμοκρασίας και δυσθραυστότητας και η συμπεριφορά του υλικού είναι όλκιμη. Ανάμεσά τους υπάρχει μια μεταβατική (2) περιοχή στην οποία η τιμή της δυσθραυστότητας αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η θραυστομηχανική αποτελεί τον κλάδο εκείνο της μηχανικής ο οποίος ασχολείται με τη μελέτη της δημιουργίας και επέκτασης ρωγμών στα υλικά υπό την επίδραση μιας φόρτισης. Εκτενέστερη αναφορά στις αρχές της θραυστομηχανικής γίνεται στην §2.3.



Σχήμα 2.4: Καμπύλη δυσθραυστότητας-θερμοκρασίας για δομικό χάλυβα

Στον EN1993-1-10 [30] απουσιάζει ένα κριτήριο για τον προσδιορισμό των τιμών δυσθραυστότητας στην ανώτερη περιοχή θερμοκρασιών του διαγράμματος του Σχήματος 2.4. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι τα όρια των τιμών δυσθραυστότητας που απαιτούνται κατά τον πλαστικό σχεδιασμό έχουν υιοθετηθεί σε διάφορα σημεία του EN1993 κατά τον προσδιορισμό των κανόνων αντοχής των υλικών και των μελών. Ο EN1993-1-1 [34] στην §3.2.2 παρέχει κριτήρια ολκιμότητας, τα οποία βασίζονται σε εφελκυστικές δοκιμές χάλυβων. Το Σχήμα 2.5 περιλαμβάνει το απόσπασμα του κανονισμού που περιέχει αυτά τα κριτήρια.

3.2.2 Απαιτήσεις ολκιμότητας

- (1) Για τους χάλυβες απαιτείται μία ελάχιστη ολκιμότητα η οποία θα πρέπει να εκφράζεται υπό μορφή ορίων για:
- το λόγο f_u/f_y της προδιαγεγραμμένης ελάχιστης οριακής αντοχής σε εφελκυσμό f_u ως προς την προδιαγεγραμμένη ελάχιστη αντοχή διαρροής f_y
 - την επιμήκυνση στην αστοχία με δοκίμιο μήκους $5,65 \sqrt{A_0}$ (όπου A_0 είναι η αρχική επιφάνεια της διατομής)
 - την οριακή παραμόρφωση ϵ_u , όπου η ϵ_u αντιστοιχεί στην οριακή αντοχή f_u .

ΣΗΜΕΙΩΣΗ Τα όρια του λόγου f_u/f_y , η επιμήκυνση στην αστοχία και η οριακή παραμόρφωση ϵ_u μπορούν να καθορίζονται στο Εθνικό Προσάρτημα. Συνιστώνται οι παρακάτω τιμές:

- $f_u/f_y \geq 1,10$
- επιμήκυνση στην αστοχία όχι μικρότερη από 15%
- $\epsilon_u \geq 15\epsilon_y$, όπου ϵ_y είναι η παραμόρφωση διαρροής ($\epsilon_y = f_y/E$).

- (2) Για χάλυβα ο οποίος ανήκει σε μία από τις ποιότητες που περιλαμβάνονται στον Πίνακα 3.1 θα πρέπει να γίνεται δεκτό ότι ικανοποιούνται οι παραπάνω απαιτήσεις.

Σχήμα 2.5: Απόσπασμα από την § 3.2.2 του EN 1993-1-1 [34]

Η ελάχιστη τιμή του λόγου f_u/f_y , η επιμήκυνση του δοκιμίου κατά την αστοχία και η τιμή της οριακής παραμόρφωσης ϵ_u είναι ακόμα στα πλαίσια της έρευνας και για το λόγο αυτό στον κανονισμό οι τιμές τους δίνονται ως συστάσεις.

Συγκεκριμένα, το όριο του λόγου $f_u/f_y > 1,10$ δεν δικαιολογείται επαρκώς καθώς γίνεται μόνο η επισημάνση ότι έχει ευεργετικές ιδιότητες στην κατασκευή λόγω μείωσης των φαινομένων τοπικού λυγισμού κατά την πλαστικοποίηση του μέλους. Στον EN 1993-1-12 [38] το όριο μετατρέπεται σε $f_u/f_y \geq 1,05$ προκειμένου να μπορεί να ικανοποιείται από τους ισχυρότερους χάλυβες που παράγονται στη σύγχρονη πρακτική. Εκεί που η αυξημένη τιμή του λόγου f_u/f_y μπορεί να είναι απαραίτητη είναι κατά το σχεδιασμό συνδέσεων σύμφωνα με τον EN 1993-1-8 [39] καθώς η αυξημένη ολκιμότητα μπορεί να αποτρέψει την αστοχία μέσω της έγκαιρης προειδοποίησης που παρέχει. Τα όρια που προτείνονται για την επιμήκυνση του δοκιμίου στην αστοχία καθώς και για την οριακή παραμόρφωση ϵ_u σχετίζονται με πειραματικά δεδομένα από καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων οι οποίες έχουν προκύψει από κατάλληλα διαμορφωμένα δοκίμια τα οποία καταπονούνται σε εφελκυσμό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6. Στο Σχήμα αυτό περιγράφεται επιπρόσθετα το κριτήριο *Considere* [40] το οποίο περιγράφει τη δυνατότητα των μετάλλων να υπόκεινται σε μεγάλες τάσεις καθώς παραμορφώνονται και υφίστανται κράτυνση. Σύμφωνα με το κριτήριο μια μικρή αύξηση του εφελκυστικού φορτίου πέραν της μέγιστης τιμής αυτού σε ένα δοκίμιο έχει σαν αποτέλεσμα την κράτυνση του υλικού και την ταυτόχρονη αύξηση των τάσεων στην περιοχή δημιουργίας λαιμού εξαιτίας της μειωμένης επιφάνειας της διατομής. Η εξίσωση (2.1) περιγράφει την αύξηση του φορτίου εξαιτίας της αύξησης των τάσεων ενώ η εξίσωση (2.2) εξαιτίας της μεταβολής της επιφάνειας της διατομής.

$$dF = A \cdot d\sigma_w \quad (2.1)$$

$$dF = \sigma_w \cdot dA \rightarrow d\sigma_w = dA \cdot \sigma_w / A \quad (2.2)$$

όπου σ_w είναι η τάση,

F η δρώσα δύναμη και

A είναι η επιφάνεια της διατομής.

Όμως σύμφωνα με τον ορισμό της παραμόρφωσης, ισχύει:

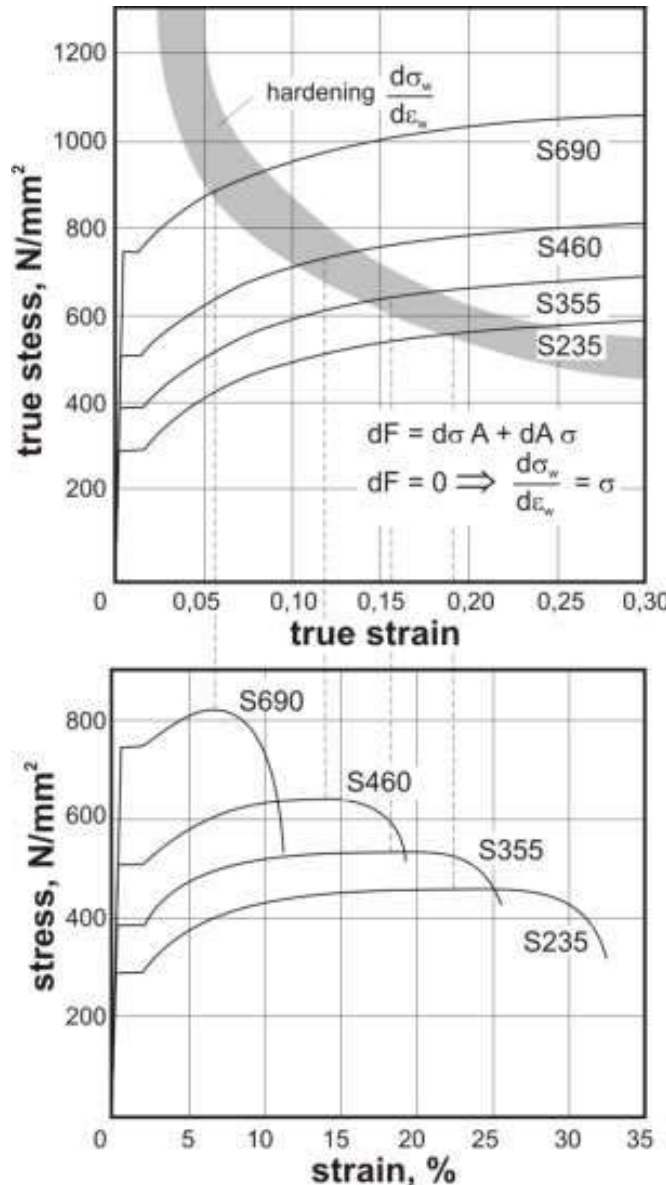
$$de_w = \frac{dA}{A} \quad (2.3)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (2.2) και (2.3) προκύπτει η εξίσωση (2.4).

$$\sigma_w = \frac{d\sigma_w}{de_w} \quad (2.4)$$

Η εξίσωση (2.4) αποτυπώνεται στο Σχήμα 2.6 για διάφορους δομικούς χάλυβες. Οι συμβατικές καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων που απεικονίζονται στο κατώτερο από τα δύο διαγράμματα, προκύπτουν από τις καμπύλες πραγματικών τάσεων-παραμορφώσεων του άνω διαγράμματος. Το άνω διάγραμμα του Σχήματος 2.6 αναφέρεται στις πραγματικές τάσεις σ_w οι οποίες αφορούν την πραγματική διατομή A του δοκιμίου και την πραγματική παραμόρφωση ϵ_w . Ωστόσο, η οριακή αντοχή f_u ενός χάλυβα ορίζεται ως η μέγιστη τάση που σχετίζεται με την αρχική διατομή A_0 του δοκιμίου που υπόκειται σε εφελκυσμό. Από το διάγραμμα πραγματικών τάσεων-πραγματικών παραμορφώσεων είναι εμφανές ότι η κράτυνση των συγκεκριμένων χαλύβων είναι παρόμοια

καθώς οι καμπύλες μεταβολής των τάσεων είναι σχεδόν παράλληλες. Επομένως, η τιμή της κράτυνσης $d\sigma_w/d\varepsilon_w$ που φαίνεται στο διάγραμμα θα μεταβάλλεται εντός μικρού εύρους για όλες τις ποιότητες χάλυβα. Το σημείο τομής της καμπύλης πραγματικών τάσεων-πραγματικών παραμορφώσεων και της τιμής της κράτυνσης $d\sigma_w/d\varepsilon_w$ δίνει την τιμή της πραγματικής παραμόρφωσης τη στιγμή της μέγιστης εφελκυστικής δύναμης και επομένως τη στιγμή εκκίνησης σχηματισμού λαιμού στο δοκίμιο. Άρα, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα του Σχήματος 2.6, όσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή του χάλυβα, τόσο μικρότερη είναι η αξονική παραμόρφωση του δοκιμίου τη στιγμή της απαρχής δημιουργίας λαιμού και τόσο ο λόγος της τάσης διαρροής προς την εφελκυστική αντοχή του δοκιμίου θα μεγαλώνει.



Σχήμα 2.6: Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων και ορισμός της κρίσιμης παραμόρφωσης σύμφωνα με το κριτήριο Considère [41]

Για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής χρησιμοποιήθηκαν οι καμπύλες πραγματικών τάσεων-πραγματικών παραμορφώσεων όμοιες με αυτές του Σχήματος 2.6. Η μεθοδολογία δημιουργίας ρωγμών που θα παρουσιαστεί στα επόμενα κεφάλαια βασίζεται στον τρόπο συμπεριφοράς του υλικού στο επίπεδο των κόκκων που το απαρτίζουν. Για το λόγο αυτό, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη η επίδραση της πιθανής δημιουργίας λαιμού και της κράτυνσης στη μικροδομή του υλικού

μέσω της χρήσης των πραγματικών τάσεων και παραμορφώσεων στην ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων.

Ο EN 1993-1-10 [30] και ο EN 1993-2-3 [42], προτείνουν επιπρόσθετα την επιλογή της ποιότητας του χάλυβα με βάση το πάχος του ελάσματος, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1. Οι ποιότητες που προκρίνονται από το πρότυπο EN 10025 [35] δεν κάνουν αναφορά στην τιμή δυσθραυστότητας της κάθε ποιότητας.

Πίνακας 2.1: Συστάσεις για την επιλογή υλικού σύμφωνα με το EN 1993-2 [42]

Ονομαστικό πάχος πλάκας	Επιπρόσθετες απαιτήσεις
$t \leq 30 \text{ mm}$	$T_{27J} = -20 \text{ }^\circ\text{C}$ σύμφωνα με το EN 10025
$30 \text{ mm} < t \leq 80 \text{ mm}$	Λεπτόκοκκος χάλυβας σύμφωνα με το EN 10025, π.χ. S355N/M
$t > 80 \text{ mm}$	Λεπτόκοκκος χάλυβας σύμφωνα με το EN 10025, π.χ. S355NL/ML

Ο EN 1998-1 [43] στην §6.2 εμπεριέχει ορισμένες απαιτήσεις σχετικές με τη δυσθραυστότητα του υλικού οι οποίες αποτυπώνονται στον Πίνακα 2.2. Όπως και οι προηγούμενες, έτσι και αυτές οι συστάσεις έχουν αιτιολογηθεί μόνο με εμπειρικές μεθόδους.

Πίνακας 2.2: Απαιτήσεις για το υλικό σύμφωνα με τον EN 1998-1 § 6.2(7)

- (7) Η αντοχή σε κρούση των χαλύβων και των συγκολλήσεων θα πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις για τη σεισμική δράση στην οιονεί μόνιμη τιμή της θερμοκρασίας λειτουργικότητας (βλέπε EN 1993-1-10:2004).

Σημείωση: Το Εθνικό Προσάρτημα μπορεί να δίνει πληροφορίες όσον αφορά τον τρόπο με τον οποίο το EN 1993-1-10:2004 μπορεί να χρησιμοποιείται στην σεισμική κατάσταση σχεδιασμού.

Εκτός από αυτά τα κριτήρια ολκιμότητας τα οποία αφορούν τη διάρκεια ζωής ενός υλικού, οι Ευρωπαϊκοί κανονισμοί δίνουν οδηγίες σχετικά με τις απαιτήσεις πλαστικών στροφών σε μια σύνδεση. Σε κατασκευές όπου γίνεται εκμετάλλευση της πλήρους πλαστικής τους ικανότητας, σχηματίζονται πλαστικές αρθρώσεις στα σημεία που η ροπή σχεδιασμού ξεπερνά τη μέγιστη αντοχή του μέλους. Για την εκμετάλλευση της πλήρους πλαστικής αντοχής της κατασκευής, πρέπει τα μέλη σε αυτές τις περιοχές να μπορούν να υποστούν συγκεκριμένη τιμή πλαστικής στροφής χωρίς να αστοχήσουν. Οι απαιτήσεις της στροφικής ικανότητας περιέχονται στον EN 1993-1-8 [43]. Για συγκολλητές συνδέσεις σύμφωνα με τον EN 1993-1-8, §6.4.3 οι απαιτήσεις στροφικής ικανότητας περιγράφονται από την εξίσωση:

$$\varphi_{cd} = 0.025 \frac{h_c}{h_b} \quad (2.5)$$

όπου h_c είναι το ύψος της διατομής του υποστρώματος και

h_b είναι το ύψος της διατομής της δοκού.

Η απαίτηση αυτή δεν επιτρέπει στο μηχανικό να υπολογίσει την απαιτούμενη δυσθραυστότητα του υλικού με βάση τον EN 10025 [35], καθώς η στρωφική ικανότητα εξαρτάται από την ποιότητα του χάλυβα, τα συνδεόμενα μέλη και την κατασκευαστική διάταξη.

Για τις συνδέσεις της παρούσας διατριβής έχουν χρησιμοποιηθεί δοκοί διατομής HEA300 και IPE500 ενώ το υποστυλώμα είναι διατομής HEM300. Για τις διατομές αυτές οι απαιτήσεις στρωφικής ικανότητας σύμφωνα με τον EN 1993-1-8 [43] υπολογίζονται στις εξισώσεις (2.6) και (2.7).

$$\text{HEA300: } \varphi_{cd} = 0,025 \frac{340}{290} = 0,0293 = 29,3\text{mrad} \quad (2.6)$$

$$\text{IPE500: } \varphi_{cd} = 0,025 \frac{340}{500} = 0,017 = 17,0\text{mrad} \quad (2.7)$$

Στον EN 1998-1 [43] περιλαμβάνονται διατάξεις που σχετίζονται με την ολκιμότητα σε επίπεδο τοπικών απαιτήσεων σε ότι αφορά την ικανότητα πλαστικής στρωφής μιας σύνδεσης. Κατά το σχεδιασμό κατασκευών όπου προβλέπεται πλήρης εκμετάλλευση της αντοχής τους και έχοντας ως κύριο δομικό σύστημα τα πλαίσια ροπής, δημιουργούνται πλαστικές αρθρώσεις σε σημεία όπου η ροπή σχεδιασμού ξεπερνά τη μέγιστη πλαστική ροπή αντοχής του μέλους. Προκειμένου να γίνει πλήρης εκμετάλλευση της πλαστικής αντοχής της κατασκευής, θα πρέπει τα μέλη σε αυτές τις θέσεις να μπορούν να υποστούν συγκεκριμένες πλαστικές στρωφές χωρίς να παρουσιάσουν αστοχία. Στον EN 1998-1 § 6.6.4(3) [43] αναφέρεται ότι κατά τον αντισεισμικό σχεδιασμό μιας κατασκευής η διάταξη των συνδέσεων πρέπει να είναι τέτοια ώστε η ικανότητα στρωφής της περιοχής της πλαστικής άρθρωσης θ_p να μην είναι μικρότερη από 35 mrad για φορείς υψηλής κατηγορίας πλαστιμότητας και 25 mrad για φορείς μέσης κατηγορίας πλαστιμότητας με $q > 2$, όπου η στρωφή θ_p ορίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (2.8).

$$\theta_p = \delta / 0,5L \quad (2.8)$$

όπου δ είναι η καμπτική παραμόρφωση στο μέσο του ανοίγματος και
 L είναι το άνοιγμα της δοκού.

Επιπρόσθετα, υπό ανακυκλιζόμενες συνθήκες φόρτισης θα πρέπει η ικανότητα στρωφής της περιοχής των πλαστικών αρθρώσεων θ_p να εξασφαλίζεται χωρίς μείωση της αντοχής και της δυσκαμψίας άνω του 20%, ανεξαρτήτως της θέσεως της πλαστικής ζώνης.

Ο EN 1998-1 [43] περιέχει κριτήρια ολκιμότητας τα οποία αφορούν την ίδια την κατασκευή, όπως είναι η γωνιακή παραμόρφωση θ και η σχετική μετακίνηση των ορόφων. Συγκεκριμένα, σε φορείς μειωμένης δυσκαμψίας έναντι πλευρικής μετάθεσης ή μεγάλων κατακόρυφων φορτίων, τα φαινόμενα δευτέρας τάξεως μπορεί να είναι σημαντικά και η ανάλυση με βάση το αρχικό απαραμόρφωτο σχήμα να μην επαρκεί. Κριτήριο για τον έλεγχο της επιρροής των φαινομένων δευτέρας τάξεως αποτελεί η γωνιακή παραμόρφωση θ , η οποία ελέγχεται σε κάθε όροφο και στις δύο κύριες διευθύνσεις της κατασκευής. Η απαίτηση για περιορισμό των βλαβών σε περιπτώσεις σεισμικών γεγονότων μικρότερης έντασης από το σεισμό σχεδιασμού ικανοποιείται με την προσθήκη ανώτατης οριακής τιμής στη σχετική παραμόρφωση του ορόφου. Το όριο αυτό του κανονισμού περιλαμβάνεται στον Πίνακα 2.3 μαζί με το κριτήριο των φαινομένων δευτέρας τάξεως που αναφέρθηκε προηγουμένως.

Πίνακας 2.3: Διατάξεις ολκιμότητας κατασκευών του EN1998-1

Φαινόμενα δευτέρας τάξεων	$\theta = \frac{P_{tot} \cdot d_r}{V_{tot} \cdot h}$
Όριο σχετικής μετακίνησης ορόφων	$d_r \cdot v \leq 0,0075h$

όπου P_{tot} είναι το άθροισμα των κατακόρυφων φορτίων στην κορυφή κάθε ορόφου,
 d_r είναι η διαφορά των οριζόντιων μετατοπίσεων μεταξύ κορυφής και βάσης του ορόφου,
 V_{tot} είναι η συνολική σεισμική τέμνουσα στη βάση του ορόφου,
 h είναι το ύψος του ορόφου και
 v είναι μειωτικός συντελεστής.

2.3 Μέθοδοι επιλογής υλικού για την αποφυγή ψαθυρής θραύσης

2.3.1 Χρήση των αρχών της θραυστομηχανικής

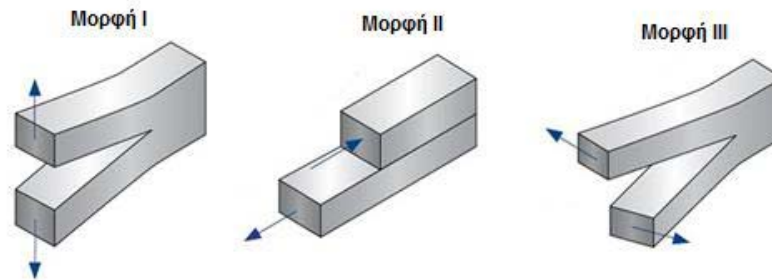
Όπως σημειώθηκε και προηγουμένως, η θραυστομηχανική ασχολείται με τη δημιουργία και επέκταση μιας ρωγμής σε ένα υλικό υπό την επίδραση μιας φόρτισης. Η δυσθραυστότητα υπό το πρίσμα της θραυστομηχανικής, ορίζεται ως το ολικό ποσό ενέργειας που απαιτείται προκειμένου να επεκταθεί η ρωγμή αυτή προκαλώντας θραύση του υλικού. Η χρήση της θραυστομηχανικής έχει χρησιμοποιηθεί σε ευρεία κλίμακα και έχει διατυπωθεί σε διεθνείς κανονισμούς, όπως ο BS 7910 [44]. Ενδεικνύται σε περιπτώσεις όπου μπορούν να υποτεθούν ατέλειες που έχουν τη μορφή ρωγμών κατά τη φάση κατασκευής, επεξεργασίας ή λειτουργίας ενός μέλους. Χρειάζεται δηλαδή ο εκ των προτέρων καθορισμός ενός κρίσιμου σημείου όπου υπάρχει ρωγμή προκειμένου να εισαχθεί στο αναλυτικό μοντέλο. Καθώς είναι εξαιρετικά αμφίβολο ότι ένα υλικό δεν περιέχει ελαττώματα υπό τη μορφή ρωγμών, εγκλεισμάτων, κενών ή ασυνεχειών στις συγκολλήσεις, είναι σύνηθες να θεωρείται η παρουσία μιας ρωγμής συγκεκριμένου μεγέθους σε κάποιο κρίσιμο σημείο της κατασκευής, το οποίο και αναλύεται με τη βοήθεια της ελαστικής θραυστομηχανικής.

Οι αρχές της θραυστομηχανικής βασίζονται στην αντίληψη ότι οι τοπικές συγκεντρώσεις τάσεων στην περιοχή της ρωγμής μπορούν να ποσοτικοποιηθούν με τη χρήση μίας μόνο παραμέτρου. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό είναι ο συντελεστής έντασης των τάσεων K , το ολοκλήρωμα J και το $CTOD$ (Crack Tip Opening Displacement).

Ο συντελεστής έντασης των τάσεων K περιγράφει το πεδίο των τάσεων περιμετρικά της ακμής της ρωγμής και εξαρτάται από τη φόρτιση, το μέγεθος της ρωγμής και τη γεωμετρία. Συνήθως ακολουθείται από ένα δείκτη ο οποίος υποδεικνύει την κυρίαρχη μορφή αστοχίας όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7. Από τις τρεις αυτές μορφές αστοχίας η πιο συνήθης είναι η πρώτη, κατά την οποία το φορτίο ασκείται κάθετα ως προς το επίπεδο της ρωγμής. Για το λόγο αυτό ο συντελεστής έντασης των τάσεων απεικονίζεται ως K_I και η τιμή του προκύπτει σύμφωνα με την εξίσωση:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a \beta} \quad (2.9)$$

όπου σ είναι η αναπτυσσόμενη τάση σε MPa,
 a είναι το μήκος της ρωγμής σε m και
 β είναι μια αδιάστατη σταθερά που εξαρτάται από τη γεωμετρία του δοκιμίου και της ρωγμής.



Σχήμα 2.7: Βασικές μορφές φόρτισης του επιπέδου της ρωγμής

Ο συντελεστής έντασης των τάσεων K_I μεταβάλλεται ανάλογα με το πάχος του δοκιμίου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη διαφορετική κατανομή των τάσεων στην ακμή της ρωγμής όταν το πάχος του δοκιμίου διαφοροποιείται. Έτσι καθώς το πάχος του δοκιμίου αυξάνεται, ο συντελεστής έντασης των τάσεων K_I μειώνεται μέχρι μια οριακή τιμή μετά την οποία η αύξηση του πάχους δεν επιφέρει περαιτέρω μείωση της τιμής του συντελεστή. Η οριακή αυτή τιμή σημειώνεται με χρήση του δείκτη c και αποτελεί σταθερή ιδιότητα του υλικού, συμβολίζεται ως K_{Ic} και είναι γνωστή ως αντοχή του υλικού έναντι θραύσης ή δυσθραυστότητα. Η τιμή K_{Ic} είναι η μέγιστη τιμή έντασης των τάσεων που μπορεί να υπομείνει ένα υλικό υπό συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης χωρίς να υποστεί θραύση. Μετά την τιμή του K_{Ic} η ρωγμή αυξάνεται απότομα προκαλώντας αστοχία του υλικού.

Το ολοκλήρωμα J αποτελεί εναλλακτικό τρόπο για την ποσοτικοποίηση της δυσθραυστότητας ενός υλικού. Η διαφορά του σε σχέση με το συντελεστή έντασης των τάσεων εντοπίζεται στο γεγονός ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί υπό συνθήκες εντονότερης πλαστικοποίησης, καθώς ο συντελεστής έντασης των τάσεων επιτρέπει μόνο πολύ μικρή πλαστικοποίηση στην ακμή της ρωγμής. Το ολοκλήρωμα J κατά μήκος μιας κλειστής καμπύλης ορίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (2.10) και ποσοτικοποιεί την ενέργεια που απαιτείται για την επέκταση της ρωγμής ανά επιφάνεια θραύσης.

$$J = \int_{\gamma} \left(W dx_2 - t \frac{\theta u}{\theta x_1} ds \right) \quad (2.10)$$

όπου $W(x_1, x_2)$ είναι το έργο της δύναμης ανά μονάδα όγκου,
 x_1, x_2 είναι οι διευθύνσεις των συντεταγμένων,
 γ είναι η διαδρομή που περιλαμβάνει τη ρωγμή,
 ds είναι το βήμα της κλειστής καμπύλης,
 t είναι το διάνυσμα κάθετο στο ds και
 u είναι το διάνυσμα μετατόπισης.

Το $CTOD$ (Crack Tip Opening Displacement) αναπαριστά την άμβλυνση των χειλέων της ρωγμής χρησιμοποιώντας την τιμή που προκύπτει ως μέτρο της τοπικής πλαστικότητας στην περιοχή της ακμής. Η αστοχία λαμβάνει χώρα όταν η τιμή της παραμέτρου φτάσει μια κρίσιμη τιμή και ορίζεται ως η απόσταση δ μεταξύ των σημείων που βρίσκονται από την τομή μιας ευθείας 45° η οποία ξεκινά από την ακμή της ρωγμής και τέμνει τις πλευρές όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8. Το $CTOD$ σχετίζεται άμεσα με το ολοκλήρωμα J καθώς εφαρμόζονται τόσο σε ελαστικές όσο και υπό συνθήκες περιορισμένης πλαστικοποίησης.



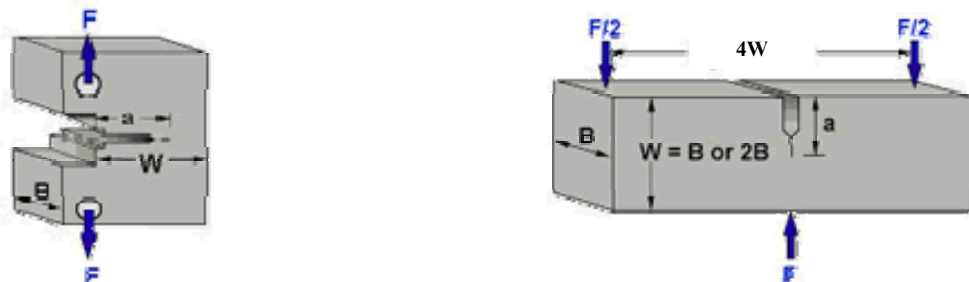
Σχήμα 2.8: Υπολογισμός απόστασης δ του CTOD

Τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται κατά τον προσδιορισμό του συντελεστή έντασης των τάσεων έχουν τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 2.9. Συγκεκριμένα, πρόκειται είτε για δοκίμια δοκίμια *CT* (Compact Tension) είτε για δοκίμια με ύπαρξη εγκοπής τα οποία καταπονούνται σε κάμψη τριών σημείων (*SENB*-Single Edge Notch Bend). Προκειμένου να υπάρχουν συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης και να προσδιοριστεί η κρίσιμη τιμή του συντελεστή έντασης των τάσεων K_{Ic} απαιτείται τα δοκίμια να έχουν ένα ελάχιστο πάχος το οποίο καθορίζεται από την εξίσωση (2.11).

$$B \geq 2,5 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_y} \right)^2 \quad (2.11)$$

όπου B είναι το ελάχιστο πάχος του δοκιμίου στο οποίο ο συντελεστής έντασης των τάσεων έχει σταθερή τιμή,

K_{Ic} είναι οι η τιμή της δυσθραυστότητας του υλικού και σ_y είναι τάση διαρροής του υλικού.



Σχήμα 2.9: Πειραματικά δοκίμια *CT* (αριστερά) και *SENB* (δεξιά) για τον υπολογισμό του συντελεστή έντασης των τάσεων

Η χρήση της θραυστομηχανικής έχει αρκετά πλεονεκτήματα στην περίπτωση που μελετώνται ελαστικά προβλήματα, οπότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο συντελεστής έντασης των τάσεων K αντί του ολοκληρώματος J . Σε αυτά τα πλεονεκτήματα συμπεριλαμβάνεται η δυνατότητα που χαρακτηρίζει την ελαστική θραυστομηχανική να λαμβάνει υπόψη επιρροές από διάφορες παραμέτρους του υλικού, όπως η επίδραση της εν ψυχρώ έλασης και η ταχύτητα επιβολής της φόρτισης. Επιπλέον, έχει αποδειχθεί ότι είναι αξιόπιστη διαδικασία μέσω πολλών πειραμάτων και αναλύσεων που έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν. Ο υπολογισμός της δυσθραυστότητας με βάση το συντελεστή έντασης των τάσεων K , μπορεί να μετατραπεί σε τιμές του ολοκληρώματος J σύμφωνα με την εξίσωση:

$$J = \frac{K^2}{E} (1-\nu^2) \quad (2.12)$$

όπου E είναι το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα και ν ο λόγος Poisson.

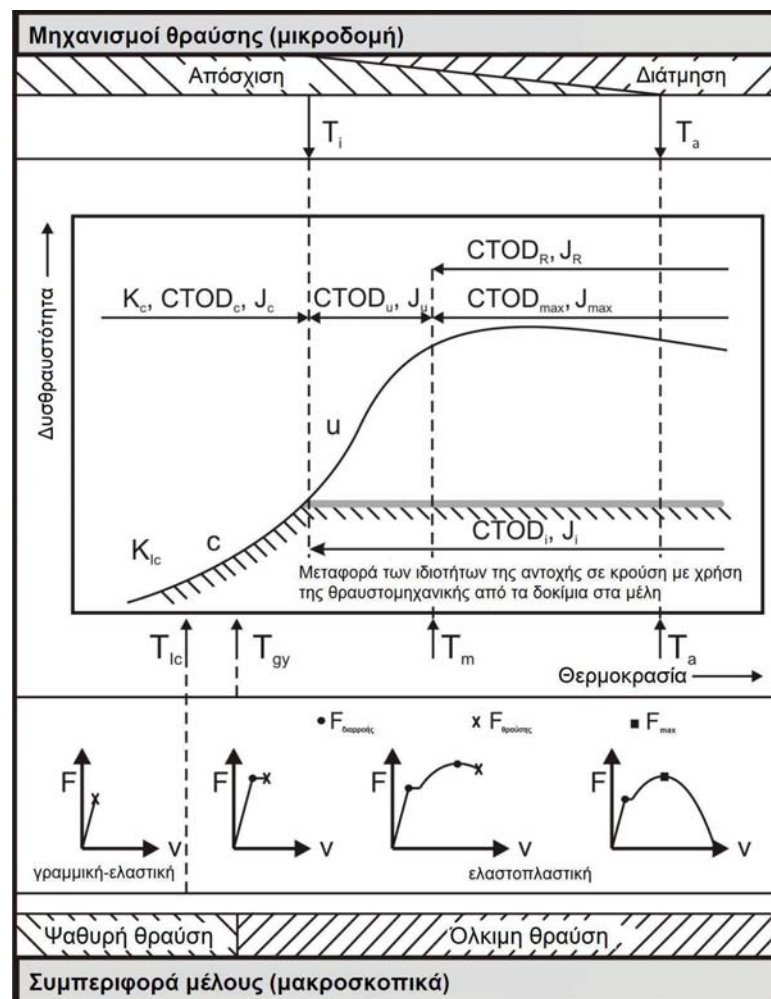
Ο υπολογισμός των μεταβλητών του συντελεστή έντασης των τάσεων και του ολοκληρώματος J περιγράφεται με ακρίβεια στους κανονισμούς ASTM E1921 [45] και ESIS P1 [46]. Παρόλα αυτά οι διαδικασίες από τις οποίες προκύπτουν αυτές οι τιμές είναι εξαιρετικά επίπονες καθώς χρειάζονται αρκετό χρόνο ενώ ταυτόχρονα έχουν υψηλό κόστος, με αποτέλεσμα στις περισσότερες περιπτώσεις οι αντίστοιχες τιμές να μην παρέχονται κατά την επιλογή της επιθυμητής ποιότητας χάλυβα για ένα έργο. Για το λόγο αυτό σε κανονισμούς όπως ο EN 10025 [35] οι παράμετροι που σχετίζονται με τη δυσθραυστότητα του υλικού περιορίζονται στην επιβολή ελαχίστων τιμών της απαιτούμενης ενέργειας Charpy που πρέπει να επιτευχθεί σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία, π.χ. για χάλυβα S355J2: $T_{27J} = -20^\circ\text{C}$, δηλαδή πρέπει η απορροφούμενη ενέργεια Charpy να είναι $\geq 27\text{J}$ για θερμοκρασία πειράματος -20°C . Η δοκιμή Charpy έλαβε το όνομά της από τον δημιουργό της και υπολογίζει την ενέργεια που απορροφά ένα δοκίμιο κατάλληλης γεωμετρίας κατά τη θραύση του κατά την επιβολή ενός κρουστικού φορτίου. Παρά το γεγονός ότι οι τιμές που προκύπτουν από τη δοκιμή Charpy δεν έχουν άμεση σχέση με τη δυσθραυστότητα ενός υλικού καθώς βασίζονται σε κρουστική θραύση, έχουν βρει ευρεία εφαρμογή καθώς είναι ευκολότερες και οικονομικότερες από τα αντίστοιχα πειράματα θραυστομηχανικής που είναι απαραίτητα για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του συντελεστή έντασης τάσεων και του ολοκληρώματος J .

Κατά τη δοκιμή Charpy μια αιωρούμενη σφύρα προσκρούει σε ένα δοκίμιο τυποποιημένης γεωμετρίας, σύμφωνα με τη διάταξη που φαίνεται στο Σχήμα 2.10. Το δοκίμιο τοποθετείται ως αμφιέριστη δοκός μεταξύ δύο στηριγμάτων τα οποία απέχουν 40cm μεταξύ τους ενώ οι διαστάσεις του ίδιου περιγράφονται στην §4.2.3. Στη συσκευή υπάρχει ένας δείκτης ο οποίος καταγράφει το μέγιστο σημείο στο οποίο ταλαντώνεται η σφύρα μετά τη θραύση του δοκιμίου. Με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται η απορροφούμενη ενέργεια (CVN) από το δοκίμιο μέσω της διαφοράς του ύψους από το οποίο η σφύρα αφήνεται ελεύθερη και του ύψους στο οποίο καταλήγει μετά την κρούση. Το γινόμενο του ύψους που βρίσκεται η σφύρα σε κάθε σημείο επί το βάρος της δίνει την προσφερόμενη ενέργεια και από τη διαφορά μεταξύ αρχικού και τελικού ύψους προκύπτει η ενέργεια που απορρόφησε το δοκίμιο σε Joule για συγκεκριμένη κάθε φορά θερμοκρασία.



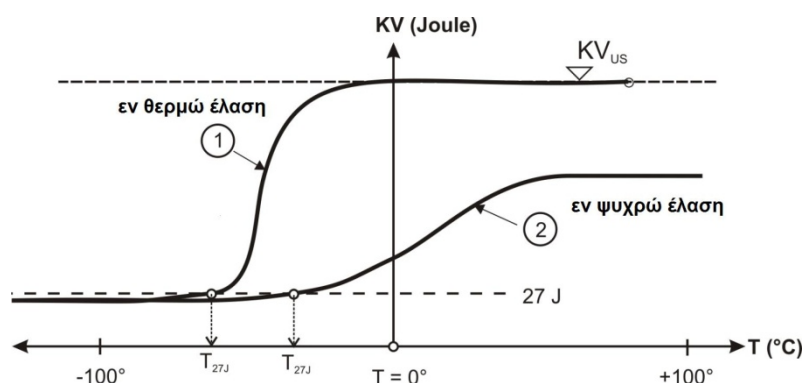
Σχήμα 2.10: Διάταξη δοκιμής Charpy

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η δυσθραυστότητα επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία. Για το λόγο αυτό, η δοκιμή Charpy επαναλαμβάνεται πολλές φορές διαφοροποιώντας κάθε φορά τη θερμοκρασία του δοκιμίου που εξετάζεται. Με τον τρόπο αυτό εξάγονται διαγράμματα όπως αυτό του Σχήματος 2.11 στο οποίο καταγράφεται η δυσθραυστότητα του υλικού συναρτήσει της θερμοκρασίας. Από το Σχήμα φαίνεται ότι η συμπεριφορά έναντι θραύσης χαρακτηρίζεται ως ψαθυρή εφόσον η αστοχία παρατηρηθεί σε χαμηλότερη θερμοκρασία από την T_{gy} , ενώ η συμπεριφορά της κατασκευής είναι γραμμική ελαστική, με τοπικές μόνο πλαστικοποιήσεις στα σημεία των ακμών των ρωγμών. Σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες παρατηρείται πλαστικοποίηση στη διατομή του μέλους, οπότε το διάγραμμα φορτίου μετατόπισης παύει πλέον να είναι γραμμικό και η συμπεριφορά έναντι θραύσης χαρακτηρίζεται ως όλκιμη. Στο τμήμα της καμπύλης του Σχήματος 2.11 με το δείκτη c βασικός μηχανισμός θραύσης είναι η απόσχιση, με αποτέλεσμα μετά το σχηματισμό μιας ρωγμής η περαιτέρω ανάπτυξη αυτής να είναι απότομη χωρίς κατανάλωση επιπλέον ενέργειας και για το λόγο αυτό η επιμήκυνση της ρωγμής χαρακτηρίζεται ασταθής. Το σημείο i χαρακτηρίζεται από την απαρχή της όλκιμης δημιουργίας ρωγμών με αποτέλεσμα να χρειάζεται επιπρόσθετη ενέργεια προκειμένου να επεκταθεί μια ρωγμή και για το λόγο αυτό η επιμήκυνση της ρωγμής χαρακτηρίζεται σταθερή. Στην περιοχή με δείκτη u πραγματοποιείται βαθμιαία αλλαγή του τρόπου αστοχίας του χάλυβα, σε όλκιμες μορφές σε σχέση με την απόσχιση που επικρατεί στις χαμηλότερες θερμοκρασίες.



Σχήμα 2.11: Σχέση μεταξύ συμπεριφοράς και ιδιοτήτων έναντι θραύσης [37]

Καθώς η δυσθραυστότητα των μετάλλων εξαρτάται από τη θερμοκρασία, οι σχέσεις μεταξύ των τιμών των παραμέτρων της θραυστομηχανικής και των τιμών που προκύπτουν από τις δοκιμές Charpy πρέπει να διαχωριστούν ανάλογα με την περιοχή θερμοκρασιών της αντοχής έναντι κρούσης που εξετάζεται κάθε φορά. Πρέπει δηλαδή να υπάρξει διαφοροποίηση στους συσχετισμούς που θα χρησιμοποιηθούν στην κατώτερη (μικρή απορροφούμενη ενέργεια-ψαθυρή θραύση), την ανώτερη (μεγάλη απορροφούμενη ενέργεια-όλκιμη θραύση) και τη μεταβατική (πτώση απορροφούμενης ενέργειας-μεταβολή από όλκιμη σε ψαθυρή θραύση) περιοχή θερμοκρασιών του διαγράμματος του Σχήματος 2.11. Στο σημείο αυτό επισημαίνεται ότι η συμπεριφορά των χαλύβων στη μεταβατική περιοχή του διαγράμματος μπορεί να είναι πολύ διαφορετική, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.12. Στο Σχήμα αυτό φαίνεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της δυσθραυστότητας KV_{US} στην άνω περιοχή του διαγράμματος, τόσο πιο απότομη είναι η μεταβατική καμπύλη και τόσο μικρότερη η διαφορά $T_{27J} - T_{US}$. Η μείωση της δυσθραυστότητας εξαιτίας της εν ψυχρώ έλασης οφείλεται κυρίως στην αύξηση του ορίου διαρροής του χάλυβα εξαιτίας της ψυχρής κατεργασίας



Σχήμα 2.12: Παράδειγμα δύο διαφορετικών μεταβατικών περιοχών θερμοκρασίας στο διάγραμμα της αντοχής σε κρούση [37]

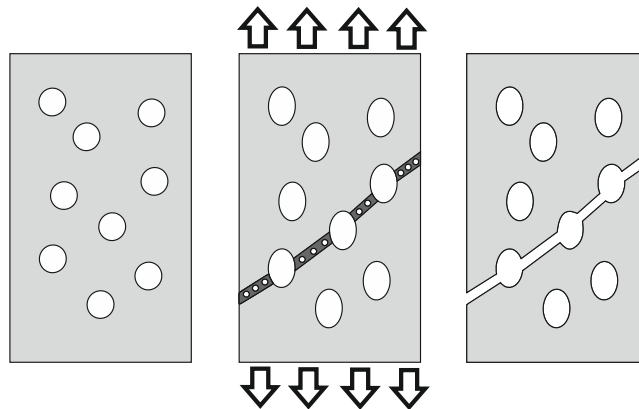
2.3.2 Χρήση των αρχών της μηχανικής της βλάβης

Η χρήση της θραυστομηχανικής προϋποθέτει τη χρησιμοποίηση δοκιμών CT και αναλυτικών τεχνικών στις οποίες έχουν εισαχθεί εκ των προτέρων ρωγμές. Η θέση δηλαδή και το μέγεθος της ρωγμής πρέπει να έχει προαποφασιστεί πριν την ανάλυση, γεγονός δεσμευτικό καθώς είναι εξαιρετικά δύσκολος και πολλές φορές ανακριβής ο προσδιορισμός της θέσης μιας ρωγμής σε μια κατασκευή. Επιπλέον, παράμετροι όπως είναι το ολοκλήρωμα J και το $CTOD$ είναι δύσκολο να εφαρμοστούν σε περιπτώσεις που έχουμε μεγάλης έκτασης πλαστικοποίηση ή μεταβολή της κατεύθυνσης του φορτίου όπως συμβαίνει στις περιπτώσεις ανακυκλιζόμενων φορτίσεων.

Η μηχανική της βλάβης αποτελεί εκείνο τον κλάδο της μηχανικής ο οποίος ασχολείται με την προσομοίωση της δημιουργίας και επέκτασης μιας ρωγμής σε ένα υλικό με βάση τη μηχανική του συνεχούς μέσου. Το υλικό θεωρείται δηλαδή ομογενές, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη πιθανά εγκλείσματα, κενά ή προϋπάρχουσες ρωγμές που αλλοιώνουν τον ενιαίο χαρακτήρα του. Η μηχανική της βλάβης χρησιμοποιεί διάφορες μεταβλητές προκειμένου να περιγράψει τη βαθμιαία αστοχία στο υλικό. Αρχικά το υλικό θεωρείται άθικτο, ενώ στη συνέχεια χρησιμοποιούνται κριτήρια ικανά να προβλέψουν την έναρξη της βλάβης. Η βλάβη αυτή στη συνέχεια επεκτείνεται μέσω επιπλέον κριτηρίων μέχρι όπου υπάρξει τελική αστοχία στο υλικό. Στην παρούσα διατριβή αναπτύσσεται ένα κριτήριο προκειμένου να προσομοιωθεί η έναρξη δημιουργίας μιας ρωγμής στο δομικό χάλυβα υπό ανακυκλιζόμενες φορτίσεις, χωρίς να γίνεται αναφορά στη διαδικασία επέκτασης της ρωγμής στο υλικό.

Στη μηχανική της βλάβης δεν είναι επομένως απαραίτητη η εκ των προτέρων θεώρηση μιας ρωγμής στο υλικό προκειμένου να μπορούν να εφαρμοστούν οι αρχές της, γεγονός το οποίο απαιτείται στη θραυστομηχανική, όπου η θέση και το μέγεθος της ρωγμής πρέπει να έχει προαποφασιστεί πριν την ανάλυση, γεγονός δεσμευτικό καθώς είναι εξαιρετικά δύσκολος και πολλές φορές ανακριβής ο προσδιορισμός της θέσης μιας ρωγμής σε μια κατασκευή. Ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματα των μοντέλων της μηχανικής της βλάβης, όπως το μοντέλο GTN (Gurson-Tvergaard-Needleman) και οι καμπύλες βλάβης που θα αναπτυχθούν στο Κεφάλαιο 3, είναι η δυνατότητα μεταφοράς των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από πειράματα σε μικρού μεγέθους δοκίμια στην πραγματική κατασκευή, καθώς οι παράμετροι του μοντέλου είναι γεωμετρικά ανεξάρτητες.

Η μηχανική της βλάβης βασίζεται στη συμπεριφορά της δομής του υλικού υπό την επίδραση μια φόρτισης. Η βασική επιδίωξη είναι η εύρεση κατάλληλων μηχανικών παραμέτρων και εξισώσεων οι οποίες θα μπορούν να περιγράψουν την ύπαρξη και επέκταση της βλάβης στο υλικό. Στο Σχήμα 2.13 φαίνεται η βασική θεώρηση της μηχανικής της βλάβης. Σύμφωνα με αυτή, εξ' αρχής στο υλικό υπάρχουν ομοιόμορφα κατανομημένα κενά τα οποία μετά τη φόρτιση διογκώνονται, ενώ ταυτόχρονα δημιουργούνται νέα κενά μικρότερου μεγέθους, τα οποία τελικά συνενώνονται επιφέροντας βαθμιαία τη βλάβη του υλικού μέσω σχηματισμού ρωγμών. Η συνένωση αυτή των κενών επιτρέπει στη ρωγμή να επεκταθεί και τελικά να επέλθει η θραύση του δοκιμίου του Σχήματος 2.13.



Σχήμα 2.13: Βαθμιαία βλάβη του χάλυβα υπό εφελκυστική φόρτιση

Ο Kachanov [54] ήταν αυτός που εισήγαγε την ιδέα της βλάβης στο πλαίσιο της μηχανικής του συνεχούς μέσου. Θεώρησε ισότροπες συνθήκες για τη βλάβη, θεωρώντας το υλικό ομοιογενές και τις επιπτώσεις της ύπαρξης των κενών ομοιόμορφα κατανομημένες στο σώμα του υλικού. Με τον τρόπο αυτό χρησιμοποίησε τον όρο της ενεργού βλάβης, ορίζοντας μια μεταβλητή σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\varphi = \frac{A - \bar{A}}{A} \quad (2.13)$$

όπου A είναι το εμβαδόν της διατομής αν δεν υπήρχαν ρωγμές και κενά και

\bar{A} είναι το ενεργό εμβαδόν που αντιστοιχεί στη διατομή αν αφαιρεθούν οι ρωγμές και οι κοιλότητες.

Όπως φαίνεται από την εξίσωση (2.13) όταν $\varphi=0$ έχουμε την εξιδανικευμένη περίπτωση όπου το υλικό δεν περιέχει καθόλου ρωγμές. Αντίθετα, το ζητούμενο είναι η κρίσιμη τιμή της μεταβλητής φ_{cr} στην οποία έχουμε αστοχία του δοκιμίου, όπως περιγράφεται στο Σχήμα 2.13.

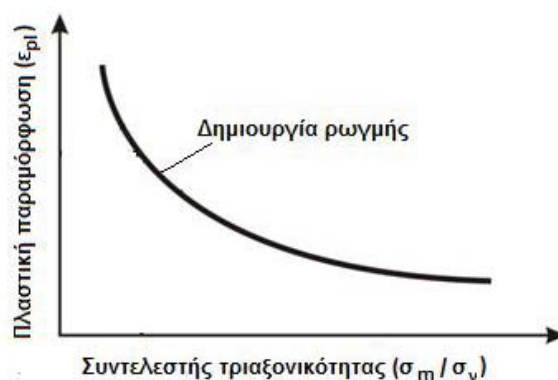
Σύμφωνα με τον Lemaître [55], η κρίσιμη τιμή της μεταβλητής της βλάβης κυμαίνεται από 0,2 έως 0,8 για την περίπτωση μεταλλικών υλικών.

Η αυξανόμενη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων προκειμένου να καθοριστεί η βλάβη σε κάποιο δομικό μέλος, οδήγησε στην αναγκαιότητα ύπαρξης μιας μεθόδου η οποία θα μπορεί να συνδυάζει τις τοπικές τάσεις και παραμορφώσεις που προκύπτουν από την ανάλυση, με το ποσοστό της βλάβης στο σώμα του υλικού. Οι πλαστικές παραμορφώσεις αποτέλεσαν εξ αρχής την κρίσιμη παράμετρο που θα έπρεπε να οριοθετηθεί, καθώς η αστοχία συνοδεύεται από σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις. Η κατανομή των τάσεων του υλικού τη στιγμή της αστοχίας παίζει σημαντικό ρόλο, καθώς οι υψηλές τάσεις προς όλες τις κατευθύνσεις (υψηλή τριαξονικότητα) έχουν ως αποτέλεσμα την επιτάχυνση της βλάβης και άρα μικρότερη τιμή παραμορφώσεων τη στιγμή της αστοχίας.

Οι καμπύλες βλάβης αποτυπώνουν το συσχετισμό πλαστικών παραμορφώσεων με την εντατική κατάσταση του υλικού. Οι καμπύλες αυτές δηλαδή, αποτελούν το όριο για το σχηματισμό ή μη μιας ρωγμής στο σώμα του υλικού. Ο Lemaître [55] το 1985 διατύπωσε ένα κριτήριο όλκιμης αστοχίας κατά το οποίο η πλαστική παραμόρφωση εξαρτάται από την τριαξονικότητα. Οι καμπύλες βλάβης συνδυάζουν κατά μοναδικό τρόπο τις πλαστικές παραμορφώσεις με την τριαξονικότητα στο υλικό καταλήγοντας σε μια οριακή συνθήκη που ορίζει την εκκίνηση της βλάβης στο χάλυβα. Ο συντελεστής τριαξονικότητας ορίζεται ως το πηλίκο της υδροστατικής πίεσης (σ_m) προς την ισοδύναμη τάση von Mises (σ_v) όπως φαίνεται στην εξίσωση:

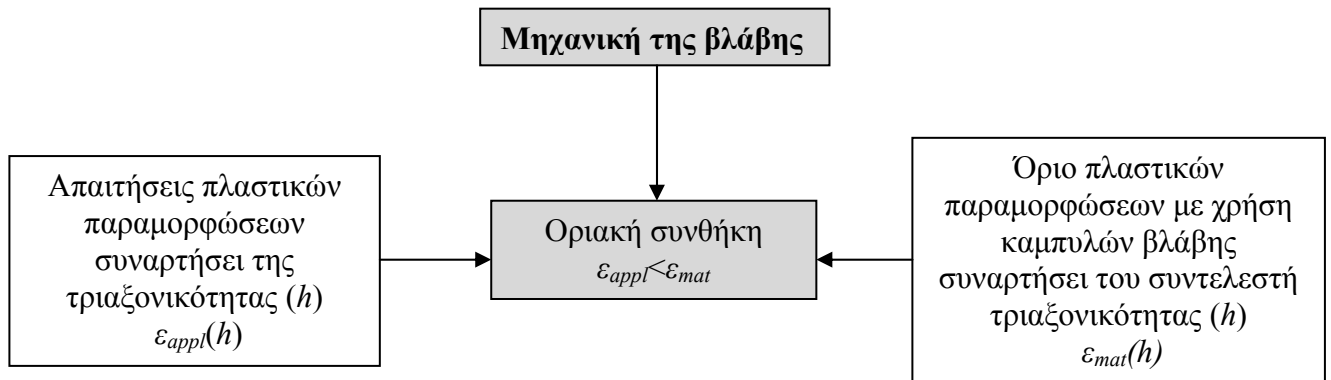
$$h = \frac{\sigma_m}{\sigma_v} = \frac{\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}}{\sqrt{1/2[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}} \quad (2.14)$$

Στο Σχήμα 2.14 παρουσιάζεται γραφικά μια καμπύλη βλάβης η οποία ορίζει την οριακή συνθήκη απαρχής της αστοχίας, δηλαδή τη στιγμή που θα έχουμε τη δημιουργία μιας ρωγμής συγκεκριμένου μεγέθους στο σώμα του υλικού. Από το σχήμα φαίνεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του συντελεστή τριαξονικότητας, τόσο μικρότερη είναι η τιμή των τοπικών παραμορφώσεων τη στιγμή της αστοχίας.



Σχήμα 2.14: Γραφική αναπαράσταση καμπύλης βλάβης

Στο Σχήμα 2.15 φαίνεται η λογική που διέπει τη μηχανική της βλάβης. Οι απαιτήσεις των παραμορφώσεων στο χάλυβα συναρτίζεται του συντελεστή τριαξονικότητας h κατά τη διάρκεια μιας φόρτισης, συγκρίνονται με μια οριακή τιμή συγκέντρωσης παραμορφώσεων όπως αυτή προσδιορίζεται από την καμπύλη βλάβης προκειμένου να καθοριστεί αν υπάρχει αστοχία.



Σχήμα 2.15: Σχηματική αναπαράσταση κριτηρίου με βάση τη μηχανική της βλάβης

2.4 Μηχανισμοί αστοχίας στο δομικό χάλυβα

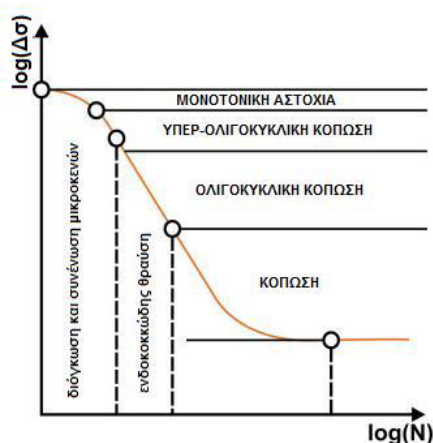
2.4.1 Τύποι κόπωσης

Στο Κεφάλαιο 1 έγινε αναφορά σε αστοχίες μεταλλικών μελών και συνδέσεων μέσω της δημιουργίας και επέκτασης ρωγμών κατά την επίδραση σεισμικών δράσεων. Η κόπωση ορίζεται ως η αστοχία που προέρχεται εξαιτίας αυτής της δημιουργίας και της επέκτασης της ρηγμάτωσης κατά την επίδραση αλληπάλληλων κύκλων φόρτισης. Η ανακυκλιζόμενη φύση των φορτίσεων έχει σημαντική επίδραση στην αντοχή και την ολκιμότητα των κατασκευών και των δομικών μελών. Οι σεισμικές φορτίσεις αποτελούνται από επαναλαμβανόμενους κύκλους φόρτισης διαφορετικής έντασης και κατεύθυνσης. Η διαδικασία συσσώρευσης βλάβης εξαρτάται από διάφορους μηχανισμούς οι οποίοι εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της μικροδομής του υλικού, την ένταση και τη χρονιότητα της φόρτισης.

Η συνήθης κόπωση αναφέρεται σε αστοχία μετά την πάροδο κάποιων εκατοντάδων χιλιάδων ή εκατομμυρίων κύκλων φόρτισης καθώς οι τάσεις και οι παραμορφώσεις έχουν μικρή τιμή. Ωστόσο, υπάρχει και η περίπτωση της ολιγοκυκλικής κόπωσης κατά την οποία η αστοχία επέρχεται μετά την πάροδο κάποιων εκατοντάδων κύκλων φόρτισης (<10000 κύκλους φόρτισης), ενώ οι τάσεις και οι παραμορφώσεις έχουν πολύ μεγαλύτερες τιμές. Στην περίπτωση της απλής κόπωσης η πλαστικοποίηση της ακμής μιας ρωγμής είναι πολύ περιορισμένη και η αστοχία επέρχεται εξαιτίας της συσσώρευσης της βλάβης εντός πολύ μικρών περιοχών και της βαθμιαίας αύξησης της ρωγμής, με αποτέλεσμα η μικροδομή του υλικού να έχει μεγάλη σημασία στη διάρκεια ζωής του μέλους. Κατά την ολιγοκυκλική κόπωση η πλαστικοποίηση στην ακμή της ρωγμής είναι εντονότερη ενώ η επέκταση της ρωγμής επέρχεται εξαιτίας της ανακυκλιζόμενης φόρτισης που προκαλεί την άμβλυνση της ακμής της ρωγμής κατά την απομάκρυνση των χειλέων της και την όξυνσή της όταν τα χείλη της ρωγμής πλησιάζουν. Σε αυτόν τον τύπο της αστοχίας κυρίαρχη είναι η διαδικασία μεταβολής του σχήματος της ακμής της ρωγμής, με αποτέλεσμα η μικροδομή του υλικού να μην είναι κρίσιμη.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής μελετάται η αστοχία ενός μέλους ή μιας σύνδεσης κατά τη διάρκεια ενός σεισμού. Στην περίπτωση αυτή η αστοχία επέρχεται σε πολύ μικρότερο αριθμό κύκλων φόρτισης, ενώ ο μηχανισμός αστοχίας διαφέρει, καθώς σημαντικό ρόλο στην επέκταση μιας ρωγμής δεν παίζει μόνο η άμβλυνση και η όξυνση της ακμής της αλλά και η διόγκωση και συνένωση των μικροκενών του υλικού. Για το λόγο αυτό ο συγκεκριμένος τύπος φόρτισης θα αναφέρεται ως ολιγοκυκλική φόρτιση υπό περιορισμένο αριθμό κύκλων φόρτισης (υπέρ-ολιγοκυκλική κόπωση), ώστε να γίνεται εφικτός ο διαχωρισμός του από την παραδοσιακή ολιγοκυκλική κόπωση που λαμβάνει χώρα σε μεγαλύτερο αριθμό κύκλων. Η ολιγοκυκλική κόπωση

υπό περιορισμένο αριθμό κύκλων φόρτισης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη μικροδομή του υλικού, καθώς ο μηχανισμός της διόγκωσης και της δημιουργίας νέων μικροκενών ο οποίος συνεισφέρει στην αστοχία σχετίζεται άμεσα με τον τρόπο διάταξης των δομικών στοιχείων στο σώμα του υλικού. Η διαδικασία συσσώρευσης της βλάβης κατά την ολιγοκυκλική κόπωση υπό περιορισμένο αριθμό κύκλων φόρτισης είναι όμοια με αυτή της μονοτονικής φόρτισης του υλικού. Η διαδικασία σχηματισμού ρωγμών καθώς και η επέκτασή τους ακολουθεί τους ίδιους κανόνες με αυτούς που περιγράφηκαν κατά τη διαδικασία της μονοτονικής φόρτισης μέσω του Σχήματος 2.13. Στο Σχήμα 2.16 φαίνεται η συσχέτιση της ολιγοκυκλικής κόπωσης υπό περιορισμένο αριθμό κύκλων φόρτισης (υπέρ-ολιγοκυκλικής κόπωσης) με τη μονοτονική φόρτιση καθώς και με άλλες μορφές κόπωσης.



Σχήμα 2.16: Μηχανισμοί αστοχίας για διαφορετικά στάδια κόπωσης [56]

Η συγγένεια μεταξύ της αστοχίας λόγω μονοτονικής φόρτισης και ολιγοκυκλικής κόπωσης υπό περιορισμένο αριθμό κύκλων φόρτισης οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι καμπύλες βλάβης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στην περίπτωση των ανακυκλιζόμενων φορτίσεων. Όπως αναλύθηκε προηγουμένως, οι καμπύλες βλάβης παρέχουν τον κρίσιμο συνδυασμό μεταξύ των πλαστικών παραμορφώσεων και του συντελεστή τριαξονικότητας για τον οποίο έχουμε δημιουργία ρωγμών. Ο υπολογισμός της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης στην περίπτωση της μονοτονικής φόρτισης γίνεται με ευκολία καθώς το φορτίο αυξάνεται μέχρι αστοχίας. Στην περίπτωση των ανακυκλιζόμενων φορτίσεων οι ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις υπολογίζονται για φορτία που αυξομειώνονται και αλλάζουν κατεύθυνση με αποτέλεσμα η χρήση τους σε συνδυασμό με την καμπύλη βλάβης να οδηγεί σε συντηρητικά αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό κατά τον υπολογισμό των παραμορφώσεων χρησιμοποιήθηκε η πρόταση των Ohata και Toyoda [57] σύμφωνα με την οποία εισάγεται μια τεχνική η οποία απομειώνει τις υπολογισθείσες ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις λαμβάνοντας υπόψη τη συμπεριφορά του χάλυβα στην πλαστική περιοχή υπό ανακυκλιζόμενες συνθήκες φόρτισης. Πλήρης αναφορά αυτού του μοντέλου αστοχίας θα γίνει στο Κεφάλαιο 7.

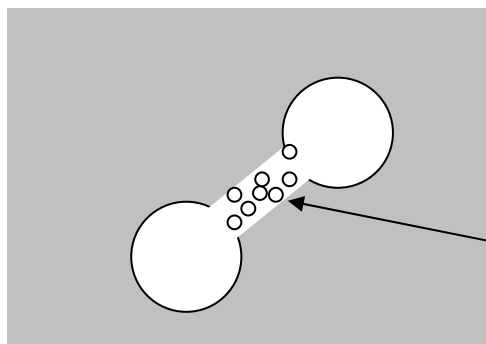
2.4.2 Ο μηχανισμός της ολιγοκυκλικής κόπωσης υπό περιορισμένο αριθμό κύκλων φόρτισης

Το φαινόμενο της ολιγοκυκλικής κόπωσης υπό περιορισμένο αριθμό κύκλων φόρτισης δεν έχει απασχολήσει σε μεγάλο βαθμό τη διεθνή επιστημονική κοινότητα σε σύγκριση με την παραδοσιακή κόπωση. Ο λόγος πρέπει να αναζητηθεί στο μειωμένο εύρος προβλημάτων που αυτή προκαλεί. Αντίθετα, τα φαινόμενα της κόπωσης έχουν αναλυθεί διεξοδικότερα εξαιτίας της ευρείας χρήσης μεταλλικών υλικών σε κατασκευές που δέχονται μακροχρόνιες εναλλαγές φορτίσεων στην

ελαστική συνήθως περιοχή, όπως είναι τα αεροπλάνα, τα πλοία, οι αγωγοί, οι υπεράκτιες κατασκευές, οι ανεμογεννήτριες κλπ. Στην ολιγοκυκλική κόπωση υπό περιορισμένο αριθμό κύκλων φόρτισης ο αριθμός των κύκλων που οδηγεί στην αστοχία είναι σημαντικά μικρότερος, ενώ υπάρχουν πολύ μεγαλύτερες παραμορφώσεις οι οποίες και είναι υπεύθυνες για την επέκταση των ρωγμών και την τελική αστοχία. Το αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος καθιστά τον αριθμό των κύκλων φόρτισης λιγότερο σημαντικό σε σχέση με την παραδοσιακή κόπωση, ωστόσο δεν είναι αμελητέος καθώς η αστοχία επέρχεται σε διαφορετικές τιμές παραμορφώσεων σε σχέση με μονοτονικές συνθήκες φόρτισης.

Η διαδικασία επέκτασης της ρωγμής είτε στην περίπτωση της ολιγοκυκλικής κόπωσης υπό περιορισμένο αριθμό κύκλων φόρτισης είτε υπό μονοτονική φόρτιση ακολουθεί τα ίδια στάδια. Αρχικά εξαιτίας της φόρτισης αυξάνονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις στο υλικό με αποτέλεσμα να εντείνονται οι περιοχές ανάμεσα στα μικροκενά του υλικού και να δημιουργείται στένωση (δημιουργία λαιμού) στο καθαρό υλικό. Στη συνέχεια σε αυτή την περιοχή είτε δημιουργούνται νέα μικροκενά η συνένωση των οποίων επιφέρει την επέκταση ή τη δημιουργία μιας ρωγμής, είτε εξαιτίας του μειωμένου εμβαδού και του περιορισμού των παραμορφώσεων αυξάνεται η τιμή της τριαξονικότητας με αποτέλεσμα να υποστεί θραύση το υλικό. Δηλαδή, η εφελκυστική φόρτιση ενός δοκιμίου μεταβάλλει το σχήμα των κενών του υλικού από σφαιρικό που είναι αρχικά, σε ελλειψοειδές. Η αλλαγή του σχήματος των κενών δημιουργεί τοπική αύξηση των τάσεων στο υλικό που βρίσκεται ανάμεσά τους και εφόσον η αντοχή του υλικού έναντι θραύσης εξαντληθεί, τα γειτονικά κενά συνενώνονται με τμήση του μεταξύ τους υλικού.

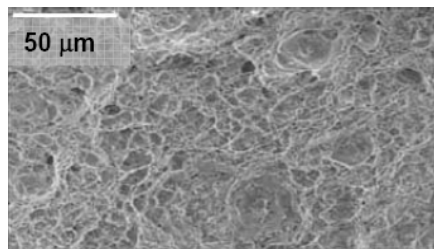
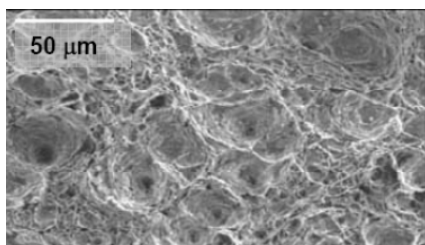
Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι οι διαδικασίες σχηματισμού και επέκτασης μιας ρωγμής υπό μονοτονικές και ανακυκλιζόμενες συνθήκες φόρτισης εξαρτώνται από το ποσοστό των μικροκενών στο σώμα του υλικού σε κάθε στάδιο της φόρτισης. Για το λόγο αυτό έχει οριστεί ένας κρίσιμος λόγος κενών ο οποίος αντικατοπτρίζει την εντατική κατάσταση στο σημείο που το υλικό έχει υποστεί στένωση. Ο λόγος των κενών ορίζεται ως το κλάσμα των κενών στο σώμα του υλικού προς το συμπαγές υλικό, ενώ η κρίσιμη τιμή του αποτελεί το όριο πάνω από το οποίο επέρχεται η αστοχία. Ο λόγος αυτός αφορά αποκλειστικά το ποσοστό των κενών στο σώμα του υλικού και δεν εξετάζει την επίδραση που έχουν το σχήμα ή η θέση τους. Ωστόσο, αν και η θέση και το σχήμα των κενών δεν επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την αστοχία υπό μονοτονική φόρτιση, δεν συμβαίνει το ίδιο υπό ανακυκλιζόμενες συνθήκες φόρτισης. Αυτό οφείλεται στη φύση της ανακυκλιζόμενης φόρτισης και των εναλλασσόμενων θετικών και αρνητικών τάσεων στις οποίες υπόκειται το υλικό καθώς και τις αλληπάλληλες συστολές και διαστολές των μικροκενών. Η ανακύκλιση δηλαδή έχει σαν αποτέλεσμα τη διαφοροποίηση του τρόπου αύξησης της βλάβης στην περιοχή του υλικού που έχει υποστεί στένωση και η οποία βρίσκεται ανάμεσα στα κενά. Η θραύση του υλικού επέρχεται σε μικρότερες τιμές καθώς η ανακυκλιζόμενη φόρτιση προκαλεί δυσμενέστερη εντατική κατάσταση στο υλικό. Το γεγονός ότι στην ολιγοκυκλική κόπωση υπό περιορισμένο αριθμό κύκλων φόρτισης οι ανακυκλίσεις γίνονται συνήθως υπό συνθήκες πλαστικής παραμόρφωσης, έχει ως αποτέλεσμα τη συνένωση των δευτερευόντων μικροκενών που έχουν δημιουργηθεί ανάμεσα στα μικροκενά που υπάρχουν εξ' αρχής στο σώμα του υλικού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.17. Το αποτέλεσμα είναι η αστοχία να επέρχεται σε μικρότερη τιμή του λόγου των κενών σε σχέση με τη μονοτονική φόρτιση.



Μικρότερα κενά
που προκαλούν τη
δημιουργία
τοπικής ζώνης
διάττησης

Σχήμα 2.17: Συνένωση δευτερευόντων μικροκενών υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση

Στο Σχήμα 2.18 φαίνονται οι επιφάνειες θραύσης του χάλυβα της εργασίας (S355J2) με τη βοήθεια ηλεκτρονικού μικροσκοπίου. Στην πρώτη εικόνα φαίνεται η επιφάνεια θραύσης στην περίπτωση ολιγοκυκλικής κόπωσης 10 κύκλων φόρτισης, ενώ στη δεύτερη λόγω μονοτονικής φόρτισης. Οι επιφάνειες και των δύο περιπτώσεων χαρακτηρίζονται από κοιλότητες που προέκυψαν από τα αρχικά μικροκενά του υλικού. Η επιφάνεια που αστόχησε υπό μονοτονική φόρτιση χαρακτηρίζεται από βαθύτερα εξογκώματα με μέσο μέγεθος 20 μm τα οποία παρατηρούνται ανάμεσα σε εξογκώματα μικρότερου μεγέθους. Στην περίπτωση του δοκιμίου που αστόχησε υπό ολιγοκυκλική κόπωση περιορισμένου αριθμού κύκλων φόρτισης, εμφανίζονται πιο ρηγά και μικρά εξογκώματα με μέσο μέγεθος 5 μm ανάμεσα στα οποία υπάρχουν λίγα μεγαλύτερου μεγέθους (μέχρι 25 μm). Η μορφολογία αυτή των δοκιμίων λαμβάνεται υπόψη κατά την επιλογή του μεγέθους των πεπερασμένων στοιχείων που θα χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση των φαινομένων. Επιπλέον, η μορφή των επιφανειών αστοχίας της κάθε περίπτωσης επιβεβαιώνει τους προαναφερθέντες μηχανισμούς αστοχίας και τη μικρότερη τιμή του κρίσιμου λόγου των κενών στην περίπτωση της ανακυκλιζόμενης φόρτισης.



Σχήμα 2.18: Όλκιμες επιφάνειες αστοχίας λόγω μονοτονικής κόπωσης (αριστερά) και ολιγοκυκλικής κόπωσης υπό περιορισμένο αριθμό κύκλων φόρτισης (δεξιά)

Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι για την ανάπτυξη ενός μοντέλου το οποίο θα μπορεί να λαμβάνει υπόψη του τα φαινόμενα της ολιγοκυκλικής κόπωσης υπό περιορισμένο αριθμό κύκλων φόρτισης είναι απαραίτητο να εμπεριέχεται το φαινόμενο της αύξησης των μικροκενών του υλικού κατά τη φόρτιση και της αύξησης της βλάβης λόγω των ανακυκλίσεων. Τα υπόλοιπα φαινόμενα που οδηγούν στη θραύση σε περιπτώσεις παραδοσιακής κόπωσης, όπως οι μηχανισμοί που έχουν να κάνουν με την αναδιάταξη των κενών και των εγκλεισμάτων του υλικού εξαιτίας του μεγάλου αριθμού ανακυκλίσεων, έχουν μικρή επίδραση στην τελική αστοχία.

2.4.3 Επίδραση της ταχύτητας φόρτισης στο μηχανισμό αστοχίας

Ο όλκιμος μηχανισμός δημιουργίας μιας ρωγμής περιλαμβάνει τις διαδικασίες της δημιουργίας, της διάγκωσης και της συνένωσης των κενών που βρίσκονται στο σώμα του χάλυβα. Ο μηχανισμός αυτός όμως επηρεάζεται από την επίδραση της θερμοκρασίας και της ταχύτητας φόρτισης, με αποτέλεσμα η αστοχία σε ορισμένες περιπτώσεις να έχει ψαθυρή μορφή.

Η επίδραση της ταχύτητας φόρτισης σε μεταλλικές κατασκευές απασχόλησε πολλούς ερευνητές μετά από τα σεισμικά γεγονότα στο Kobe της Ιαπωνίας το 1995 και στο Northridge της Καλιφόρνια το 1994. Οι αστοχίες που παρατηρήθηκαν σε συγκολλητούς κόμβους μεταλλικών πλαισίων κατά τους σεισμούς αυτούς ήταν ψαθυρής φύσεως, χωρίς να υπάρχουν εμφανή σημάδια διαρροής του χάλυβα περιμετρικά της σύνδεσης. Η αστοχία προερχόταν από τη δημιουργία ρωγμών στο άνω και στο κάτω πέλμα των δοκών στη θέση της συγκόλλησής τους με το υποστυλώμα και οι οποίες τελικά επεκτείνονται προκαλώντας θραύση της σύνδεσης. Τα αίτια που οδήγησαν σε αυτού του τύπου την αστοχία αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 1.

Η ταχύτητα επιβολής του φορτίου υπό συνθήκες θερμοκρασίες δεν μεταβάλλει τη διαδικασία δημιουργίας μιας ρωγμής. Η ταχύτητα επιβολής επηρεάζει ωστόσο τον τρόπο με τον οποίο η ρωγή επεκτείνεται με τελικό αποτέλεσμα την αστοχία του μέλους. Έχει παρατηρηθεί [58] ότι η ψαθυρή θραύση αποτελείται από τρεις επιμέρους φάσεις, με την πρώτη να χαρακτηρίζεται από την όλκιμη δημιουργία μιας ρωγμής, τη δεύτερη από μια σταθερή αύξηση του μεγέθους της ρωγμής και την τρίτη από την απότομη επέκτασή της. Η παρούσα διατριβή επικεντρώνεται στη διαδικασία και της δημιουργίας μιας ρωγμής στο σώμα του υλικού και όχι στην επέκταση αυτής μέχρι τελικής αστοχίας. Οι πειραματικές μετρήσεις της διατριβής και οι οποίες θα περιγραφούν στα επόμενα κεφάλαια έγιναν υπό χαμηλή ταχύτητα επιβολής του φορτίου και με ταχύτητες παραμόρφωσης οι οποίες στις κρίσιμες περιοχές περιμετρικά των συγκολλήσεων δεν ξεπέρασαν την τιμή των $0,0008 \text{ sec}^{-1}$. Στην περίπτωση σεισμικών γεγονότων αναμένονται στην περιοχή της συγκόλλησης δοκού-υποστυλώματος ταχύτητες παραμόρφωσης μεταξύ $0,05 \text{ sec}^{-1}$ και $0,1 \text{ sec}^{-1}$. Παρακάτω περιγράφεται η επίπτωση που έχει η ταχύτητα της φόρτισης στην αντοχή ενός μέλους καθώς και στο ίδιο το υλικό σύμφωνα με αποτελέσματα από τη διεθνή βιβλιογραφία.

Πειράματα τα οποία έχουν πραγματοποιηθεί σε δοκίμια υπό εφελκυστική φόρτιση [59]-[60] έχουν αποδείξει ότι η αύξηση της ταχύτητας φόρτισης προκαλεί αύξηση του ορίου διαρροής του χάλυβα καθώς και της εφελκυστικής του αντοχής. Ωστόσο η αύξηση του ορίου διαρροής είναι μεγαλύτερη από την αύξηση της εφελκυστικής αντοχής, με αποτέλεσμα ο λόγος f_u/f_y να μειώνεται και επομένως να μειώνεται και η πλαστιμότητα. Η μέγιστη αύξηση του ορίου διαρροής είναι 24% ενώ αυτή της εφελκυστικής αντοχής 15%. Η μείωση της πλαστιμότητας εξαιτίας της συγκέντρωσης των πλαστικών παραμορφώσεων σε περιοχές μικρότερου μεγέθους φτάνει το 9%. Επιπλέον, αύξηση της ταχύτητας επιβολής του φορτίου έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της οριακής παραμόρφωσης θραύσης, η οποία ωστόσο είναι μικρότερου μεγέθους στην περίπτωση των εξωραφών εξαιτίας της μεγαλύτερης παραμορφωσιμότητας που τις χαρακτηρίζει σε σχέση με τις εσωραφές. Από τα πειράματα παρατηρήθηκε ότι η αύξηση του ορίου διαρροής και της εφελκυστικής αντοχής εξαιτίας της αύξησης της ταχύτητας επιβολής της φόρτισης είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση δοκιμίων μεγαλύτερου πάχους.

Εκτός από την επιρροή της ταχύτητας φόρτισης στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού, πειράματα έχουν πραγματοποιηθεί για να διαπιστωθεί η επίδρασή της στη συνολική αντοχή συγκολλητών κόμβων δοκού-υποστυλώματος. Αποτελέσματα ερευνών [59] αποδεικνύουν ότι η αύξηση της ταχύτητας επιβολής του φορτίου, μειώνει τον αριθμό των κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία της σύνδεσης. Η ταχύτητα επιβολής του φορτίου δεν επηρέασε το μηχανισμό αστοχίας, ο οποίος χαρακτηρίζεται από όλκιμο τρόπο δημιουργίας της ρωγμής η οποία επεκτείνεται μέχρι την τελική αστοχία του κόμβου. Ωστόσο τα πειραματικά δεδομένα λαμβάνουν υπόψη τους μέγιστη ταχύτητα επιβολής φορτίου της τάξεως του $0,05 \text{ sec}^{-1}$, ενώ σε συνθήκες σεισμών κοντινού πεδίου αναμένονται ταχύτητες παραμορφώσεων από $0,1 \text{ sec}^{-1}$ έως 10 sec^{-1} στην περιοχή της δοκού πλησίον της συγκόλλησης. Η αιτία για τη διαφορά αυτή έγκειται στους περιορισμούς των μετρητικών και πειραματικών διατάξεων που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση του φαινομένου. Η μεγάλη ταχύτητα επιβολής του φορτίου που παρατηρείται στους σεισμούς κοντινού πεδίου μπορεί να οδηγήσει σε ακόμα μεγαλύτερη αύξηση του ορίου διαρροής του υλικού και επομένως σε περαιτέρω

μείωση της ολκιμότητας της κατασκευής. Τελικά η όλκιμη διαδικασία αστοχίας μέσω της βαθμιαίας πλαστικοποίησης της δοκού με την πάροδο της χρονοϊστορίας φόρτισης πιθανόν να αντικατασταθεί από αστοχία ψαθυρής φύσεως μετά τους πρώτους κύκλους, γεγονός το οποίο παρατηρήθηκε στους σεισμούς του Kobe και του Northridge. Παρά τους περιορισμούς των πειραματικών διατάξεων και των οργάνων μέτρησης, η αύξηση της συχνότητας επιβολής της φόρτισης από 0,3Hz σε 0,5Hz επέφερε σημαντική μείωση της συνολικής αντοχής του κόμβου και μείωση των κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία κατά 30-40%.

Κατά τη διάρκεια άλλων μελετών [61] παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της ταχύτητας επιβολής του φορτίου δεν επέφερε μείωση του αριθμού των κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν με αφορμή τις καταστροφές που επέφερε ο σεισμός του Kobe στην Ιαπωνία, ενώ μελετήθηκαν δύο μορφολογίες συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος. Στην πρώτη τα πέλματα της δοκού συγκολλούνται στο πέλμα του υποστυλώματος ενώ ο κορμός της δοκού κοχλιώνεται σύμφωνα και με την αμερικάνικη πρακτική, ενώ στη δεύτερη γεωμετρία τόσο ο κορμός όσο και τα πέλματα της δοκού είναι συγκολλημένα με το υποστυλώμα. Η ταχύτητα επιβολής του φορτίου και σε αυτή την περίπτωση ήταν μικρότερος σε σχέση με αυτόν που καταγράφηκε στην πραγματικότητα, με αποτέλεσμα ο μηχανισμός θραύσης να παραμένει όλκιμος σε ολόκληρη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας.

Μία επιπλέον παρατήρηση από τα πειράματα που διεξήχθησαν είναι το γεγονός ότι οι δοκοί με μεγαλύτερο πάχος πελμάτων είναι πιο ευαίσθητες σε θραύση σε σχέση με αυτές που έχουν μικρότερο πάχος. Επομένως, η χρήση δοκών με μικρότερο πάχος πελμάτων μπορεί να οδηγήσει σε περιορισμό της επίδρασης της ταχύτητας επιβολής του φορτίου. Το μικρό πάχος των πελμάτων της δοκού την καθιστά ωστόσο ευπαθή σε τοπικό λυγισμό στη θέση σχηματισμού της πλαστικής άρθρωσης με αποτέλεσμα να ελαττώνονται οι επιπτώσεις της υψηλής ταχύτητας επιβολής του φορτίου στη θέση της συγκόλλησης. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι όλες οι αστοχίες παρατηρήθηκαν περιμετρικά των συγκολλήσεων και συγκεκριμένα στην περιοχή της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης, καθώς οι εξωραφές και εσωραφές που σχεδιάζονται σύμφωνα με τις προδιαγραφές του EN1993 είναι αρκετά ισχυρές ώστε να αποφεύγεται η αστοχία στη συγκόλληση ανεξαρτήτως της ταχύτητας επιβολής του φορτίου.

2.4.4 Επίδραση των παραμενουσών τάσεων της συγκόλλησης στο μηχανισμό αστοχίας

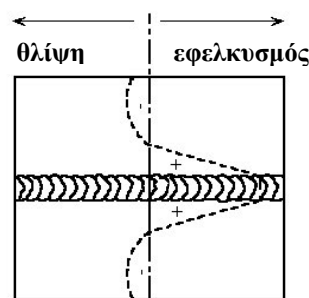
Η διαδικασία της συγκόλλησης στα μέταλλα έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική αλλαγή της δομής ενός χάλυβα, γεγονός το οποίο επηρεάζει τόσο την αντοχή όσο και τη δυσθραυστότητά του. Μετά το πέρας της συγκόλλησης γίνεται διάκριση μεταξύ τριών περιοχών στο σώμα του υλικού. Η πρώτη περιοχή αφορά το ίδιο το υλικό συγκόλλησης, η δεύτερη είναι μια θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη η οποία σχηματίζεται περιμετρικά της συγκόλλησης και η τρίτη είναι το μητρικό υλικό.

Η θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη χαρακτηρίζεται από υψηλή ανομοιογένεια καθώς βρίσκεται σε επαφή με το αρχικά ρευστό υλικό της συγκόλλησης το οποίο έχει πολύ υψηλή θερμοκρασία. Για το λόγο αυτό ενώ αρχικά η θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη έχει στερεή μορφή, στη συνέχεια ρευστοποιείται λόγω των υψηλών θερμοκρασιών της συγκόλλησης και τελικά επαναψύχεται με ανομοιόμορφο τρόπο ανάλογα με την απόσταση κάθε σημείου του υλικού από το σημείο πραγματοποίησης της συγκόλλησης.

Το μεγαλύτερο ποσοστό αστοχιών που παρατηρήθηκαν κατά τους σεισμούς του Kobe και του Northridge αποτελείτο από περιπτώσεις στις οποίες είχε πραγματοποιηθεί ρηγμάτωση στην περιοχή της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης στους κόμβους μεταλλικών πλαισίων ροπής [62]. Το γεγονός αυτό ώθησε στην ενδελεχή μελέτη της επιρροής που έχει η θερμική επεξεργασία του υλικού που βρίσκεται πλησίον της συγκόλλησης εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών που δημιουργούνται

[63]-[64]. Οι μηχανικές ιδιότητες και το μέγεθος της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης επηρεάζονται από τη χημική σύσταση τόσο του χάλυβα της συγκόλλησης όσο και του μητρικού υλικού, καθώς και από τη διαδικασία της συγκόλλησης, τη γεωμετρία των συγκολλούμενων μελών, την αναπτυσσόμενη θερμοκρασία και το χρόνο θέρμανσης [65]. Κατά την απότομη πτώση της θερμοκρασίας στην περιοχή της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης και ιδιαίτερα στη διεπιφάνεια συγκόλλησης και μητρικού υλικού ο μετασχηματισμός του ωστενίτη οδηγεί σε μαρτενσίτη. Ο μαρτενσίτης χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη αντοχή αλλά και από χαμηλότερη ολκιμότητα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη να παρουσιάζει αυξημένη αντοχή σε σχέση με το μητρικό υλικό ενώ ταυτόχρονα χαρακτηρίζεται από μειωμένη δυσθραυστότητα. Επιπλέον, στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη μπορεί να παρατηρηθεί το φαινόμενο της γήρανσης το οποίο προξενεί μείωση των πλαστικών ιδιοτήτων του χάλυβα και της δυσθραυστότητάς του.

Κατά τη δημιουργία μιας συγκόλλησης η υψηλή θερμότητα έχει ως αποτέλεσμα όχι μόνο τη μείωση της ολκιμότητας του υλικού, όπως περιγράφηκε προηγουμένως, αλλά και την εμφάνιση παραμενουσών τάσεων οι οποίες αποτελούν σοβαρό πρόβλημα στις μηχανικές ιδιότητες των κατασκευών. Συγκεκριμένα, είναι γνωστό ότι τα μέταλλα συστέλλονται και διαστέλλονται με τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Στην περίπτωση των συγκολλήσεων που οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι εξαιρετικά υψηλές, οι παραμορφώσεις μπορεί να έχουν σημαντικές τιμές. Κατά τη θέρμανση το υλικό της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης υφίσταται συστολή, ενώ κατά την ψύξη διαστέλλεται, όπως και το υλικό της ίδιας της συγκόλλησης. Η διαδικασία αυτή δημιουργεί εσωτερικές τάσεις στο υλικό οι οποίες μπορεί να είναι είτε διαξονικές στην περίπτωση λεπτών συγκολλούμενων μελών, είτε τριαξονικές στην περίπτωση που το πάχος αυξάνεται. Οι τάσεις αυτές υπάρχουν σε κάθε συγκολλητή σύνδεση χωρίς να είναι δυνατή η αποφυγή τους παρά μόνο η μείωση της μέγιστης τιμής τους. Οι παραμένουσες τάσεις στην περίπτωση μιας εσωραφής σε μία μικρού πάχους πλάκα φαίνονται στο Σχήμα 2.19. Από το σχήμα αυτό φαίνεται ότι στην περιοχή της συγκόλλησης και της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης οι τάσεις είναι εφελκυστικές εξαιτίας της διαστολής κατά την ψύξη του υλικού και είναι σχεδόν ίσες με την τάση διαρροής, ενώ στην υπόλοιπη περιοχή οι τάσεις είναι θλιπτικές προκειμένου να διατηρείται η ισορροπία στο υλικό. Η κατανομή του Σχήματος 2.19 ισχύει για την περίπτωση που η συγκόλληση πραγματοποιείται με ένα πέρασμα του ηλεκτροδίου.



Σχήμα 2.19: Παραμένουσες τάσεις στην περίπτωση εσωραφής. [89]

Στην περίπτωση πολλαπλών περασμάτων η κατανομή των τάσεων λαμβάνει διαφορετική μορφή η οποία εξαρτάται από τον αριθμό των επαναλήψεων καθώς και από το πάχος των συγκολλούμενων μελών. Ο συνηθέστερος τρόπος για τη μείωση της επίδρασης των παραμενουσών τάσεων είναι η προθέρμανση των επιφανειών που θα συγκολληθούν. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η τάση διαρροής του χάλυβα, ενώ τα συνδεδεμένα μέρη ψύχονται με ομοιόμορφο τρόπο καθώς η θερμοκρασιακή τους διαφορά με το υλικό της συγκόλλησης είναι μικρή με αποτέλεσμα μια ηπιότερη κατανομή των τάσεων στη συγκόλληση και στο σώμα του υλικού. Η προθέρμανση των επιφανειών μειώνει σημαντικά το ρυθμό ψύξης της συγκόλλησης με αποτέλεσμα τη μείωση της πιθανότητας εμφάνισης ρωγμών εξαιτίας της απότομης ψύξης του μετάλλου.

Οι παραμένουσες τάσεις συμβάλουν στην ανάπτυξη ρηγματώσεων στο χάλυβα, είτε κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης είτε αμέσως μετά το πέρας αυτής. Στην περίπτωση των εν θερμώ ρηγματώσεων οι οποίες πραγματοποιούνται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (άνω των 1200 °C) υπεύθυνη είναι η παρουσία υγρού ανάμεσα στους στερεοποιημένους κόκκους του υλικού της συγκόλλησης. Οι εν ψυχρώ ρηγματώσεις πραγματοποιούνται είτε κατά την εκτέλεση της συγκόλλησης και σε θερμοκρασίες κάτω των 200 °C όπου ο ωστενίτης μετατρέπεται σε μαρτενσίτη, είτε αμέσως μετά το τέλος αυτής και οφείλονται στην παρουσία υδρογόνου κατά την εκτέλεση της συγκόλλησης ή λόγω των αναπτυσσόμενων τάσεων και παραμορφώσεων.

Οι ρηγματώσεις επηρεάζονται από τη χημική σύσταση των συγκολλούμενων χαλύβων καθώς η παρουσία ακαθαρσιών στο υλικό δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες για το σχηματισμό ρωγμών. Ιδιαίτερα ευαίσθητη για το σχηματισμό εν θερμώ ρηγματώσεων θεωρούνται οι χάλυβες των οποίων η περιεκτικότητα σε θείο είναι μεγαλύτερη από 0,03%. Στους χάλυβες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία η παρουσία θείου είναι κατά πολύ μικρότερη από την τιμή αυτή όπως θα φανεί κατά την ανάλυση της σύστασης του υλικού που θα ακολουθήσει στο Κεφάλαιο 3.

Οι παραμένουσες τάσεις στη συγκόλληση επηρεάζουν τη δημιουργία ρηγματώσεων καθώς σχηματίζονται είτε λόγω της ανομοιόμορφης ψύξης των συγκολλούμενων μελών μετά το πέρας αυτής, είτε λόγω της δυσκαμψίας της σύνδεσης. Η δυσκαμψία της σύνδεσης επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την ολκιμότητα του συγκολλησίμου υλικού, καθώς κατά τη ψύξη του δημιουργούνται εφελκυστικές τάσεις οι οποίες εφόσον η σύνδεση είναι δύσκαμπτη, θα έχουν υψηλή τιμή. Η αδυναμία δηλαδή διαφορικής κίνησης των συνδεόμενων μελών σε συνεργασία με τη χρησιμοποίηση υλικού συγκόλλησης το οποίο δεν χαρακτηρίζεται από όλκιμη συμπεριφορά μπορεί να οδηγήσει σε ρηγματώση στη ρίζα της συγκόλλησης.

Ο τύπος των ρηγματώσεων που παρατηρείται ως επί το πλείστον στο υλικό της συγκόλλησης και στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη είναι ανάμεσα στους κόκκους του υλικού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που αναπτύσσεται, το υλικό που αρχικά τήκεται είναι αυτό ανάμεσα στους συμπαγείς κόκκους με αποτέλεσμα κατά τη στερεοποίησή του οι ρωγμές να εμφανίζονται στη διεπιφάνεια των κόκκων. Αντίθετα, οι ρωγμές που εμφανίζονται λόγω όλκιμης θραύσης από μονοτονικές ή ανακυκλιζόμενες φορτίσεις τέμνουν και τους κόκκους του υλικού.

Όπως γίνεται αντιληπτό από τις παραπάνω διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά τη συγκόλληση, η παρουσία ρωγμών είναι αναπόφευκτο φαινόμενο. Η επίδραση τους στη διάρκεια ζωής μιας κατασκευής διαφέρει ανάλογα με τη χρήση και το ιστορικό φόρτισης στο οποίο υποβάλλεται η συγκόλληση. Οι ρηγματώσεις που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια των συγκολλήσεων έχουν ιδιαίτερα σημαντικό αντίκτυπο στη διάρκεια ζωής κατασκευών οι οποίες υπόκειται σε φαινόμενα κόπωσης [67]. Επιπλέον, η χημική σύσταση του χάλυβα της κατασκευής επηρεάζει το ρυθμό αύξησης των ρωγμών. Η επιρροή των ρηγματώσεων λόγω της συγκόλλησης στη διάρκεια ζωής κατασκευών οι οποίες δεν υπόκεινται σε φαινόμενα κόπωσης έχει μικρότερο αντίκτυπο. Κατά τη διάρκεια μελετών σε μια πληθώρα χαλύβων [68]-[69] διαπιστώθηκε ότι οι ατέλειες εξαιτίας των συγκολλήσεων συνήθως έχουν μέγεθος μικρότερο από 0,06mm και σε πολύ λίγες περιπτώσεις μπορούν να φτάσουν τα 0,10mm ενώ το μέσο μέγεθος των ρωγμών που παρατηρήθηκαν ήταν 0,045mm. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας οι μικρορωγμές που σχηματίζονται λόγω της διαδικασίας συγκόλλησης είναι μικρότερες από την κρίσιμη τιμή της μακρορωγμής που είναι 0,25mm και η οποία ορίστηκε με βάση το χαρακτηριστικό μήκος το οποίο θα αναλυθεί στο Κεφάλαιο 3. Στην τιμή αυτή θεωρείται ότι οι μικρορωγμές έχουν ήδη συνενωθεί [70] ώστε να σχηματίσουν μια ατέλεια η οποία είναι κρίσιμη για τη διάρκεια ζωής ενός μέλους το οποίο υπόκειται σε μονοτονική ή σε μικρού αριθμού αλλά μεγάλου εύρους κύκλους φόρτισης. Η επίδραση των ρωγμών της συγκόλλησης μπορεί να ληφθεί υπόψη μέσω της εξέτασης δοκιμίων υπό εφελκυστική φόρτιση είτε από το συγκολλησίμο υλικό είτε από την θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη, όπως θα περιγραφεί σε επόμενο κεφάλαιο.

3 Καθορισμός μικρομηχανικών χαρακτηριστικών και ιδιότητες υλικών

3.1 Καταγραφή υλικών

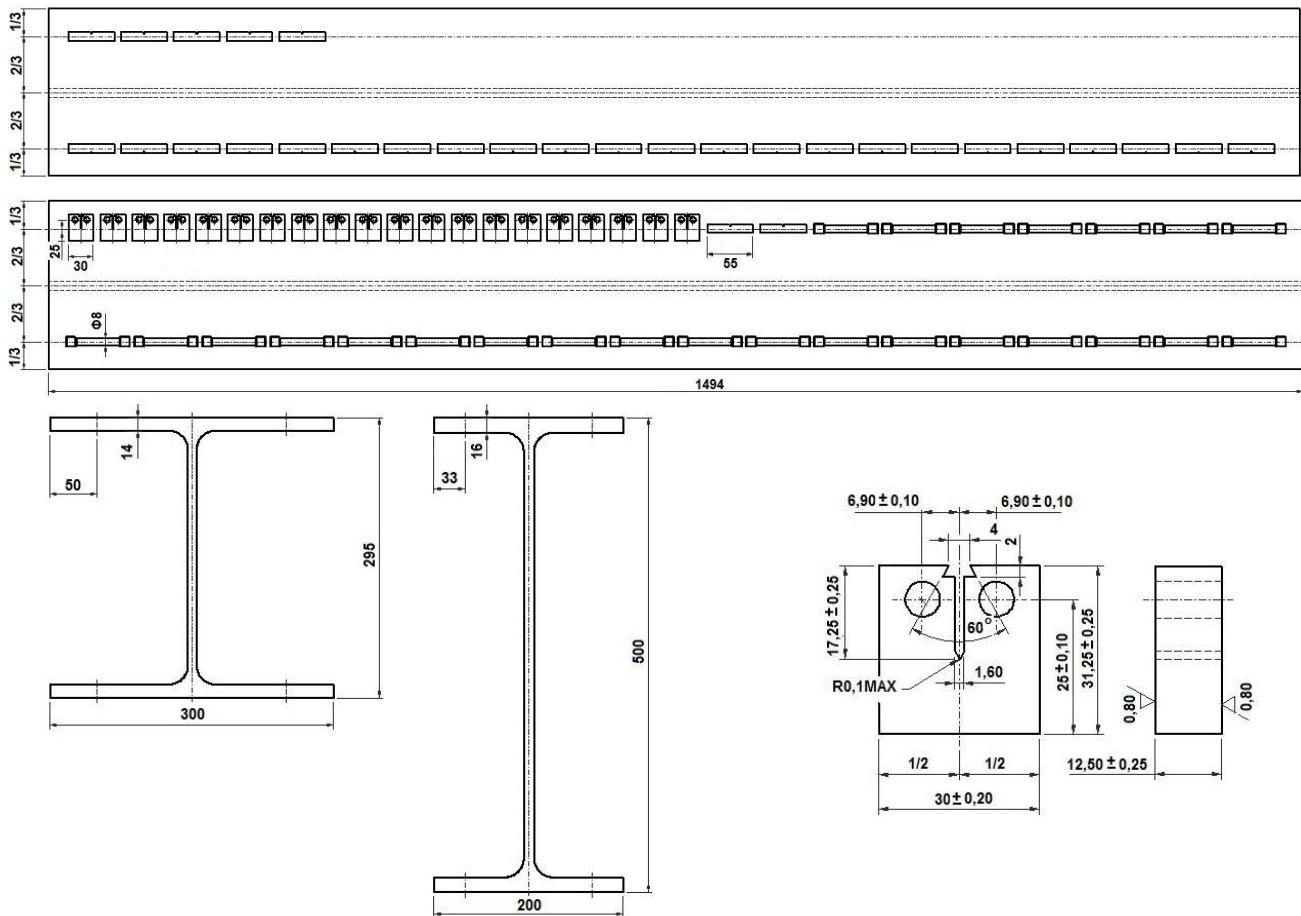
Στην παρούσα διατριβή ο χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε για τις πειραματικές μετρήσεις των συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος προήλθε από τα χαλβουργία του Peine στη Γερμανία. Ο χάλυβας με τη μεγαλύτερη συχνότητα χρησιμοποίησης στις σύγχρονες μεταλλικές κατασκευές στην Ευρώπη είναι ο S355J2 ενώ σε αρκετές ακόμα περιπτώσεις χρησιμοποιείται και ο S460M. Για το λόγο αυτό οι συγκεκριμένες ποιότητες χάλυβα χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, ενώ η ανάλυση των ιδιοτήτων του έγινε στο πολυτεχνείο του Aachen στη Γερμανία και στα χαλβουργία του Vitkovice στην Ostrava της Τσεχίας. Στα πλαίσια του προγράμματος PLASTOTOUGH [2] μελετήθηκε επίσης η ποιότητα S690QL καθώς ο συγκεκριμένος χάλυβας μπορεί να αποτελέσει στο μέλλον μια οικονομικά συμφέρουσα πρόταση λόγω της υψηλής του αντοχής. Ωστόσο, για την συγκεκριμένη ποιότητα χάλυβα μελετήθηκαν εξειδικευμένες κατασκευές οι οποίες δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας διατριβής και γι' αυτό δεν θα γίνει αναφορά στις ιδιότητές του.

Για τον καθορισμό των χαρακτηριστικών των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν, πραγματοποιήθηκε πληθώρα ελέγχων με σκοπό να συγκεντρωθούν οι απαραίτητες λεπτομέρειες σχετικά με τη μικροδομή και τις ιδιότητές τους, όπως η αντοχή τους σε κρούση και η ολκιμότητά τους. Οι έλεγχοι που πραγματοποιήθηκαν είναι:

- Μονοαξονικός εφελκυσμός: Αυτός ο έλεγχος μας παρέχει τη βασική καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί στις παραμετρικές αναλύσεις, καθώς και προκαταρκτικές πληροφορίες σχετικά με την ολκιμότητα και την αντοχή του χάλυβα. Εξήχθησαν οι καμπύλες πραγματικών τάσεων-πραγματικών παραμορφώσεων λαμβάνοντας υπόψη τη μείωση της διατομής του δοκιμίου λόγω δημιουργίας λαιμού. Τα πειράματα διεξήχθησαν σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες (-20,0,+20 °C).
- Δοκιμή Charpy: Η δοκιμή αυτή καθορίζει την ενέργεια που απορροφάται από ένα υλικό κατά τη θραύση του. Η τιμή που λαμβάνεται από την δοκιμή Charpy αποτελεί έναν ευρέως χρησιμοποιούμενο δείκτη της δυσθραυστότητας του υλικού. Επιπλέον, παρέχει πληροφορίες σχετικά με την αλλαγή του μηχανισμού θραύσης από όλκιμο σε ψαθυρό, καθορίζοντας τη μεταβατική περιοχή θερμοκρασιών της αντοχής έναντι κρούσης.
- Έλεγχοι μεγέθους των κόκκων του υλικού: Οι έλεγχοι αυτοί είναι σημαντικοί καθώς μέσω του μεγέθους των κόκκων του υλικού καθορίζεται ο κρίσιμος αριθμός συνένωσης των κενών για τη θεώρηση δημιουργίας μιας ρωγμής. Με τον τρόπο αυτό καθορίζεται και η χαρακτηριστική κλίμακα μήκους, βάση της οποίας επιλέγεται το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων κατά τις αναλύσεις.
- Φασματοσκοπικοί έλεγχοι: Αυτοί οι έλεγχοι έχουν σαν σκοπό να καθορίσουν την κατά βάρος ποσότητα των κύριων χαρακτηριστικών του χάλυβα. Η ποσότητα των διαφόρων στοιχείων στη σύνθεση του υλικού καθορίζει σε μεγάλο βαθμό και τη συμπεριφορά του κατά τη χρονοϊστορία φόρτισης.

Για την πραγματοποίηση αυτών των ελέγχων τα δοκίμια εξήχθησαν απευθείας από τις δοκούς IPE500 ή HEA300 που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διερεύνηση των συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος. Το σχέδιο κοπής αυτών των δοκιμίων ακολούθησε τις επιταγές του προτύπου EN

10025+A1 [35]. Τα δοκίμια για τις εφελκυστικές και τις δοκιμές Charpy προέκυψαν από κατά μήκος κοπή των πελμάτων των δοκών όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1.

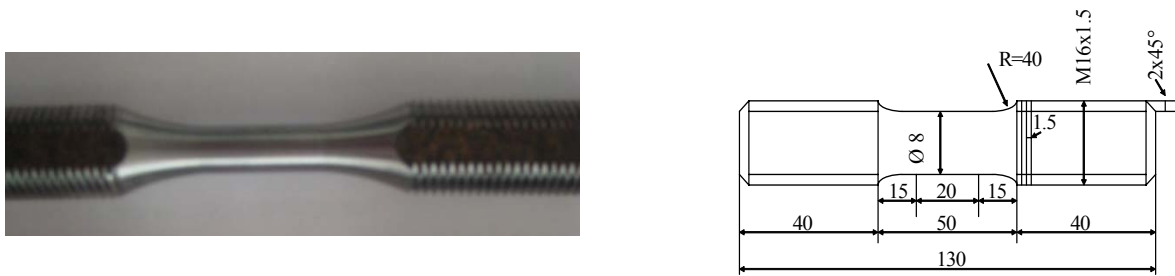


Σχήμα 3.1: Γεωμετρία κοπής δοκιμίων εργασίας

Συνολικά κατασκευάστηκαν 30 δοκίμια Charpy, 20 δοκίμια $\frac{1}{2}$ CT και 20 λεία εφελκυστικά δοκίμια από κάθε διατομή. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα δοκίμια $\frac{1}{2}$ CT είχαν πάχος 12,5mm και όχι 25mm όπως συνηθίζεται. Μετά την κατασκευή τους, στα δοκίμια $\frac{1}{2}$ CT κατασκευάστηκε ρωγμή σύμφωνα με τους κανονισμούς ASTM E 1820 [71] και ASTM E 1921 [45]. Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 3.1 όλα τα δοκίμια προέκυψαν από τα πέλατα των δοκών καθώς κρίθηκε ότι αυτά παρουσιάζουν μεγαλύτερη πιθανότητα ρηγμάτωσης υπό ανακυκλιζόμενες συνθήκες φόρτισης.

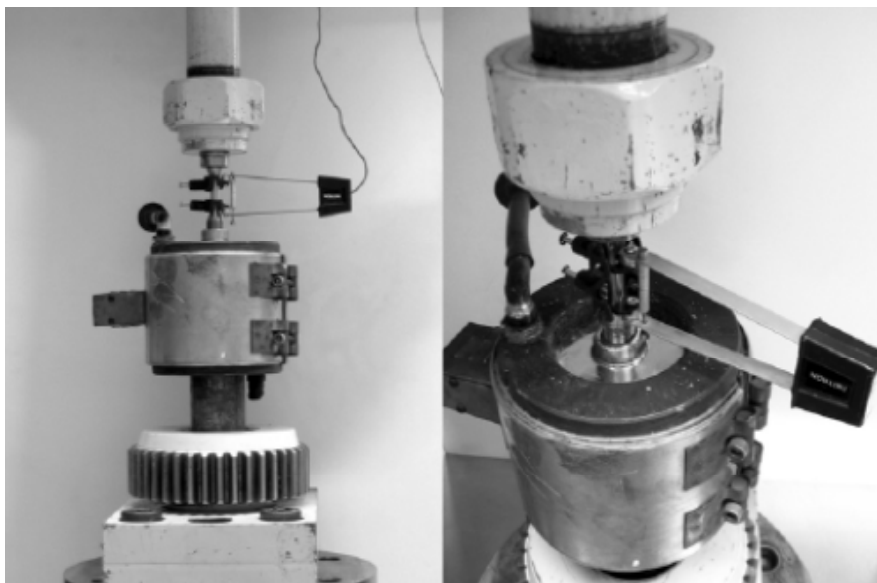
3.2 Μονοαξονικές εφελκυστικές δοκιμές

Αυτές οι δοκιμές παρέχουν τις βασικές μηχανικές ιδιότητες του υλικού, όπως το μέτρο ελαστικότητας E , την τάση διαρροής σ_y , την τάση θραύσης σ_u καθώς και την παραμόρφωση στο σημείο αστοχίας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν λεία δοκίμια με τα γεωμετρικά στοιχεία που φαίνονται στο Σχήμα 3.2.



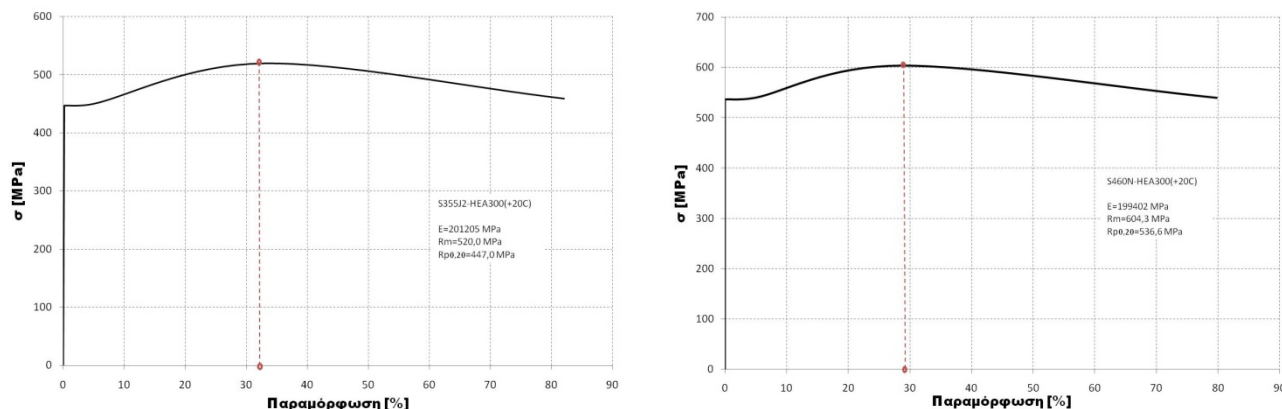
Σχήμα 3.2: Γεωμετρία δοκιμών μονοαξονικών εφελκυστικών δοκιμών [mm]

Όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε μια υδραυλική μηχανή εφελκυστικής ικανότητας 100kN με έλεγχο μετατόπισης. Κατά τη διάρκεια του ελέγχου καταγράφονταν η εκάστοτε χρονική στιγμή, η δρώσα δύναμη, η παραμόρφωση και η επιμήκυνση. Στο Σχήμα 3.3 φαίνεται η υδραυλική μηχανή που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο των δοκιμών υπό εφελκυσμό.



Σχήμα 3.3: Πειραματική διάταξη εφελκυστικών δοκιμών

Από τη στατική φόρτιση αυτών των δοκιμών προέκυψαν καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων όπως αυτές που φαίνονται στο Σχήμα 3.4. Στο Σχήμα αυτό φαίνονται δύο παραδείγματα καμπυλών τάσεων-παραμορφώσεων σε θερμοκρασία +20 °C για ποιότητες χάλυβα S355J2 και S460N αντίστοιχα που έχουν εξαχθεί από δοκίμια δοκών διατομής HEA300. Τα αποτελέσματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό των αρχικών σημείων στις καμπύλες πραγματικών τάσεων-πραγματικών παραμορφώσεων όπως θα περιγραφεί στη συνέχεια, ενώ παρέχουν και τις πρώτες ενδείξεις της κρίσιμης τιμής της φόρτισης στην οποία θα έχουμε απαρχή ρηγμάτωσης καθώς αυτή βρίσκεται πλησίον του φορτίου αστοχίας. Τέτοιες καμπύλες εξήχθησαν για θερμοκρασίες -20, 0, +20 °C μέχρι το σημείο θραύσης του δοκιμίου, ενώ μεταλλογραφικές αναλύσεις έγιναν μόνο στα δοκίμια των οποίων η φόρτιση ήταν σε θερμοκρασία δωματίου(+20 °C).



Σχήμα 3.4: Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων στους +20°C για εφελκυστικά δοκίμια δοκών διατομής HEA300 για ποιότητα χάλυβα S355J2 (αριστερά) και S460M (δεξιά)

Στον Πίνακα 3.1 φαίνονται τα αποτελέσματα των μονοτονικών εφελκυστικών πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν για τις ποιότητες υλικού των δοκών που μελετήθηκαν.

Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα εφελκυστικών δοκιμών

Δοκίμιο	Ποιότητα χάλυβα	Διατομή	Θερμοκρ. [°C]	E [MPa]	Τάση Αστοχίας R_m [MPa]	Τάση Διαρροής $R_{p0.2}$ [MPa]	R_{eH} [MPa]	A [%]	Z [%]
S-1	S355J2	HEA300	+20	201205	520,0	447,0	458,8	33,0	82,0
H-1	S460M	HEA300	+20	199402	604,3	536,6	539,7	28,8	79,8
I-1	S355J2	IPE500	+20	203471	513,8	410,0	432,8	35,3	80,0
V-1	S460M	IPE500	+20	204653	533,8	441,3	445,9	35,3	82,0
S-2	S355J2	HEA300	0	192474	548,7	433,7	460,7	31,3	81,9
H-2	S460M	HEA300	0	223783	599,3	526,3	535,6	31,0	82,0
I-2	S355J2	IPE500	0	205972	532,9	421,1	440,8	37,3	80,9
V-2	S460M	IPE500	0	197954	577,6	486,0	497,7	34,0	81,9
S-3	S355J2	HEA300	-20	194533	550,3	445,2	462,5	37,3	79,8
H-3	S460M	HEA300	-20	196854	613,1	531,9	543,8	31,3	79,8
I-3	S355J2	IPE500	-20	215763	546,0	432,9	456,7	36,0	79,8
V-3	S460M	IPE500	-20	198201	581,8	480,8	498,7	37,5	80,9

Όπως είναι εμφανές από τον παραπάνω πίνακα τα όρια διαρροής των χαλύβων που χρησιμοποιήθηκαν για τη συγκεκριμένη μελέτη είναι αρκετά μεγαλύτερα από τις τιμές που θέτουν ως ελάχιστο όριο οι κανονισμοί. Αυτό οφείλεται στην προσπάθεια των παραγωγών να ικανοποιούν μια πληθώρα κανονισμών ανά την υφήλιο ώστε να διευκολύνονται οι διεθνείς εξαγωγές.

Η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων δεν αναπαριστά τις πραγματικές τιμές παραμόρφωσης ενός μεταλλικού υλικού καθώς βασίζεται εξολοκλήρου στις αρχικές διαστάσεις του προς εξέταση δοκιμίου, παρόλο που αυτές μεταβάλλονται διαρκώς κατά τη διάρκεια μιας εφελκυστικής πειραματικής φόρτισης. Η δημιουργία λαιμού σε δοκίμια χαλύβων υπό εφελκυσμό έχει ως αποτέλεσμα τη δραστική μείωση της διατομής του δοκιμίου στον άξονα συμμετρίας του και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το φορτίο που απαιτείται για την περαιτέρω επιμήκυνση του δοκιμίου να μειώνεται. Η μέση τάση που αντιστοιχεί στην αρχική διατομή μειώνεται εξίσου και για το λόγο αυτό η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων εμφανίζεται να έχει αρνητική κλίση μετά το σημείο του μέγιστου φορτίου. Στην πραγματικότητα όμως ο χάλυβας εξακολουθεί να υπόκειται σε κράτνση

μέχρι το σημείο θραύσης του. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος οι τάσεις αυξάνονται όσο αυξάνεται και η παραμόρφωση. Για το σκοπό αυτό εξήχθησαν οι πραγματικές καμπύλες τάσεων- παραμορφώσεων οι οποίες βασίζονται σε επακριβείς μετρήσεις της μεταβολής του μεγέθους της διατομής του δοκιμίου οι οποίες πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια της εφελκυστικής δοκιμής. Κατά τον προσδιορισμό των καμπυλών πραγματικών τάσεων- πραγματικών παραμορφώσεων διακρίνονται οι παρακάτω περιπτώσεις:

- Μέχρι τη μέγιστη τιμή του φορτίου κατά τον εφελκυσμό του δοκιμίου χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες εξισώσεις που δίνουν τις πραγματικές τάσεις του υλικού:

$$\sigma = \frac{P}{S} \quad (3.1)$$

όπου P και S είναι το εκάστοτε φορτίο και η εκάστοτε επιφάνεια διατομής αντίστοιχα.

Αν υποθέσουμε ότι δεν υπάρχει αλλαγή του όγκου του δοκιμίου στην πλαστική περιοχή είναι δυνατόν να εξαχθούν τα ακόλουθα:

$$S_o L_o = SL \text{ και επομένως } S = \frac{S_o L_o}{L} \quad (3.2)$$

όπου S_o είναι η αρχική επιφάνεια διατομής του δοκιμίου,

L και L_o είναι το εκάστοτε και το αρχικό μήκος του μηκυσιόμετρου αντίστοιχα.

Εξαιτίας των εξισώσεων (3.1) και (3.2) προκύπτει:

$$\sigma_\pi = \frac{P}{S_o} \frac{L}{L_o} = \sigma \frac{\Delta L + L_o}{L_o} = \sigma \left(1 + \frac{\Delta L}{L_o} \right) = \sigma(1 + e) \quad (3.3)$$

όπου ΔL είναι η αύξηση του μήκους του δοκιμίου και e είναι η συμβατική παραμόρφωση.

Για να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση (3.3) απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ομοιόμορφη κατανομή της παραμόρφωσης κατά μήκος του μηκυσιόμετρου του δοκιμίου που υπόκειται σε εφελκυσμό. Πρέπει δηλαδή η παραμόρφωση να κατανέμεται σε όλο το μήκος του μηκυσιομέτρου και όχι να περιορίζεται σε ένα τμήμα αυτού.

Η πραγματική παραμόρφωση, η οποία συχνά αναφέρεται και ως λογαριθμική παραμόρφωση, ορίζεται ως το άθροισμα των στιγμιαίων συμβατικών παραμορφώσεων. Για τη στιγμιαία παραμόρφωση ισχύει η εξίσωση (3.4).

$$d\varepsilon = \frac{dL}{L} \quad (3.4)$$

Επομένως η πραγματική παραμόρφωση που συνδέεται με το άθροισμα των στιγμιαίων παραμορφώσεων προκύπτει από την εξίσωση.

$$\varepsilon_\pi = \int d\varepsilon = \int_{L_o}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_o} \quad (3.5)$$

Η πραγματική παραμόρφωση συνδέεται με τη συμβατική παραμόρφωση μέσω της εξίσωσης.

$$\varepsilon_{\pi} = \ln \frac{L}{L_0} = \ln \frac{\Delta L + L_o}{L_o} = \ln(e + 1) \quad (3.6)$$

όπου ε_{π} είναι η πραγματική παραμόρφωση.

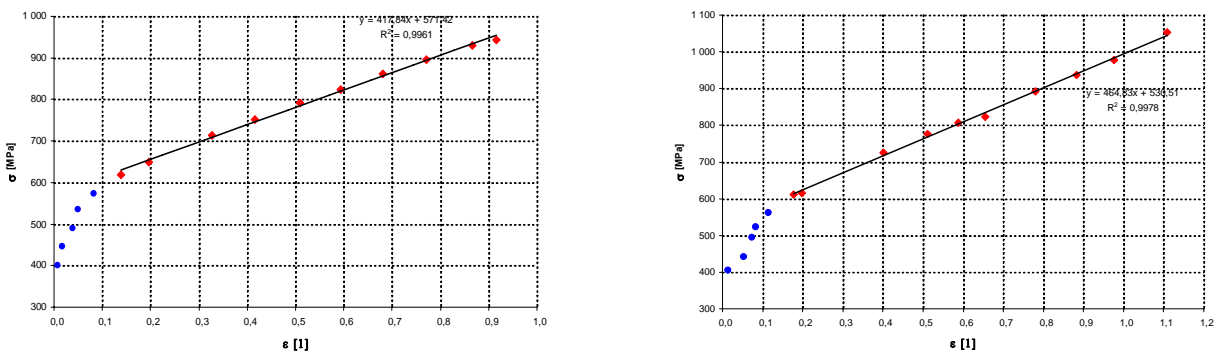
■ Σε κάποιο σημείο της χρονοϊστορίας φόρτισης (περίπου στο 10-15% της παραμόρφωσης), τα δοκίμια εμφανίζουν λαιμό στο μέσο τους. Η μέτρηση του μηκυνσιόμετρου μετά από αυτό το σημείο δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα καθώς η παραμόρφωση δεν είναι καθολική αλλά εντοπίζεται τοπικά στην περιοχή που έχει δημιουργηθεί ο λαιμός. Στη συνέχεια για τον υπολογισμό των πραγματικών παραμορφώσεων μεταξύ της εφελκυστικής αντοχής και της θραύσης χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση (3.6) αλλά με τη διαφορά ότι πραγματοποιούνται επιτόπου μετρήσεις της επιφάνειας διατομής του δοκιμίου σε κάθε στάδιο φόρτισης. Για το λόγο αυτό η πραγματική παραμόρφωση προκύπτει από την ακόλουθη εξίσωση (3.7) που λαμβάνει υπόψη την διαφοροποίηση της επιφάνειας διατομής του δοκιμίου:

$$\varepsilon_{\pi} = \ln \frac{S_0}{S} = \ln \frac{(\pi/4)D_o^2}{(\pi/4)D^2} = 2 \cdot \ln \frac{D_o}{D} \quad (3.7)$$

όπου S_0 και S είναι το αρχικό και το εκάστοτε εμβαδόν της επιφάνειας του δοκιμίου στον άξονα συμμετρίας αντίστοιχα, ενώ D_0 και D είναι η αρχική και η εκάστοτε διάμετρος αντίστοιχα.

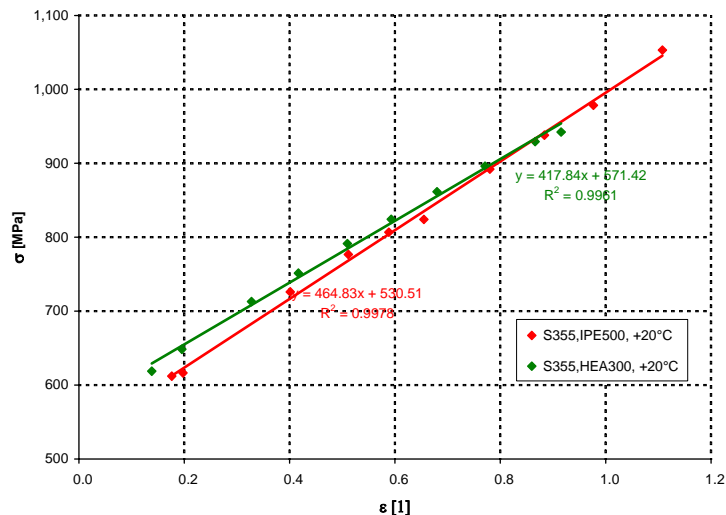
Η αλλαγή της διαμέτρου του δοκιμίου μετρήταν με τη βοήθεια οπτικών μέσων κατά τη διάρκεια των εφελκυστικών δοκιμών. Επιπλέον, η κάθε δοκιμή καταγραφόταν από κάμερα υψηλής ανάλυσης ώστε να είναι εφικτός ο υπολογισμός της αλλαγής της διαμέτρου του δοκιμίου ηλεκτρονικά μέσω κατάλληλου προγράμματος.

Με βάση τα συγκεντρωθέντα στοιχεία σχεδιάζονται οι καμπύλες πραγματικών τάσεων-πραγματικών παραμορφώσεων. Στο Σχήμα 3.5 φαίνονται οι καμπύλες πραγματικών τάσεων-πραγματικών παραμορφώσεων για εφελκυστικά δοκίμια ποιότητας χάλυβα S355J2 σε θερμοκρασία +20°C που εξήχθησαν από διατομές δοκών HEA300 και IPE500 αντίστοιχα. Σε αυτά τα σχήματα οι κόκκινες κουκίδες αντιπροσωπεύουν μετρήσεις οι οποίες πραγματοποιούνται μετά τη διαρροή του δοκιμίου ενώ έχει προηγηθεί δημιουργία λαιμού στο δοκίμιο οπότε οι πραγματικές παραμορφώσεις υπολογίζονται με βάση την εξίσωση (3.7), ενώ τα μπλε σημεία αποτυπώνουν μετρήσεις κατά τις οποίες η παραμόρφωση στο δοκίμιο είναι καθολική και στις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση (3.6). Τα υπόλοιπα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων των υλικών της μελέτης περιέχονται στο Παράρτημα Α.



Σχήμα 3.5: Διάγραμμα πραγματικών τάσεων-πραγματικών παραμορφώσεων στους +20°C για ποιότητα χάλυβα S355J2 για διατομή δοκού HEA300 (αριστερά) και IPE500 (δεξιά)

Στο Σχήμα 3.6 φαίνεται η σύγκριση των διαγραμμάτων πραγματικών τάσεων-πραγματικών παραμορφώσεων για την ποιότητα χάλυβα του Σχήματος 3.5 (S355J2). Η σύγκριση γίνεται στο τμήμα των διαγραμμάτων μετά τη δημιουργία του λαιμού και δείχνει τη διαφορά των τιμών μεταξύ των δύο δοκιμίων, καθότι πρόκειται για την ίδια ποιότητα χάλυβα η οποία έχει προέλθει από το ίδιο χαλυουργείο. Οι δύο αυτές ποιότητες χάλυβα είναι οι βασικές που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για τη διενέργεια ανακυκλιζόμενων φορτίσεων σε συγκολλητές συνδέσεις δοκών-υποστυλωμάτων σε θερμοκρασία δωματίου. Η ποιότητα S460M χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά για τη διενέργεια μονοτονικών φορτίσεων.



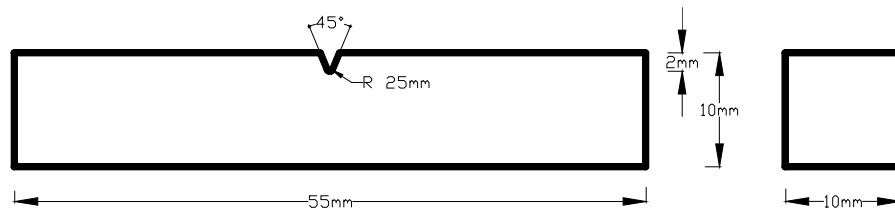
Σχήμα 3.6: Σύγκριση διαγραμμάτων πραγματικών τάσεων-πραγματικών παραμορφώσεων στους +20°C των ποιοτήτων χαλύβα που χρησιμοποιήθηκαν στις συνδέσεις δοκού-υποστυλώματος

3.3 Δοκιμές Charpy

Η δοκιμή Charpy εγκαινιάστηκε στις αρχές του 20^{ου} αιώνα από τον ομώνυμο ερευνητή και αποτελεί τον πιο συνήθη τρόπο υπολογισμού των χαρακτηριστικών θραύσης του υλικού καθώς είναι απλούστερη και οικονομικότερη από την πραγματοποίηση των δοκιμών θραυστομηχανικής που θα περιγραφούν στην §3.4. Η συνήθης γεωμετρία των δοκιμίων που χρησιμοποιούνται στη σημερινή πρακτική είναι αυτή του Σχήματος 3.7 και αποτελείται από εγκοπή σχήματος V η οποία έχει βάθος 2mm και ακτίνα στην ακμή της ίση προς 0,25mm. Η δοκιμή Charpy χρησιμοποιείται προκειμένου να υπολογιστεί η ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη θραύση του δοκιμίου. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιείται ένα εκκρεμές η σφύρα του οποίου χτυπά με ταχύτητα περίπου 5-6m/sec το δοκίμιο το οποίο και υπόκειται σε θραύση. Η απορροφούμενη ενέργεια κρούσης προκύπτει από τη διαφορά των δυναμικών ενεργειών της σφύρας μεταξύ αρχικής και τελικής της θέσης. Για τους συνήθεις δομικούς φερίτικούς χάλυβες, όπως αυτοί της παρούσας εργασίας, κατά τον υπολογισμό της απορροφούμενης ενέργειας σε σχέση με τη θερμοκρασία εμφανίζονται τρεις περιοχές, όπως στο Σχήμα 3.8, με τη μεσαία να αποτελεί τη μεταβατική περιοχή από τον ψαθυρό στον όλκιμο τρόπο θραύσης.

Τα δοκίμια με εγκοπή σχήματος V χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της επίδρασης της θερμοκρασίας στην ποσότητα της απορροφούμενης ενέργειας, στην πλευρική διαστολή και το ποσοστό του διατμητικού (όλκιμο) τύπου αστοχίας του δοκιμίου. Όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε εκκρεμές Charpy με ικανότητα μέγιστης μετρούμενης ενέργειας ίση προς 300J. Τρία δοκίμια υπεβλήθησαν σε δοκιμή Charpy σε κάθε θερμοκρασία, ώστε να εξεταστούν

όλες οι περιοχές του διαγράμματος απορροφούμενης ενέργειας (κατώτερη περιοχή, περιοχή μετάβασης και ανώτερη περιοχή θερμοκρασιών της απορροφούμενης ενέργειας). Το γεγονός ότι η δοκιμή Charpy περιλαμβάνει υψηλό ρυθμό επιβολής του φορτίου, είναι αντιπροσωπευτικό των σεισμικών φορτίσεων οι οποίες χαρακτηρίζονται από απότομη επιβολή της φόρτισης. Η γεωμετρία των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές φαίνεται στο Σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7: Γεωμετρία δοκιμίων Charpy

Η εξάρτηση της απορροφούμενης ενέργειας, του ποσοστού (%) της όλκιμης περιοχής θραύσης και της πλευρικής διαστολής από την θερμοκρασία, μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση (3.8). Η εξίσωση (3.8) που διέπει κάθε διάγραμμα υπολογίζεται με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα και είναι ενσωματωμένη στα σχήματα των μετρήσεων που ακολουθούν. Οι μετρήσεις γίνονται για μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, ενώ απεικονίζονται με μαύρα σημεία στα διαγράμματα των Σχημάτων 3.8, 3.9 και 3.10. Όλα τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο χαλυβουργία του Vitkovice (EVRAZ Vitkovice Steel) στην Οστράβα της Τσεχίας.

$$KV, P_L, \Delta b = A \left(1 + \tanh \frac{T - B}{C} \right) \quad (3.8)$$

όπου KV είναι η απορροφούμενη ενέργεια,

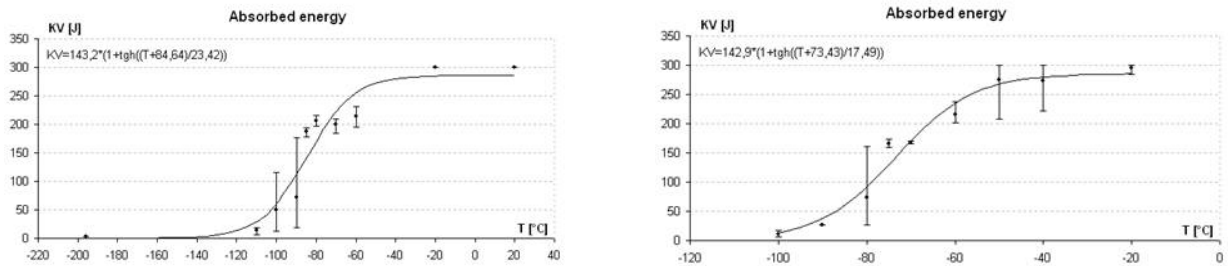
P_L είναι το ποσοστό της όλκιμης περιοχής,

Δb είναι η πλευρική διαστολή,

T είναι η θερμοκρασία σε $^{\circ}C$,

A , B και C είναι σταθερές του υλικού που προκύπτουν από την προσαρμογή της εξίσωσης (3.8) στα πειραματικά αποτελέσματα του κάθε διαγράμματος.

Η μέτρηση της απορροφούμενης ενέργειας περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2 και υπολογίζεται από τη διαφορά του ύψους από το οποίο εκκίνησε και κατέληξε η σφύρα του εκκρεμούς Charpy και ενώ κατά την κίνησή της έχει έρθει σε επαφή με δοκίμια όμοιας γεωμετρίας με αυτό του Σχήματος 3.7. Η διαφορά αυτή του ύψους επί του βάρους της σφύρας δίνει την ενέργεια που κατανάλωσε το δοκίμιο προκειμένου να υποστεί θραύση. Στο Σχήμα 3.8 φαίνεται το διάγραμμα απορροφούμενης ενέργειας-θερμοκρασίας για ποιότητα χάλυβα S355J2 για δοκίμια που έχουν εξαχθεί από δοκούς διατομής HEA300 και IPE500. Το διάγραμμα αυτό χωρίζεται σε τρεις διακριτές περιοχές οι οποίες και καθορίζουν το είδος της αστοχίας που χαρακτηρίζει το δοκίμιο. Η κατώτερη περιοχή θερμοκρασιών του διαγράμματος χαρακτηρίζεται από ψαθυρούς μηχανισμούς αστοχίας ενώ με την άνοδο της θερμοκρασίας αυτοί αντικαθίστανται από όλκιμους τρόπους θραύσης μέσω της δημιουργίας και συνένωσης μικροκενών στο σώμα του υλικού, ενώ η απορροφούμενη ενέργεια αυξάνεται. Ανάμεσα στην κατώτερη και την ανώτερη περιοχή θερμοκρασιών του διαγράμματος υπάρχει μια μεταβατική περιοχή η οποία χαρακτηρίζεται από μικτές συνθήκες αστοχίας. Τα διαγράμματα Charpy όλων των δοκιμίων που ελέγχθησαν πραγματοποιήθηκαν στη χαλυβουργία του Vitkovice στην Ostrava της Τσεχίας και περιλαμβάνονται στο Παράρτημα Α.

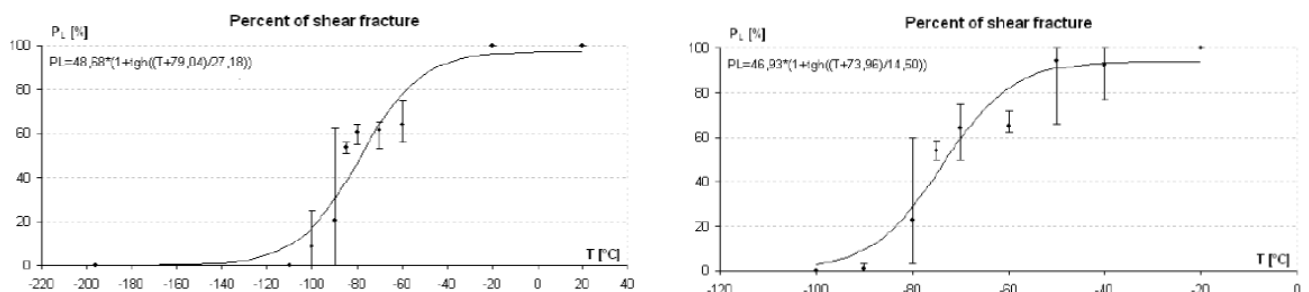


Σχήμα 3.8: Διάγραμμα απορροφούμενης ενέργειας-θερμοκρασίας για ποιότητα χάλυβα S355J2 για δοκίμια που εξήχθησαν από τις δοκούς HEA300 (αριστερά) και IPE500 (δεξιά)

Στο Σχήμα 3.9 φαίνεται το ποσοστό της όλκιμης περιοχής θραύσης του δοκιμίου. Ο υπολογισμός του ποσοστού αυτού βασίζεται στις προτάσεις που περιλαμβάνει ο ASTM E23 [72]. Συγκεκριμένα, ο ASTM E23 [72] προτείνει συνολικά τέσσερις διαφορετικές μεθόδους μέτρησης του ποσοστού αυτού, όπως φαίνεται στη συνέχεια.

- i. Σύγκριση της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου του Σχήματος 3.7 με σειρά φωτογραφιών θραύσης και ανάλογων ποσοστών όλκιμης θραύσης που προτείνει ο κανονισμός [72].
- ii. Μέτρηση του μήκους και του ύψους της επίπεδης επιφάνειας θραύσης που συμβολίζει τη διάτμηση και σύγκριση αυτού με ανάλογο διάγραμμα του κανονισμού.
- iii. Φωτογράφιση της επιφάνειας θραύσης και μέτρηση του ποσοστού ψαθυρής αστοχίας με τη βοήθεια επιπεδόμετρου (όργανο μέτρησης το οποίο μετρά το εμβαδό μιας επιφάνειας).
- iv. Φωτογράφιση της επιφάνειας θραύσης και επεξεργασία της με τη βοήθεια ψηφιακών μέσων και προγραμμάτων Η/Υ προκειμένου να καθοριστεί το ποσοστό ψαθυρής αστοχίας με απευθείας μέτρηση της επιφάνειας θραύσης.

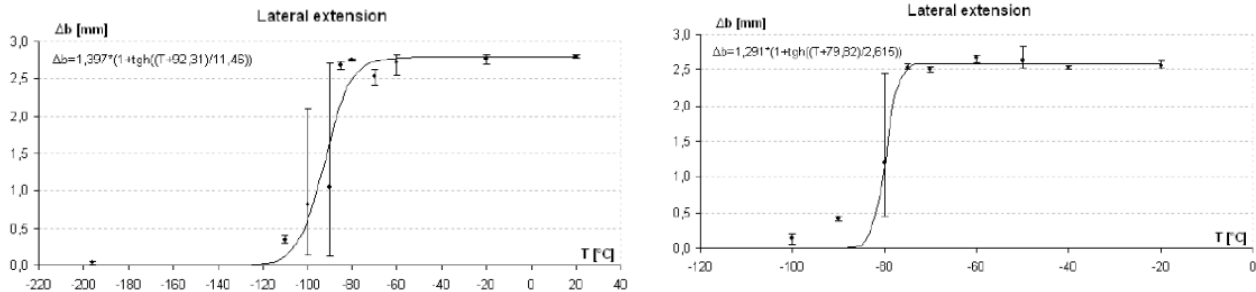
Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας η μέτρηση του ποσοστού όλκιμης αστοχίας έγινε με βάση την πρώτη μέθοδο που προτείνει ο παραπάνω κανονισμός. Το ποσοστό της όλκιμης περιοχής θραύσης ενός δοκιμίου αποτελεί πιο ουσιώδη παράμετρο από την απορροφούμενη ενέργεια σε ότι αφορά την προστασία έναντι ψαθυρής θραύσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός της δυνατότητας άμεσου προσδιορισμού του θερμοκρασιακού ορίου κάτω από το οποίο η αστοχία χαρακτηρίζεται ως ψαθυρή μέσω επεξεργασίας των επιφανειών θραύσης και όχι εμμέσως μέσω χρήσης της απορροφούμενης ενέργειας. Το αποτέλεσμα είναι το ίδιο εφόσον η καμπύλη του ποσοστού όλκιμης αστοχίας και απορροφούμενης ενέργειας του δοκιμίου Charpy συμπίπτουν, γεγονός που στην πράξη δεν αποτελεί κανόνα.



Σχήμα 3.9: Διάγραμμα ποσοστού όλκιμης αστοχίας-θερμοκρασίας για ποιότητα χάλυβα S355J2 για δοκίμια που εξήχθησαν από τις δοκούς HEA300 (αριστερά) και IPE500 (δεξιά)

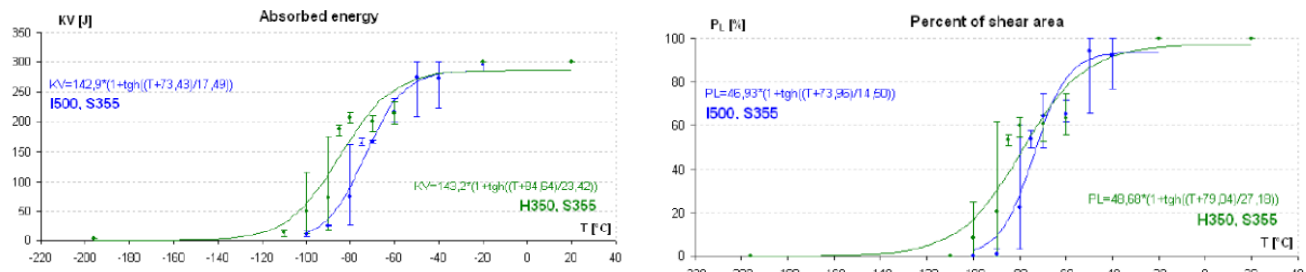
Στο Σχήμα 3.10 φαίνεται η πλευρική διαστολή δοκιμίων Charpy για ποιότητα χάλυβα S355J2 των δοκών HEA300 και IPE500. Η πλευρική διαστολή καταγράφει την αύξηση του πλάτους του πειραματικού δοκιμίου μετά τη θραύση του. Είναι χαρακτηριστικό ότι όσο πιο όλκιμος είναι ο

μηχανισμός αστοχίας τόσο μεγαλύτερη είναι και η αύξηση του πλάτους του δοκιμίου, ενώ οι ψαθυρές μορφές αστοχίες χαρακτηρίζονται από μικρές τιμές διαπλάτυνσης στην περιοχή της θραύσης. Πλέον για τη μέτρηση της πλευρικής διαστολής μπορούν να χρησιμοποιηθούν προγράμματα H/Y στα οποία εισάγεται φωτογραφία της επιφάνειας θραύσης και υπολογίζεται αυτόματα το ποσοστό όλκιμης αστοχίας.



Σχήμα 3.10: Διάγραμμα πλευρικής διαστολής δοκιμίου-θερμοκρασίας για ποιότητα χάλυβα S355J2 για δοκίμια που εξήχθησαν από τις δοκούς HEA300 (αριστερά) και IPE500 (δεξιά)

Στο παράρτημα Α εκτός από τα διαγράμματα όλων των δοκιμών που περιγράφηκαν παραπάνω, περιέχονται συγκρίσεις μεταξύ των δοκιμών της ίδιας ποιότητας χάλυβα, αλλά που εξήχθησαν από διαφορετικές διατομές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.11. Στο σχήμα αυτό φαίνεται η σύγκριση της τιμής της απορροφούμενης ενέργειας και του ποσοστού όλκιμης αστοχίας δοκιμών που προέρχονται από την ίδια ποιότητα χάλυβα αλλά έχουν εξαχθεί από διαφορετικές διατομές δοκών. Η σύγκριση αυτή μας προσφέρει γραφικά τη διαφορετική συμπεριφορά των δοκιμών στη μεταβατική περιοχή των διαγραμμάτων και με βάση τα αποτελέσματα αυτά μπορούμε να αναμένουμε μεγάλες ή μικρές διαφορές στην συμπεριφορά των δοκιμών δοκού-υποστυλώματος.



Σχήμα 3.11: Σύγκριση διαγραμμάτων απορροφούμενης ενέργειας (αριστερά) και ποσοστού όλκιμης αστοχίας (δεξιά) για ποιότητα χάλυβα S355J2 για δοκίμια που εξήχθησαν από τις δοκούς HEA300 και IPE500

Ο Πίνακας 3.2 συνοψίζει τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω, ενώ διακρίνεται επίσης η θερμοκρασία μετάβασης από ψαθυρή σε όλκιμη μορφή θραύσης σύμφωνα με το κριτήριο της ελάχιστης απορροφούμενης ενέργειας κρούσης των 27 J. Από τις τιμές του παρακάτω πίνακα γίνεται αντιληπτό ότι όλα τα δοκίμια περνούν επιτυχώς τα κριτήρια που θέτει ο EN 10025 [35].

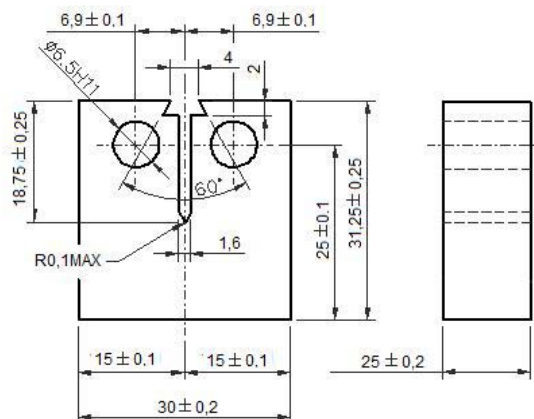
Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα δοκιμών κρούσης Charpy

Διατομή	Ποιότητα Χάλυβα	Όριο Διαρροής [MPa]	Όριο Θραύσης [MPa]	A ₅ [%]	KV _{max} [J]	T _{27J} [°C]
IPE 500	S355 J2	442	525	32,0	286	-110
HEA 300	S355 J2	447	520	32,0	285	-90
IPE 500	S460 M	503	548	32,5	291	-100
HEA 300	S460 M	483	557	30,5	295	-130

3.4 Μετρήσεις θραυστομηχανικής

Για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του υλικού σε όρους θραυστομηχανικής χρησιμοποιήθηκαν οι προδιαγραφές των ASTM E1820 [71], ASTM E23-07 [72] και ESIS P2-92 [73]. Στους κανονισμούς αυτούς περιλαμβάνεται μια ενοποιημένη διαδικασία η οποία καλύπτει όλο το εύρος συμπεριφοράς του υλικού και συγκεκριμένα από γραμμική ελαστική μέχρι πλήρως όλκιμη αστοχία η οποία χαρακτηρίζεται από σταθερό ρυθμό αύξησης της ρωγμής, καθώς και της μεταβατικής περιοχής από ψαθυρή σε όλκιμη αστοχία. Στους κανονισμούς αυτούς εμπεριέχονται κριτήρια μεγέθους ώστε να εξασφαλίζεται η ανεξαρτησία των ιδιοτήτων της θραυστομηχανικής από το μέγεθος του δοκιμίου. Ειδικά για τη μεταβατική περιοχή θερμοκρασιών συστήνεται να χρησιμοποιούνται δοκίμια με πάχος ίσο με το πάχος της υπό εξέτασης λεπτομέρειας.

Οι δοκιμές των ιδιοτήτων θραυστομηχανικής του υλικού πραγματοποιήθηκαν σε μια σερβοϋδραυλική μηχανή φέρουσας ικανότητας 500kN με έλεγχο μετατόπισης και με ρυθμό μετακίνησης 0,5mm/min. Για τις ανάγκες αυτές χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια 1CT όπως αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 3.12 με πάχος $B=25\text{mm}$, πλάτος $W=25\text{mm}$ και αρχικό λόγο $a_0/W = 0,5$, καθώς και δοκίμια 1 CT με μειωμένο πάχος $B=19\text{mm}$ προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση μελών με πάχος μικρότερο των 25mm στις ιδιότητες του υλικού.



Σχήμα 3.12: Γεωμετρία δοκιμίων CT

Για την περίπτωση της σταθερής αύξησης του μεγέθους μιας ρωγμής υπό θερμοκρασία δωματίου ελέγχθηκαν 5 δοκίμια προκειμένου να προσδιοριστούν οι καμπύλες $J-R$. Οι καμπύλες $J-R$ συσχετίζουν τις τιμές του ολοκληρώματος J με την επέκταση της ρωγμής ενός δοκιμίου CT. Στην περίπτωση που έχουμε μικρής έκτασης διαρροή μόνο στο σημείο της ακμής της ρωγμής, η αντοχή του υλικού εξαρτάται αποκλειστικά από την επέκταση της ρωγμής και γι' αυτό το λόγο οι καμπύλες $J-R$ θεωρούνται χαρακτηριστικό του υλικού όπως η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων. Στην περίπτωση που η διαρροή του υλικού είναι μεγαλύτερη, η επέκταση της ρωγμής επηρεάζεται από το μέγεθος και τη γεωμετρία του δοκιμίου. Για τον υπολογισμό των καμπυλών αυτών χρησιμοποιήθηκαν 5 τουλάχιστον δοκίμια (για την περίπτωση σταθερής επέκτασης της ρωγμής) εξαιτίας του εύρους των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού.

Από τις καμπύλες $J-R$ και σύμφωνα με τη διαδικασία ESIS [73] για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς των μετάλλων έναντι θραύσης, υπολογίστηκε η παράμετρος $J_{0,2}$ που αποτελεί μέτρηση της αντίστασης του υλικού για αύξηση του μήκους της ρωγμής κατά 0,2mm. Για πολλά

υλικά, όπως μαλακοί και μέσης αντοχής χάλυβες, αυτή η παράμετρος παρέχει μια χρήσιμη εκτίμηση του χρονικού σημείου δημιουργίας μιας ρωγμής, η οποία θεωρείται εκτίμηση του κατώτατου ορίου του J_i [73].

Για την περίπτωση της ασταθούς αύξησης μιας ρωγμής η θερμοκρασία αναφοράς T_o (γνωστή και ως T_{K100}) και η Master Curve υπολογίζονται όπως ορίζεται από το πρότυπο ASTM E1921 [45]. Η θερμοκρασία αναφοράς T_o υπολογίστηκε σύμφωνα με τη μέθοδο της χρήσης διαδοχικών θερμοκρασιών όπως περιγράφεται στα πλαίσια του προτύπου. Η θερμοκρασία αυτή χαρακτηρίζει τη δυσθραυστότητα δομικών χαλύβων υπό ελαστικές και ελαστοπλαστικές συνθήκες αστοχίας. Ορίζεται ως η θερμοκρασία στην οποία η τιμή του συντελεστή έντασης των τάσεων K_{Jc} για δοκίμια 1 CT είναι ίση προς $100 MPa\sqrt{m}$. Η θερμοκρασία αναφοράς T_o μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του τμήματος της μεταβατικής καμπύλης θερμοκρασιών που παρατηρείται στο διάγραμμα αντοχής έναντι κρούσης-θερμοκρασίας, η οποία είναι γνωστή και ως Master Curve. Για την καμπύλη αυτή και σύμφωνα με το ASTM E1921 [45] η σχέση του συντελεστή έντασης των τάσεων K_{Jc} και της θερμοκρασίας αναφοράς δίνεται από την εξίσωση:

$$K_{Jc} = 30 + 70 \exp[0,019(T - T_o)] \quad (3.9)$$

όπου T είναι η θερμοκρασία σε $^{\circ}\text{C}$ στην οποία πραγματοποιήθηκε το πείραμα και T_o είναι η θερμοκρασία αναφοράς σε $^{\circ}\text{C}$ η οποία έχει υπολογιστεί για το κάθε υλικό.

Στον Πίνακα 3.3 δίνονται συνοπτικά τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών CT και περιγράφονται οι εξισώσεις που διέπουν τα διαγράμματα σταθερής αύξησης του μήκους μιας ρωγμής, η τιμή $J_{0,2}$ του ολοκληρώματος J για μήκος ρωγμής ίσο με 0,2mm καθώς και η θερμοκρασία αναφοράς (T_o) του κάθε υλικού.

Η γραφική απεικόνιση των καμπύλων J - R σε θερμοκρασίες δοματίου καθώς και η διαδικασία υπολογισμού της Master Curve για κάθε υλικό από το οποίο προήλθαν οι δοκοί που θα χρησιμοποιηθούν στα μεγάλης κλίμακας πειράματα περιλαμβάνονται στο Παράρτημα Α. Οι πολύ χαμηλές τιμές της θερμοκρασίας αναφοράς που υπολογίζονται, αποτελούν ένδειξη της εξαιρετικής δυσθραυστότητας που επιδεικνύουν οι χάλυβες της εργασίας.

Πίνακας 3.3: Σύνοψη αποτελεσμάτων πειραματικών δοκιμών CT

Θερμοκρασία Υλικό	+20 $^{\circ}\text{C}$		-20 $^{\circ}\text{C}$		T_o [$^{\circ}\text{C}$]
	Καμπύλη J-R	$J_{0,2}$ [Nmm^{-1}]	Καμπύλη J-R	$J_{0,2}$ [Nmm^{-1}]	
S355J2, HEA300	$J = 1036,3 \cdot \Delta\alpha^{0,6915}$	340,5	$J = 1143,3 \cdot \Delta\alpha^{0,6451}$	404,8	-136
S355J2, IPE500	$J = 762,81 \cdot \Delta\alpha^{0,6900}$	251,3	$J = 859,38 \cdot \Delta\alpha^{0,6158}$	317,6	-142
S460M, HEA300	$J = 1131,7 \cdot \Delta\alpha^{0,7268}$	351,3	$J = 1315,7 \cdot \Delta\alpha^{0,7533}$	391,4	-160
S460M, IPE500	$J = 1202,7 \cdot \Delta\alpha^{0,7294}$	371,8	$J = 1491,4 \cdot \Delta\alpha^{0,7751}$	428,4	-156

3.5 Χημική σύσταση

Οι χάλυβες που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας υπεβλήθησαν σε φασματοχημική ανάλυση προκειμένου να καθοριστεί η χημική τους σύσταση. Στον Πίνακα 3.4 διακρίνονται τα χημικά συστατικά του κάθε χάλυβα σύμφωνα με την ανάλυση που

πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο των χαλυβουργιών του Peine. Αναλύθηκαν δύο ποιότητες χάλυβα (S355J2-S460M) οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή των δοκών και των υποστρωμάτων των κόμβων που θα μελετηθούν στα πλαίσια της διατριβής. Υπενθυμίζεται ότι από τις δύο αυτές ποιότητες ο χάλυβας S355J2 χρησιμοποιήθηκε σε πειραματικές διατάξεις υπό μονοτονικές και ανακυκλιζόμενες φορτίσεις, ενώ ο χάλυβας S460M χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά σε πειράματα μονοτονικών φορτίσεων.

Πίνακας 3.4: Χημική ανάλυση των χαλύβων της εργασίας [% κ.β. σύνθεση]

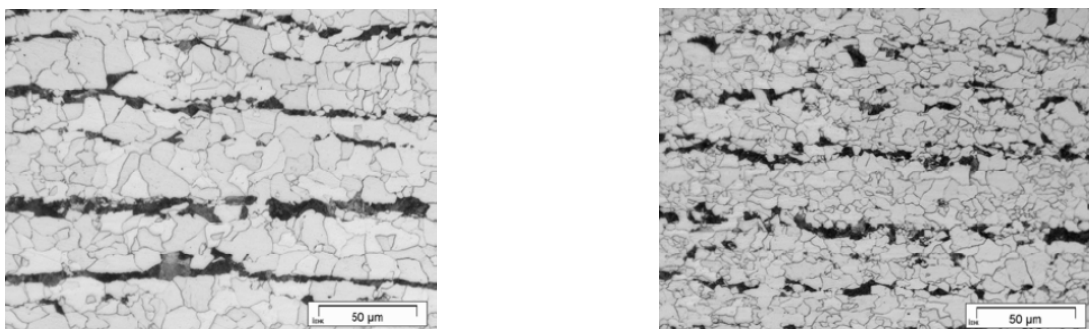
Θερμότητα	C	Si	Mn	P	S	N	Al	V	Nb	Ti	Cu	Cr	Ni	Mo
S355 J2														
27187	0.09	0.18	1.50	0.011	0.008	0.007	0.025	0.06	0.01	0.00	0.06	0.03	0.05	0.00
27179	0.09	0.16	1.48	0.019	0.004	0.008	0.029	0.05	0.01	0.00	0.09	0.05	0.05	0.00
S460 M														
23644	0.09	0.23	1.63	0.014	0.001	0.01	0.025	0.11	0.03	0.00	0.01	0.03	0.03	0.00
27479	0.09	0.22	1.62	0.012	0.002	0.010	0.026	0.11	0.02	0.00	0.02	0.03	0.06	0.00

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων προκύπτει το συμπέρασμα ότι και οι δύο ποιότητες χάλυβα που χρησιμοποιήθηκαν έχουν παρόμοια σύσταση χωρίς μεγάλες διαφορές στα χαρακτηριστικά τους. Η παρουσία μεγαλύτερης ποσότητας πυριτίου (Si) στο χάλυβα S460M επεξηγεί την αυξημένη τάση διαρροής του εν λόγω χάλυβα. Η χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο (S) και φώσφορο (P) αποτελούν ένδειξη της αυξημένης ολκιμότητας και συγκολλησιμότητας που θα επιδείξουν.

Αξίζει να αναφερθεί ότι η περιεκτικότητα σε άνθρακα είναι στενά συνδεδεμένη με τη δυσθραυστότητα ενός χάλυβα. Συγκεκριμένα οι όλκιμοι χάλυβες, όπως αυτοί της παρούσας εργασίας, έχουν χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα σε σχέση με παραδείγματα πιο ψαθυρών χαλύβων. Από την άλλη βέβαια η χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα μπορεί να επηρεάσει αρνητικά το όριο διαρροής ενός δομικού χάλυβα, βελτιώνοντας ωστόσο τη συγκολλησιμότητά του.

3.6 Κοκκομετρική ανάλυση

Η κοκκομετρική ανάλυση πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τον κανονισμό ASTM E 112 [74]. Η διαδικασία που προτείνεται έχει σκοπό τον καθορισμό του τύπου και της κατανομής των μη μεταλλικών εγκλεισμάτων στο σώμα του υλικού. Το δοκίμιο αφού τεμαχισθεί γυαλίζεται με διάλυμα 2% νιτρικού οξέως ώστε να γίνουν πιο εμφανή τα συστατικά του στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Με τον τρόπο αυτό προέκυψαν οι φωτογραφίες του Σχήματος 3.13 στις οποίες φαίνεται ότι η μικροδομή των χαλύβων που εξετάστηκαν αποτελείται από αλληπάλληλες στρώσεις φερρίτη και περλίτη. Επίσης από την ανάλυση προκύπτει ότι στο σώμα του υλικού υπήρχαν λίγα σφαιροειδή θείουχα εγκλείσματα καθώς και σχετικά αραιά μόρια πολύπλοκων ενώσεων οξειδίων.



Σχήμα 3.13: Μικροδομή του χάλυβα S355J2 (αριστερά) και του S460M (δεξιά)

Η κοκκομετρία του υλικού είναι σημαντική προκειμένου να καθοριστεί η κλίμακα μήκους στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων. Η κλίμακα μήκους καθορίζει τη διάσταση του πεπερασμένου στοιχείου κατά μήκος του οποίου πρέπει να ικανοποιείται η οριακή τιμή του μοντέλου βλάβης προκειμένου να θεωρείται η ύπαρξη αστοχίας. Η κοκκομετρία δηλαδή μας δείχνει πιο είναι το κρίσιμο μήκος μιας ρωγμής που δημιουργείται στο σώμα του υλικού, η οποία όταν επεκταθεί μπορεί να δημιουργήσει αστοχία. Ο ASTM E 112 [74] καθορίζει την κοκκομετρία μετρώντας τον αριθμό των κόκκων σε μια επιφάνεια συγκεκριμένου μεγέθους. Ο αριθμός αυτός συγκρίνεται με έναν αντίστοιχο ο οποίος προτείνεται από τον κανονισμό και ο οποίος καθορίζει την τελική τιμή της κοκκομετρίας. Στον Πίνακα 3.5 καταγράφεται η κοκκομετρία σύμφωνα με τον παραπάνω κανονισμό, καθώς και το μέγεθος της διαμέτρου των κόκκων σε *mm* για τις ποιότητες χάλυβα που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διατριβή.

Αξίζει να σημειωθεί ότι μικρότερη διάμετρος των κόκκων συνεπάγεται μικρότερα και λιγότερα κενά ανάμεσά τους και άρα καλύτερη συναρμογή των συστατικών του υλικού με ευεργετικά αποτελέσματα στη δυσθραυστότητά του. Ταυτόχρονα αυξάνεται και το όριο διαρροής καθώς ενεργοποιούνται σε μεγαλύτερο βαθμό οι μηχανισμοί κράτυνσης του υλικού εξαιτίας της μικρότερης ενδοκοκκώδους απόστασης.

Πίνακας 3.5: Κοκκομετρία χάλυβων εργασίας

Ποιότητα χάλυβα	Διατομή	Κοκκομετρία ASTM [G]	Μέση διάμετρος κόκκων [mm]
S355J2	HEA 300	10,0	0.0128
S355J2	IPE 500	10,5	0.0108
S460M	HEA 300	11,0	0.0082
S460M	IPE 500	11,5	0.0067

3.7 Χαρακτηριστικό μήκος

Η μέτρηση του χαρακτηριστικού μήκους αποτελεί σημαντική παράμετρο της παρούσας εργασίας καθώς έχει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων τα οποία θα περιγραφούν στα επόμενα κεφάλαια. Το χαρακτηριστικό μήκος περιγράφει την ελάχιστη απόσταση στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων κατά μήκος της οποίας πρέπει να ικανοποιείται το κριτήριο αστοχίας που έχει επιλεγεί σε κάθε περίπτωση. Δείχνει δηλαδή την έκταση του υλικού η οποία πρέπει να ενεργοποιείται από το εκάστοτε κριτήριο αστοχίας προκειμένου να θεωρηθεί βλάβη στο αριθμητικό μοντέλο. Στα πλαίσια της διατριβής ως κριτήριο αστοχίας χρησιμοποιείται η όλκιμη δημιουργία ρωγμής στο σώμα του υλικού. Η τιμή του χαρακτηριστικού μήκους εξαρτάται από το μέγεθος της κοκκομετρίας, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως και για το λόγο αυτό η μέτρησή του συνήθως περιλαμβάνει τη χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου.

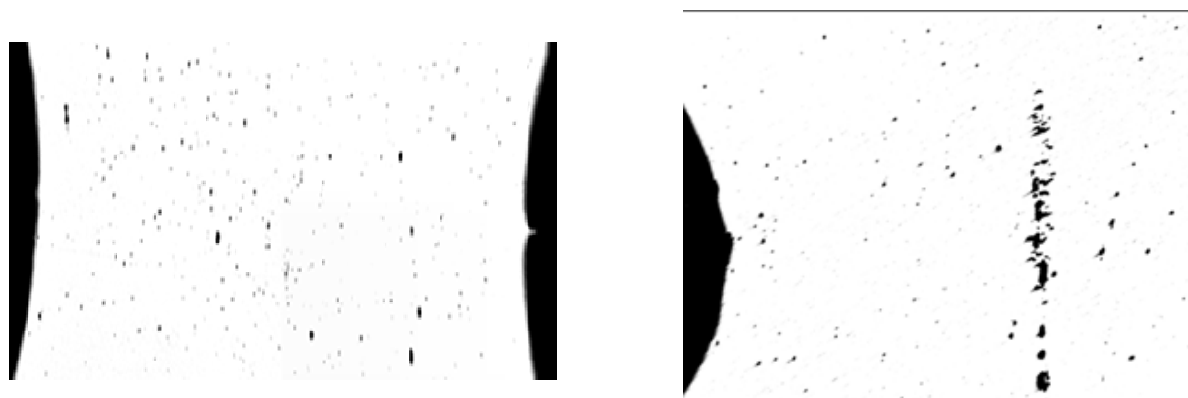
Ο υπολογισμός του χαρακτηριστικού μήκους μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους οι οποίοι καθορίζονται με βάση το διαθέσιμο τεχνικό εξοπλισμό και την απαιτούμενη ακρίβεια. Όλες όμως οι μέθοδοι βασίζονται στη μικροδομή του υλικού και στον τρόπο αστοχίας που επιδεικνύει ένα δοκίμιο υπό εφελκυσμό κατασκευασμένο από το προς εξέταση υλικό.

Η κοκκομετρική ανάλυση που παρουσιάστηκε προηγουμένως αποτέλεσε εξ' αρχής για τους ερευνητές μία λύση στο πρόβλημα υπολογισμού του χαρακτηριστικού μήκους. Για το σκοπό αυτό το μέσο μέγεθος των κόκκων συσχετίζεται με τον όλκιμο μηχανισμό δημιουργίας μιας ρωγμής. Πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου αποτελεί το γεγονός ότι η τεχνική της κοκκομετρικής ανάλυσης έχει συμπεριληφθεί σε κανονισμούς, όπως ο ASTM E 112 [74], με αποτέλεσμα τα αποτελέσματά

της να έχουν κοινό μέτρο σύγκρισης. Από τις πιο γνωστές εργασίες στο συγκεκριμένο θέμα αποτελεί η έρευνα των Panontin και Sheppard [75] η οποία καταλήγει στο συμπέρασμα ότι το χαρακτηριστικό μήκος στην περίπτωση δομικών χαλύβων (S235-S460) είναι ίσο με 2 έως 3 φορές το μέσο μέγεθος των κόκκων του υλικού, όση δηλαδή είναι η απόσταση που χρειάζεται για να δημιουργηθεί μια μακρορωγμή στο σώμα του υλικού. Η τεχνική αυτή βρίσκει εφαρμογή σε πολλές περιπτώσεις αν και άλλοι ερευνητές όπως οι Ritchie και Server [76] θεωρούν συντηρητικά τα αποτελέσματά της στην περίπτωση της όλκιμης δημιουργίας ρωγμής στην άνω περιοχή θερμοκρασιών της αντοχής έναντι κρούσης.

Το χαρακτηριστικό μήκος περιγράφει την έκταση της επιφάνειας του υλικού στην οποία μια ρωγμή έχει αρκετά μεγάλο μέγεθος ώστε να μπορεί να προκαλέσει αστοχία. Με βάση τον ορισμό αυτό, ο υπολογισμός του χαρακτηριστικού μήκους μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσα από παρατήρηση των επιφανειών αστοχίας δοκιμίων υπό εφελκυστική φόρτιση και της διαδικασίας συνένωσης των κενών η οποία οδηγεί σε αύξηση του μήκους μιας ρωγμής. Η μέτρηση δηλαδή βασίζεται στην απόσταση που έχουν δύο γειτονικά κενά στο σώμα του υλικού που είναι πιθανόν να συνενωθούν και τα οποία στην τελική επιφάνεια θραύσης εμφανίζονται σαν ένα ενιαίο κενό. Αυτό δηλαδή που μετράται τελικά είναι η διάμετρος του κενού στην επιφάνεια θραύσης το οποίο προέρχεται από συνένωση μικρότερων κενών. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιήθηκε από τον Panontin [75], Ritchie [76] και Chi [77] προκειμένου να καταλήξουν στο κρίσιμο εκείνο μέγεθος που ορίζει το μήκος μιας μακρορωγμής αν και τα αποτελέσματά τους εμφανίζουν αρκετά μεγάλη διασπορά. Ωστόσο φαίνεται ότι μία αρκετά ασφαλής τιμή που προτείνεται από όλους είναι δύο φορές η μετρούμενη διάμετρος των κενών στην επιφάνεια αστοχίας. Για τους υπολογισμούς είναι απαραίτητη η παρουσία ηλεκτρονικού μικροσκοπίου προκειμένου να μετρηθούν οι αποστάσεις μεταξύ των κενών του υλικού σε επιφάνειες δοκιμίων οι οποίες έχουν αστοχήσει με όλκιμο τρόπο.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής χρησιμοποιείται η πρόταση του Kanvinde [78] και η οποία αποτελεί ένα συνδυασμό των παραπάνω μεθόδων. Η μέτρηση του χαρακτηριστικού μήκους περιλαμβάνει μια ανώτατη και μια κατώτατη τιμή. Η ανώτατη τιμή προκύπτει μέσω της μεθόδου των Hancock και Mackenzie [79] κατά την οποία δεν μετράται η διάμετρος των κενών στην επιφάνεια θραύσης ενός δοκιμίου υπό εφελκυσμό, αλλά στην επιφάνεια του δοκιμίου ακριβώς πριν τη θραύση. Η εφελκυστική δοκιμή δηλαδή διακόπτεται πριν την τελική θραύση, το δοκίμιο κόβεται κατά τη διαμήκη του έννοια και στη συνέχεια μετρούνται οι περιοχές που έχουν υποστεί συνένωση των κενών τους. Στο Σχήμα 3.14 φαίνεται το αποτέλεσμα μιας τέτοιας τομής καθώς και τα νεοδημιουργηθείσα κενά για ένα από τα δοκίμια της διατριβής. Από το Σχήμα 3.14 γίνεται δυνατή η διάκριση των περιοχών δημιουργίας των κενών πριν και μετά τη δημιουργία μακρορωγμών οι οποίες επιφέρουν την τελική αστοχία των δοκιμίων. Η μέση τιμή που προκύπτει από τις μετρήσεις αυτών των νέων κενών αποτελεί την ανώτατη τιμή της μεθόδου.



Σχήμα 3.14: Δημιουργία μικροκενών στο σώμα του υλικού πριν (αριστερά) και κατά (δεξιά) τη στιγμή της όλκιμης δημιουργίας ρωγμής

Η κατώτατη τιμή του χαρακτηριστικού μήκους προκύπτει από τη μέθοδο υπολογισμού με βάση το μέγεθος της κοκκομετρίας του υλικού. Συγκεκριμένα, η τιμή αυτή είναι ίση με δύο φορές τη μέση διάμετρο ενός κενού στο σώμα του υλικού, καθώς εξορισμού για να σχηματιστεί μια ρωγμή πρέπει να έχει μήκος τουλάχιστον ίσο με τη διάμετρο δύο διαδοχικών κενών τα οποία θα συνενωθούν. Η τιμή αυτή αν και συντηρητική έχει χρησιμοποιηθεί από πολλούς ερευνητές στο παρελθόν όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως.

Στον Πίνακα 3.6 φαίνονται οι δύο οριακές τιμές για τις ποιότητες χάλυβα της εργασίας. Από την ανώτατη και την κατώτατη τιμή προέκυψε ο μέσος όρος του χαρακτηριστικού μήκους ο οποίος χρησιμοποιήθηκε κατά τη μοντελοποίηση των πειραμάτων που θα ακολουθήσουν με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων.

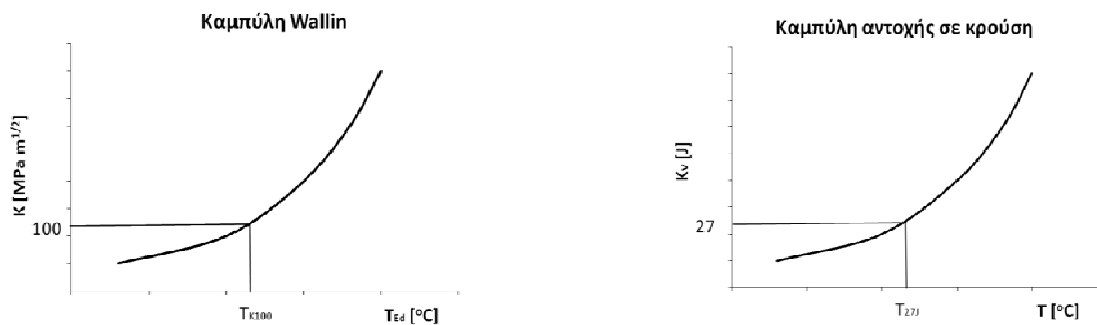
Πίνακας 3.6: Υπολογισμός χαρακτηριστικού μήκους των χαλύβων της εργασίας

Είδος χάλυβα	Διατομή	Κατώτατο όριο [mm]	Μέση τιμή [mm]	Ανώτατο όριο [mm]
S355J2	HEA 300	0,090	0,250	0,410
S355J2	IPE 500	0,088	0,243	0,398
S460M	HEA 300	0,072	0,218	0,365
S460M	IPE 500	0,070	0,215	0,360

3.8 Συσχετισμός δοκιμής Charpy και παραμέτρων θραυστομηχανικής

Η ευρεία χρήση της δοκιμής Charpy έχει οδηγήσει στην αναγκαιότητα συσχέτισης μεταξύ των τιμών της απορροφούμενης ενέργειας της δοκιμής κρούσης Charpy και των παραμέτρων δυσθραυστότητας του υλικού που εκφράζονται σε όρους θραυστομηχανικής (K_{Ic}) και οι οποίες προέρχονται από πειράματα σε δοκίμια *CT*. Για το σκοπό αυτό έχουν προταθεί διάφορες προσεγγίσεις πολλές από τις οποίες έχουν εισαχθεί σε κανονισμούς. Συγκεκριμένα, ο ASTM E1921 [45] επικαλείται μια θερμοκρασία T_0 η οποία είναι χαρακτηριστική της δυσθραυστότητας των χαλύβων οι οποίοι εμφανίζουν μετάβαση από ψαθυρό σε όλκιμο τρόπο θραύσης με ταυτόχρονη άνοδο της θερμοκρασίας. Η μεθοδολογία που υιοθετείται από τον κανονισμό βασίζεται στη χρήση της στατιστικής προκειμένου να περιγραφούν οι τυχαίες θέσεις εμφάνισης μικρορωγμών στο χάλυβα. Η τυχαία αυτή διάταξη των θέσεων των ρωγμών επεξηγεί και τη διασπορά των τιμών των μεταβλητών της θραυστομηχανικής (K_{Ic} -τιμή της δυσθραυστότητας για γραμμική ελαστική συμπεριφορά) στην περιοχή της μετάβασης από ψαθυρή σε όλκιμη μορφή αστοχίας [47]. Η διακύμανση των τιμών οδηγεί σε μεγάλη διασπορά στην οποία φαίνεται ότι οι τιμές εξαρτώνται από το μέγεθος του δοκιμίου [48] με αποτέλεσμα τα μεγαλύτερα δοκίμια να παρουσιάζουν μικρότερες τιμές διασποράς σε σχέση με τα δοκίμια μικρότερου μεγέθους. Ο Wallin [49] κατόρθωσε να περιγράψει στατιστικά το μεγάλο εύρος των τιμών σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία της μεταβατικής περιοχής θερμοκρασιών της δυσθραυστότητας του Σχήματος 3.8, λαμβάνοντας υπόψη το μήκος ($W-a$) της περιοχής του δοκιμίου *CT* η οποία βρίσκεται μπροστά από την ακμή της ρωγμής όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9. Ο ίδιος σε μια άλλη εργασία του [50] παρατήρησε ότι η αύξηση της δυσθραυστότητας με την ταυτόχρονη αύξηση της θερμοκρασίας δεν εξαρτάται από το όριο διαρροής, τη χημική σύνθεση ή τη θερμική κατεργασία του χάλυβα κατά την παραγωγή των διαφόρων δομικών μελών. Με βάση αυτήν την παρατήρηση οδηγήθηκε στην υιοθέτηση μιας καμπύλης κοινού σχήματος για το σύνολο των χαλύβων, η οποία τελικά έχει εισαχθεί στους κανονισμούς με την ονομασία “Master Curve”. Για τον προσδιορισμό της καμπύλης αυτής χρησιμοποιούνται πειραματικά αποτελέσματα από δοκίμια *CT* πάχους 25,4mm (1,0 inch). Από την “Master Curve” μπορούμε να προσδιορίσουμε τη θερμοκρασία T_{K100} (η οποία είναι

γνωστή και ως T_0) στην οποία η τιμή της μεταβλητής K_{Ic} είναι ίση με $100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.15. Τα διαγράμματα του Σχήματος 3.15 αποτελούν μεγέθυνση της μεταβατικής περιοχής θερμοκρασιών του διαγράμματος του Σχήματος 3.8. Η καμπύλη του Wallin συσχετίζει τις θερμοκρασίες της περιοχής αυτής με το συντελεστή έντασης των τάσεων, ενώ η καμπύλη αντοχής σε κρούση σε κρούση (δυσθραυστότητας) συσχετίζει τις θερμοκρασίες με την απορροφούμενη ενέργεια της δοκιμής Charpy.



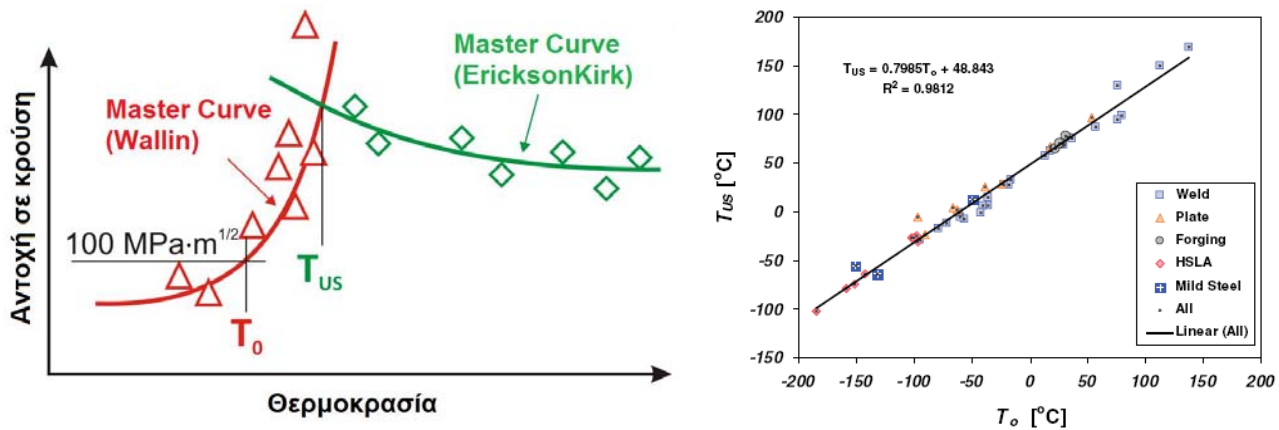
Σχήμα 3.15: Προσδιορισμός του T_{K100} και του T_{27J}

Για την εύρεση της δυσθραυστότητας ενός χάλυβα χρησιμοποιείται και ο μετασχηματισμός του Sanz [51] ο οποίος εξετάζει τη σχέση μεταξύ της μεταβλητής K_{Ic} και της ενέργειας CVN που απορροφάται κατά τη δοκιμή Charpy. Η σχέση αυτή θεωρείται η πιο ακριβής από αυτές που έχουν προταθεί και βασίζεται στα αποτελέσματα μετρήσεων έξι διαφορετικών ποιοτήτων χάλυβα με 14 διαφορετικές θερμικές κατεργασίες. Η σχέση στην οποία καταλήγει ο Sanz ισχύει για τη μεταβατική περιοχή θερμοκρασιών της δυσθραυστότητας του Σχήματος 3.8 και παρουσιάζεται στην εξίσωση (3.10). Η θερμοκρασία T_{K100} αποτελεί δηλαδή το όριο στο οποίο η αύξηση του μήκους της ρωγμής έχει σταθερό ρυθμό, ενώ κάτω από αυτό ο μηχανισμός θραύσης χαρακτηρίζεται από την απόσχιση.

$$T_{K100} = T_{27J} - 18 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.10)$$

όπου T_{27J} είναι η θερμοκρασία στην οποία η απορροφούμενη ενέργεια Charpy είναι 27J.

Στα πλαίσια της έρευνας για τον καθορισμό της δυσθραυστότητας σε υψηλές θερμοκρασίες, ο EricksonKirk καθόρισε αρχικά [52] την επίδραση της θερμοκρασίας στην άνω περιοχή θερμοκρασιών του Σχήματος 3.8 για την περίπτωση φερριτικών χαλύβων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποίησε μια βάση δεδομένων με πάνω από 1000 μετρήσεις δυσθραυστότητας στην άνω περιοχή θερμοκρασιών του διαγράμματος του Σχήματος 3.8. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της εργασίας, η επίδραση της θερμοκρασίας στη δυσθραυστότητα εξαρτάται από τη μικροδομή του υλικού και συγκεκριμένα από τη μορφή του ατομικού πλέγματος. Για το λόγο αυτό τα αποτελέσματα περιορίζονται σε χάλυβες με φερριτική σύνθεση, χωρίς να επεκτείνονται σε περιπτώσεις με διαφορετική σύνθεση και άρα διαφορετικό ατομικό πλέγμα. Αντίθετα, η χημική σύσταση και η θερμική κατεργασία του μετάλλου έχουν σημαντική επίδραση στο μέγεθος και τη θέση των εγκλεισμάτων στο υλικό με αποτέλεσμα να επηρεάζουν το εύρος τιμών που παίρνει η δυσθραυστότητα σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία της μεταβατικής ή της άνω περιοχής θερμοκρασιών του Σχήματος 3.8. Η σχέση αυτή της δυσθραυστότητας με τη θερμοκρασία στην άνω περιοχή θερμοκρασιών του διαγράμματος μπορεί να συνδυαστεί με τη Master Curve που προτάθηκε από τον Wallin και η οποία συσχετίζει τα ίδια μεγέθη στη μεταβατική περιοχή του διαγράμματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.16. Στο σχήμα φαίνονται δηλαδή δύο Master Curves η πρώτη από τις οποίες ισχύει για τη μεταβατική περιοχή θερμοκρασιών του διαγράμματος του Σχήματος 3.8 και η δεύτερη για την ανώτερη περιοχή.



Σχήμα 3.16: Σχέση μεταξύ δυσθραυστότητας-θερμοκρασίας των Wallin και EricksonKirk [53] (αριστερά) και των θερμοκρασιών T_0 (T_{K100}) και T_{US} (δεξιά)

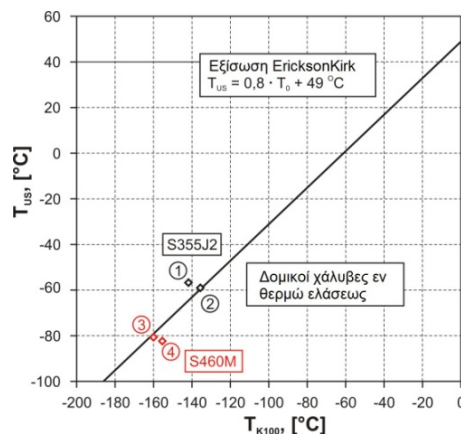
Με τον τρόπο αυτό ο EricksonKirk [53] συνδύασε με μοναδικό τρόπο τη σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας T_{US} και της θερμοκρασίας T_{K100} της οποίας η διαδικασία υπολογισμού προσδιορίζεται από τον κανονισμό ASTM E1921 [45]. Η θερμοκρασία T_{US} ορίζεται με αυθαίρετο τρόπο και δεν έχει απόλυτη φυσική σημασία, καθώς ακόμα και μετά από αυτή την τιμή είναι δυνατόν να παρατηρηθεί θραύση με τα χαρακτηριστικά της απόσχισης. Ωστόσο, η θερμοκρασία αυτή προκύπτει από μια κοινή διαδικασία για ένα ευρύ φάσμα χαλύβων και σηματοδοτεί τη θερμοκρασία μετά την οποία παρατηρείται κυρίως όλκιμη διαμητικής φύσεως θραύση. Η εξίσωση (3.11) περιγράφει τη σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας T_{US} και της θερμοκρασίας T_{K100} και ισχύει για χάλυβες φερριτικής σύστασης οι οποίοι χρησιμοποιούνται κατά τη δημιουργία αγωγών υψηλής πίεσης, πλοίων και υπεράκτιων κατασκευών.

$$T_{US} = 0,8T_{K100} + 49 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.11)$$

Η γραφική απεικόνιση της σχέσης αυτής φαίνεται στο Σχήμα 3.16. Οι τιμές έχουν προκύψει από πλήθος πειραματικών δεδομένων, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, συμπεριλαμβανομένων χαλύβων οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε πυρηνικές εγκαταστάσεις εβρισκόμενες υπό την επίδραση ακτινοβολίας, χαλύβων υψηλής αντοχής οι οποίοι χρησιμοποιούνται στην κατασκευή πλοίων και χαλύβων που χρησιμοποιούνται σε συνήθη έργα μηχανικού. Η ευρεία χρήση διαφόρων ποιοτήτων χαλύβων οδήγησε σε μεγάλη διασπορά των τιμών T_{K100} η οποία εκτείνεται από -180°C έως $+140^\circ\text{C}$. Έχοντας ως δεδομένη την τιμή της θερμοκρασίας T_{US} που καθορίζεται από την ελάχιστη θερμοκρασία λειτουργίας ενός έργου στο οποίο θέλουμε να εφαρμόσουμε πλαστική ανάλυση, μέσω της εξίσωσης (3.11) μπορούμε να υπολογίσουμε την τιμή του T_{K100} και επομένως να καταλήξουμε στην επιθυμητή ποιότητα χάλυβα η οποία θα ικανοποιεί την απαίτηση της T_{US} .

Η χρήση της διαδικασίας που προτείνεται από τον EricksonKirk [53] για τον υπολογισμό των τιμών της δυσθραυστότητας (καθορισμός οριακής τιμής ολοκληρώματος J) και η οποία αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, προϋποθέτει ότι ο χάλυβας που θα χρησιμοποιηθεί πληροί τις προϋποθέσεις που θέτει η εξίσωση (3.11). Από τις καμπύλες των δοκιμών Charpy, οι οποίες παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στο Παράρτημα Α, προέκυψαν οι θερμοκρασίες T_{US} για τους χάλυβες της παρούσας εργασίας. Οι θερμοκρασίες T_0 προκύπτουν με τη διαδικασία που προτείνει ο ASTM E1921 [45], η οποία περιγράφηκε στην §3.4. Στο Σχήμα 3.15 φαίνεται κατά πόσο η σχέση μεταξύ των θερμοκρασιών T_{US} και T_0 ικανοποιεί τα κριτήρια για την περίπτωση των χαλύβων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την παραγωγή των δοκών οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στα πειράματα της παρούσας διατριβής. Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνεται ότι οι συγκεκριμένοι

δομικοί χάλυβες συμφωνούν με την εξίσωση (3.11). Οι τιμές της εφελκυστικής αντοχής και δυσθραυστότητας καθώς και οι τιμές της χημικής σύστασης των χάλυβων της διατριβής έχουν ήδη καταγραφεί στους Πίνακες 3.2 και 3.4 αντίστοιχα.



Σχήμα 3.15: Σχέση μεταξύ των χάλυβων της εργασίας για τις δοκούς και της εξίσωσης (3.11) του EricksonKirk

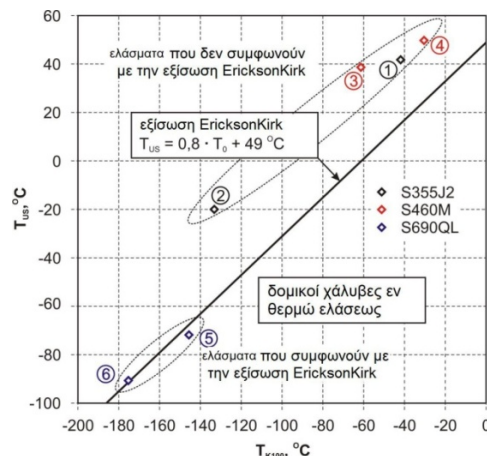
Ενδιαφέρον ωστόσο παρουσιάζει η περίπτωση των χάλυβων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή ελασμάτων, τα οποία ελέγχθησαν στα πλαίσια του προγράμματος PLASTOTOUGH [2], αν και δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Στην περίπτωση αυτή, αν και τα ελάσματα προέρχονταν από το ίδιο χαλυβουργείο (Peiner Träger GmbH), ωστόσο δεν συμβαδίζουν με την εξίσωση (3.11). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ενώ ορισμένα ελάσματα συμφωνούν με την εξίσωση που πρότείνει ο EricksonKirk [52], άλλα διαφέρουν σημαντικά. Επισημαίνεται ότι στα πλαίσια του προγράμματος ελέγχθησαν ελάσματα πάχους 20mm και 40mm, ενώ χρησιμοποιήθηκαν τρεις ποιότητες χάλυβα, S355, S460 και S690. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας δεν θα γίνει περαιτέρω αναφορά στα αποτελέσματα των ελασμάτων, ενώ περαιτέρω πληροφορίες μπορούν να αναζητηθούν στο [2]. Στους Πίνακες 3.7 και 3.8 φαίνεται η χημική σύσταση και τα αποτελέσματα των εφελκυστικών δοκιμών και δοκιμών Charpy αντίστοιχα για τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν από το υλικό των ελασμάτων. Στο Σχήμα 3.16 φαίνεται κατά πόσο η σχέση μεταξύ των τιμών T_o και T_{US} συμβαδίζει με τις τιμές της εξίσωσης (2.14). Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι ενώ οι χάλυβες υψηλής αντοχής δείχνουν να βρίσκονται σε συμφωνία με την εξίσωση του EricksonKirk, αυτό δεν συμβαίνει και για τις υπόλοιπες ποιότητες που χρησιμοποιήθηκαν. Επομένως, προκειμένου να μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτή η μέθοδος και για την περίπτωση των ελασμάτων πρέπει είτε η εξίσωση (3.11) να μετασχηματιστεί ανάλογα ή να επιλεγθούν ελάσματα των οποίων οι ιδιότητες του υλικού να συμφωνούν με την εξίσωση του EricksonKirk.

Πίνακας 3.7: Χημική σύσταση χάλυβων των ελασμάτων της εργασίας (μάζα %)

Αρ.	Πάχος Πλάκας	C	Si	Mn	P	S	N	Al	V	Nb	Ti	Cu	Cr	Ni	Mo
S355 J2															
1	20mm	0,20	0,30	1,56	0,017	0,008	0,0095	0,028	<0,01	<0,01	<0,01	0,04	0,08	0,03	<0,01
2	40mm	0,20	0,31	1,57	0,016	0,011	0,0086	0,045	<0,01	<0,01	<0,01	0,05	0,10	0,05	<0,01
S460 N															
3	21mm	0,19	0,50	1,65	0,014	0,007	0,0092	0,031	<0,01	0,03	<0,01	0,06	0,08	0,73	<0,01
4	31mm	0,18	0,44	1,66	0,014	0,005	0,0097	0,038	0,06	0,03	0,03	0,06	0,08	0,78	<0,01
S690 QL															
5	20mm	0,17	0,29	0,90	0,007	0,007	0,0095	0,050	<0,01	<0,01	<0,01	0,07	0,08	0,88	0,33
6	40mm	0,16	0,25	0,94	0,004	0,004	0,0079	0,059	<0,01	<0,01	<0,01	0,04	0,81	0,86	0,37

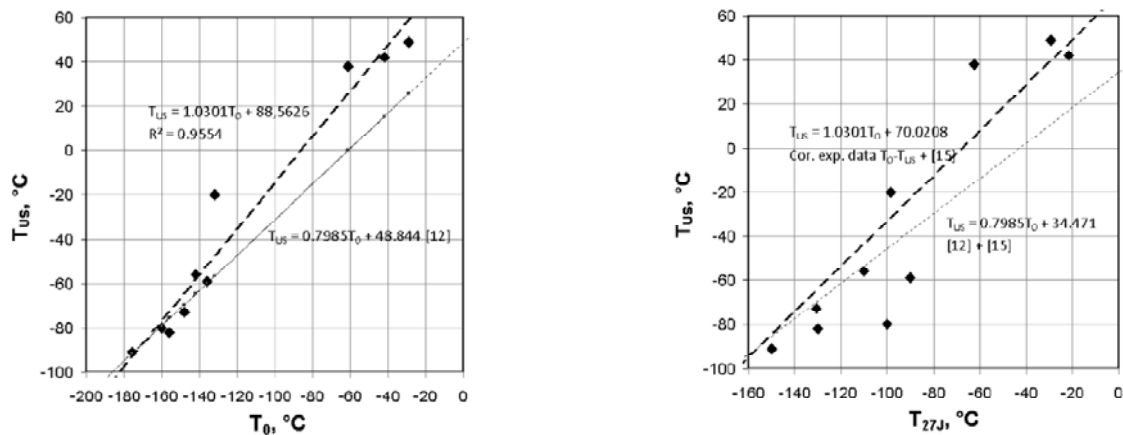
Πίνακας 3.8: Αποτελέσματα εφελκυστικών δοκιμών και δοκιμών Charpy για τα ελάσματα

Αρ.	Πάχος Πλάκας	Ποιότητα Χάλυβα	Όριο Διαρροής [MPa]	Όριο Θραύσης [MPa]	A_5 [%]	KV_{max} [J]	T_{27J} [$^{\circ}C$]
1	20mm	S355 J2	372	577	30,5	150	-21
2	40mm	S355 J2	360	544	35,3	235	-98
3	21mm	S460 N	470	651	26,0	183	-61
4	31mm	S460 N	441	628	30,3	167	-28
5	20mm	S690 QL	713	797	20,8	215	-130
6	40mm	S690 QL	746	822	21,5	189	-149



Σχήμα 3.16: Σχέση μεταξύ των χαλύβων της εργασίας για τα ελάσματα και της εξίσωσης του EricksonKirk

Στο Σχήμα 3.17 φαίνεται η σχέση μεταξύ του συνόλου των χαλύβων που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα PLASTOTOUGH [2] και της εξίσωσης (3.11) την οποία πρότεινε ο EricksonKirk. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι για θερμοκρασίες T_{US} μικρότερες από $-40^{\circ}C$ η εξίσωση συμβαδίζει με τις υπολογισθείσες τιμές, ακόμα και για τους χάλυβες S690QL των οποίων η μικροδομή έχει μπαινιτική σύνθεση και επομένως δεν συμβαδίζει με την απαίτηση περί ύπαρξης αποκλειστικά φερριτικών χαλύβων. Μαζί με την καμπύλη η οποία απεικονίζει την εξίσωση (3.11) στο διάγραμμα του Σχήματος 3.17 απεικονίζεται μια καμπύλη που προσαρμόζεται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο στις υπάρχουσες μετρήσεις μέσω της μεθόδου της γραμμικής παλινδρόμησης, τροποποιώντας με αυτόν τον τρόπο τη προτεινόμενη καμπύλη του EricksonKirk με τρόπο ώστε να ικανοποιεί τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων. Στο Σχήμα 3.17 φαίνεται η σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας T_{US} και T_{27J} μέσω της χρήσης του μετασχηματισμού του Sanz [51] που περιγράφηκε προηγουμένως. Ο λόγος είναι ότι στα πλαίσια του κανονισμού EN 10025 [35] η θερμοκρασία T_{27J} χρησιμοποιείται σε πιο ευρεία κλίμακα σε σχέση με τη θερμοκρασία T_{US} . Στο διάγραμμα αυτό περιλαμβάνεται και πάλι μια καμπύλη που προσομοιάζει κατά τον καλύτερο τρόπο τα αποτελέσματα της εργασίας με βάση τη γραμμική παλινδρόμηση. Όπως φαίνεται και από τη σύγκριση των δύο διαγραμμάτων του Σχήματος 3.17 η σχέση μεταξύ T_{US} και T_{27J} εμφανίζει μεγαλύτερη διασπορά τιμών συγκρινόμενη με τη σχέση μεταξύ T_o και T_{US} .



Σχήμα 3.17: Σχέση μεταξύ T₀ και T_{US} (αριστερά) και μεταξύ T_{US} και T_{27J} (δεξιά) για τους χάλυβες της εργασίας

Συνοψίζοντας τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι για τους χάλυβες που παρουσιάστηκαν στους Πίνακες 2.4 και 2.5 μπορούμε να καθορίσουμε τις τιμές του T_{K100} μέσω της εξίσωσης (3.11) με δεδομένη την απαιτούμενη τιμή του T_{US} προκειμένου να επιτρέπεται να εφαρμοστεί πλαστικός σχεδιασμός. Η εξίσωση (3.11) μπορεί να μετασχηματιστεί αν χρησιμοποιηθεί η σχέση του Sanz η οποία αποτυπώνεται στην εξίσωση (3.10). Με τον τρόπο αυτό προκύπτει η εξίσωση (3.12) η οποία μας επιτρέπει τον ορισμό της τιμής του T_{27J} .

$$T_{27J} \leq 1,25T_{US} - 43 \text{ [} ^\circ\text{C]} \quad (3.12)$$

Για παράδειγμα σε συνθήκες όπου η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι $T_{US}=+20^\circ\text{C}$ από την εξίσωση (3.12) προκύπτει ότι $T_{27J}=-18^\circ\text{C}$. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου έγκειται στο γεγονός ότι ο EN 10025 [35] δεν παρέχει τεχνικές προδιαγραφές προκειμένου να μπορούμε να ορίσουμε αν μια ποιότητα χάλυβα είναι συμβατή με την εξίσωση του EricksonKirk ή όχι. Επιπλέον, η τεχνική αυτή βασίζεται σε αποτελέσματα τα οποία προκύπτουν από μονοτονικές εφελκυστικές δοκιμές και δοκιμές Charpy χωρίς να επιβεβαιώνεται η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων σε περιπτώσεις ανακυκλιζόμενων φορτίσεων.

3.9 Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις

Από την ανάλυση των χαλύβων της εργασίας που αποτυπώθηκε προηγουμένως γίνεται αντιληπτή η πολύ καλή ποιότητα που τους χαρακτηρίζει. Συγκεκριμένα, το όριο διαρροής του χάλυβα S355J2 σε θερμοκρασία δωματίου υπολογίστηκε περί τα 450MPa ενώ του χάλυβα S460M ήταν περίπου 500MPa τόσο για δοκίμια που ελήφθησαν από διατομές HEA300 όσο και από διατομές IPE500. Επιπλέον, χαρακτηρίζονται από εξαιρετική αντοχή έναντι θραύσης σύμφωνα με τους υπολογισμούς της δοκιμής Charpy, καθώς η απαίτηση της ελάχιστης απορροφούμενης ενέργειας των 27J στους -20°C επιτυγχάνεται σε πολύ χαμηλότερες θερμοκρασίες (περίπου -100°C και για τις δύο ποιότητες). Η χημική τους σύνθεση κατέγραψε τη χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο (S) και φώσφορο (P) που τους χαρακτηρίζει με αποτέλεσμα να επιδεικνύουν αυξημένη ολκιμότητα (παραμόρφωση αστοχίας $\approx 30\text{-}35\%$) και υψηλή συγκολλησιμότητα. Ταυτόχρονα, η ανάλυση του μεγέθους της κοκκομετρίας με βάση τις προδιαγραφές των αμερικανικών κανονισμών [74] κατέδειξε ότι πρόκειται για λεπτόκοκκους χάλυβες (10-11G) με αποτέλεσμα να υπάρχουν λιγότερα και μικρότερα κενά ανάμεσα στους κόκκους του υλικού σε σχέση με πιο χονδρόκοκκους χάλυβες, γεγονός που προδιαθέτει για τη μεγάλη αντοχή έναντι ρηγματώσης που θα επιδείξουν κατά τις πειραματικές διερευνήσεις.

4 Συμπεριφορά επιλεγμένων μεταλλικών φορέων υπό σεισμικές καταπονήσεις

4.1 Απαιτήσεις σχεδιασμού

Η συμπεριφορά επιλεγμένων μεταλλικών φορέων υπό σεισμικές καταπονήσεις μελετήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας προκειμένου να καθοριστούν ρεαλιστικές χρονοϊστορίες φόρτισης συγκολλητών κόμβων δοκού-υποστυλώματος οι οποίες στη συνέχεια θα χρησιμοποιηθούν στις πειραματικές και αναλυτικές διεργασίες που θα περιγραφούν στα επόμενα κεφάλαια.

Οι απαιτήσεις σχεδιασμού των μεταλλικών κατασκευών σε περιοχές με υψηλή σεισμικότητα περιλαμβάνουν τη βασική προϋπόθεση να δύναται η κατασκευή να φέρει τα σεισμικά φορτία χωρίς να επέλθει η αστοχία της. Το ποσοστό της βλάβης το οποίο θα προκληθεί στην κατασκευή από τη σεισμική δράση εξαρτάται από τη στάθμη επιτελεστικότητάς της. Διακρίνονται τρεις στάθμες επιτελεστικότητας, σύμφωνα με τις οποίες σχεδιάζεται κάθε κατασκευή και οι οποίες εξαρτώνται από τη σημασία και τη χρήση της. Η πρώτη στάθμη επιτελεστικότητας απαιτεί την αποφυγή της διακοπής λειτουργίας του κτιρίου. Η στάθμη αυτή εφαρμόζεται για έργα των οποίων η ομαλή λειτουργία μετά τη σεισμική δράση είναι ζωτικής σημασίας, όπως είναι νοσοκομεία, δίκτυα επικοινωνιών, ηλεκτροδότησης και ύδρευσης, υπουργεία κλπ. καθώς και εγκαταστάσεις ιδιαίτερης πολιτιστικής ή υγειονομικής βαρύτητας όπως είναι μουσεία, μνημεία, εργοστάσια πυρηνικής ενέργειας κλπ. Στα έργα αυτά ο σχεδιασμός έχει ως απώτερο στόχο την αποφυγή βλαβών ακόμα και στα μη φέροντα στοιχεία του κτιρίου προκειμένου αυτό να συνεχίσει τη λειτουργία του απευθείας μετά από ένα σεισμικό γεγονός. Η δεύτερη στάθμη επιτελεστικότητας έχει ως στόχο την προστασία της ανθρώπινης ζωής. Στα έργα αυτά ο σεισμός σχεδιασμού αναμένεται να προκαλέσει αρκετές βλάβες στα μη φέροντα στοιχεία της κατασκευής, ενώ ο φέρων οργανισμός αναμένεται να εισέλθει στην πλαστική περιοχή των παραμορφώσεων. Ωστόσο απαιτείται η κατασκευή να μπορεί να φέρει χωρίς πρόβλημα τα κατακόρυφα φορτία της και να είναι δυνατή η επισκευασιμότητά της. Τέλος η τρίτη στάθμη επιτελεστικότητας απαιτεί την αποφυγή κατάρρευσης του δομήματος. Η στάθμη αυτή προβλέπει ότι στην περίπτωση ενός σεισμικού γεγονότος το οποίο θα είναι μεγαλύτερο του σεισμού σχεδιασμού, η κατασκευή μπορεί να υποστεί μεγάλες βλάβες τόσο στα μη φέροντα όσο και στα φέροντα στοιχεία της. Παρόλα αυτά, απαιτείται η αποφυγή μερικής ή ολικής κατάρρευσής της εξαιτίας αστοχίας των μελών της ή μεγάλων μετατοπίσεων. Η πλαστικοποίηση αυτών των κατασκευών είναι εκτεταμένη ενώ οι έντονες βλάβες μπορεί να κάνουν ασύμφορη την επισκευή της και να κριθεί ως πιο συμφέρουσα λύση η κατεδάφιση.

Ο σχεδιασμός αντισεισμικών μεταλλικών κατασκευών έχει ως σκοπό την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας κατά τη διάρκεια ισχυρών σεισμικών διεγέρσεων προκειμένου να ελαττώνονται οι σεισμικές δυνάμεις που θα αναπτύσσονταν αν η κατασκευή συμπεριφερόταν ελαστικά. Συγκεκριμένα, οι σεισμικές δράσεις διαιρούνται με το συντελεστή συμπεριφοράς q , ο οποίος περιγράφει τη δυνατότητα μιας κατασκευής να απορροφήσει ενέργεια στην πλαστική περιοχή. Η απορρόφηση ενέργειας λαμβάνει μέρος στις περισσότερες των περιπτώσεων εξαιτίας ανελαστικών παραμορφώσεων σε επιλεγμένα σημεία της κατασκευής (τα οποία ονομάζονται ζώνες απορρόφησης ενέργειας), με τρόπο ο οποίος διαφέρει ανάλογα με το δομικό σύστημα που χρησιμοποιείται κάθε φορά, όπως π.χ. ο σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα των δοκών πλαισίων ροπής, ο λυγισμός και η διαρροή των συνδέσμων δυσκαμψίας σε κεντρικούς συνδέσμους δυσκαμψίας και η διαρροή της δοκού σύζευξης σε έκκεντρους συνδέσμους δυσκαμψίας. Η δεσπόζουσα παράμετρος της προαναφερθείσας ανελαστικής δράσης είναι οι παραμορφώσεις και όχι οι τάσεις που αναπτύσσονται στην κατασκευή.

Η εξασφάλιση της δυνατότητας μιας κατασκευής να απορροφά ενέργεια εισερχόμενη στην πλαστική περιοχή σύμφωνα με τον αρχικό της σχεδιασμό γίνεται μέσω κατάταξης των διατομών που χρησιμοποιούνται. Συγκεκριμένα ο EN 1993-1 [34] προβλέπει τέσσερις κατηγορίες διατομών, οι οποίες εξασφαλίζουν κατά πόσο ένα μέλος μπορεί να παραμορφώνεται στην πλαστική περιοχή. Η πλαστιμότητα σε πλαίσια ροπής εξασφαλίζεται μέσω επιλογής διατομών κατηγορίας 1 στις θέσεις όπου δημιουργούνται πλαστικές αρθρώσεις. Η κατηγορία αυτή των διατομών των μελών αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση προκειμένου να γίνεται εφικτή η πλαστικοποίηση της διατομής και να υπάρχει η δυνατότητα στροφής χωρίς να μειωθεί η αντοχή της. Ομοίως, σε πλαίσια με κατακόρυφους συνδέσμους δυσκαμψίας επιβάλλονται περιορισμοί στη λυγηρότητα των μελών των συνδέσμων, ενώ στις περιπτώσεις έκκεντρων συνδέσμων η πλαστιμότητα εξασφαλίζεται μέσω της επιλογής κατάλληλων ενισχυτικών ελασμάτων στη δοκό σύζευξης.

Μεγάλη σημασία κατά τον αντισεισμικό σχεδιασμό έχει ο περιορισμός των πλευρικών μετατοπίσεων της κατασκευής, ώστε αυτές να είναι εντός συγκεκριμένων ορίων. Αυτό γίνεται μέσω τοποθέτησης ορίων στο δείκτη σχετικής μετατόπισης των ορόφων ενός κτιρίου θ (interstorey drift coefficient) ο οποίος λαμβάνει υπόψη τον λόγο της τέμνουσας δύναμης προς την κατακόρυφη αντίδραση σε κάθε όροφο. Στην περίπτωση που έχει πραγματοποιηθεί πλαστική ανάλυση και έχει χρησιμοποιηθεί ο συντελεστής συμπεριφοράς q , οι τιμές των πλευρικών μετατοπίσεων προκύπτουν από τις μετατοπίσεις που προκύπτουν από τη φασματική ανάλυση πολλαπλασιασμένες με το συντελεστή q . Ανάλογα με τις τιμές της σχετικής μετατόπισης των ορόφων που θα προκύψουν [43] γίνεται εφικτή η διάκριση των κατασκευών σε αυτές οι οποίες έχουν επαρκή δυσκαμψία ($\theta < 0,1$), σε αυτές που πρέπει να ληφθούν υπόψη τα φαινόμενα δευτέρας τάξεως ($0,1 < \theta < 0,3$) και σε εκείνες που πρέπει να επανασχεδιαστεί αποτελεσματικότερα το δομικό σύστημα ($\theta > 0,3$).

Ο ικανοτικός σχεδιασμός παρέχει μία επιπλέον ασφάλεια κατά το σχεδιασμό μεταλλικών κατασκευών. Κατά τον ικανοτικό σχεδιασμό θεωρείται ότι έχει πραγματοποιηθεί ένας σεισμός κατά τον οποίο έχουν πλαστικοποιηθεί τα μέλη που λαμβάνουν μέρος στη διαδικασία απορρόφησης ενέργειας. Ο σεισμός αυτός είναι μεγαλύτερος από το σεισμό σχεδιασμού και σκοπό έχει τον καθορισμό της διαδικασίας πλαστικοποίησης της κατασκευής. Δηλαδή, γίνεται επιλογή του μηχανισμού με τον οποίο η κατασκευή θα απορροφήσει τη σεισμική ενέργεια μέσω πλαστικοποίησης συγκεκριμένων ζωνών. Μέσω της ορθής επιλογής των θέσεων που θα συμβεί αυτή η πλαστικοποίηση μπορούμε να αποφύγουμε πιθανούς μηχανισμούς κατάρρευσης, καθώς υπάρχει έλεγχος του μηχανισμού μέσω του οποίου θα επέλθει η βλάβη του δομήματος. Είναι επομένως εφικτή η εκ των προτέρων επιλογή των περιοχών που θα απορροφήσουν το μεγαλύτερο ποσοστό της σεισμικής ενέργειας κάνοντας με αυτό τον τρόπο ευκολότερη και οικονομικότερη τη διαδικασία επισκευής ενός δομήματος μετά από κάποιο σεισμικό γεγονός.

Σκοπός των αναλύσεων που θα ακολουθήσουν είναι ο καθορισμός των απαιτήσεων σε όρους παραμορφώσεων των ζωνών απορρόφησης ενέργειας, σε μεταλλικά κτίρια που υποβάλλονται σε σεισμικές καταπονήσεις.

Παρόλα αυτά οι απαιτήσεις σε όρους παραμορφώσεων που καθορίζονται στη συνολική κατασκευή εκφράζουν καθολικές τιμές και είναι αναγκαίο να μετατραπούν σε τιμές που θα αφορούν την τοπική κλίμακα ενός κόμβου ροπής και των μελών που τον αποτελούν. Για το λόγο αυτό η αναλυτική διαδικασία χωρίζεται σε τρία στάδια όπως φαίνεται στη συνέχεια:

- Στάδιο 1: Ανάλυση του συνολικού φορέα της κατασκευής
- Στάδιο 2: Ανάλυση επικεντρωμένη στη ζώνη απορρόφησης ενέργειας (σύνδεση ροπής)
- Στάδιο 3: Ανάλυση της περιοχής εμφάνισης ρηγμάτωσης (συγκόλληση κόμβου)

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται το πρώτο στάδιο της ανάλυσης κατά το οποίο προσδιορίζονται οι απαιτήσεις σε όρους παραμορφώσεων διαφόρων κτιριακών φορέων οι οποίοι υπόκεινται σε σεισμικές διεγέρσεις.

4.2 Βασικές διατάξεις μεταλλικών κατασκευών

Για μεγάλο χρονικό διάστημα οι μεταλλικές κατασκευές θεωρούντο ιδιαίτερα ανθεκτικές και με μεγάλη πλαστιμότητα έναντι σεισμικών δράσεων. Η αντιμετώπιση αυτή άλλαξε μετά τους σεισμούς του Northridge στην Καλιφόρνια και του Kobe στην Ιαπωνία το 1994 και 1995 αντίστοιχα. Η παρατήρηση των βλαβών σε μεταλλικά κτίρια από τους δύο προαναφερθέντες σεισμούς, καταδεικνύει ότι σε αντίθεση με τα προσδοκώμενα αποτελέσματα, ο αριθμός των ψαθυρών αστοχιών που εμφανίστηκαν σε κόμβους δοκού υποστυλώματος ήταν μεγάλος. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι οι συγκεκριμένες μεταλλικές κατασκευές δεν εκμεταλλεύτηκαν τις ιδιότητες της αυξημένης πλαστιμότητας και της ανελαστικής συμπεριφοράς βάσει των οποίων είχαν σχεδιαστεί. Γίνεται λοιπόν σαφές ότι δεν είναι δεδομένη η ικανότητα των μεταλλικών πλαισίων να απορροφούν την εισερχόμενη από το σεισμό ενέργεια ανελαστικά, αλλά θα πρέπει αυτά να ικανοποιούν κριτήρια σχεδιασμού τα οποία δεν είναι, προς το παρόν, επαρκώς τεκμηριωμένα. Είναι σαφές ότι το πρόβλημα του καθορισμού της απαιτούμενης ικανότητας ενός μεταλλικού πλαισίου να ανθίσταται σε παραμορφώσεις είναι πολυπαραμετρικό και εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά της σεισμικής δόνησης όσο και από τα χαρακτηριστικά της κατασκευής.

4.2.1 Χαρακτηριστικά πλαισίων

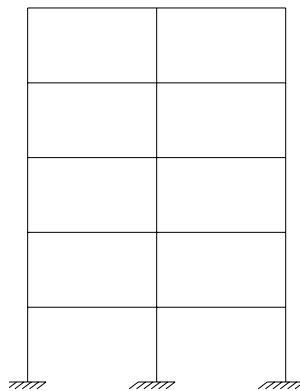
Τα μεταλλικά πλαίσια διακρίνονται σε κατηγορίες ανάλογα με το σύστημα το οποίο προσφέρει πλευρική δυσκαμψία και απορροφά είτε τα σεισμικά φορτία είτε άλλες πλευρικές φορτίσεις όπως οι ανεμοπιέσεις. Η κάθε κατηγορία χαρακτηρίζεται από διαφορές στις διατάξεις, στα μέλη και στις συνδέσεις έχοντας ως αποτέλεσμα τη διαφορετική απόκριση της κάθε μιας υπό σεισμικές φορτίσεις. Κάθε σύστημα απορρόφησης ενέργειας έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τα οποία επηρεάζουν το ποσοστό βλάβης σε μια κατασκευή και την ευκολία μιας πιθανής επισκευής. Η απορρόφηση της ενέργειας γίνεται σε ειδικές περιοχές, οι οποίες εξαρτώνται κάθε φορά από το στατικό σύστημα που έχει χρησιμοποιηθεί. Σε πλαίσια ροπής οι ανελαστικές παραμορφώσεις αναμένεται να σχηματιστούν στα άκρα των δοκών, οπότε οι απαιτήσεις παραμόρφωσης μπορούν να εκφραστούν σε όρους πλαστικών στροφών. Για κεντρικούς συνδέσμους δυσκαμψίας, οι ανελαστικές παραμορφώσεις εμφανίζονται στα μέλη των συνδέσμων, οπότε οι απαιτήσεις μπορούν να εκφραστούν σε όρους αξονικής παραμόρφωσης των μελών. Σε έκκεντρους συνδέσμους δυσκαμψίας, οι απαιτήσεις παραμόρφωσης εκφράζονται σε όρους στροφής της δοκού σύζευξης. Στον Πίνακα 4.1 συνοψίζονται τα κυριότερα δομικά συστήματα αντισεισμικών μεταλλικών κατασκευών, οι ζώνες απορρόφησης ενέργειας του καθενός και οι απαιτήσεις παραμόρφωσης ανάλογα με τον τύπο του συστήματος. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, τα κτίρια που εξετάζονται αποτελούνται από πλαίσια ροπής με συγκολλητή σύνδεση μεταξύ δοκών και υποστυλωμάτων. Για το λόγο αυτό στη συνέχεια γίνεται μια εκτενέστερη αναφορά στα βασικά χαρακτηριστικά των πλαισίων ροπής ως συστήματα απορρόφησης ενέργειας.

Πίνακας 4.1: Απορρόφηση ενέργειας στα κυριότερα δομικά συστήματα μεταλλικών αντισεισμικών κατασκευών

Δομικό σύστημα	Πλαίσια ροπής	Κεντρικοί σύνδεσμοι δυσκαμψίας	Έκκεντροι σύνδεσμοι δυσκαμψίας	Συνδέσεις INERD [54]
Ζώνες απορρόφησης ενέργειας	Δοκοί	Σύνδεσμοι	Δοκοί σύζευξης	Σύνδεση πείρου
Απαιτήσεις παραμόρφωσης	Στροφή κόμβου	Αξονική παραμόρφωση συνδέσμου	Στροφή δοκού σύζευξης	Αξονική παραμόρφωση πείρου

4.2.2 Πλαίσια ροπής (Moment Resisting Frames)

Η βασική διάταξη των πλαισίων ροπής φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Αποτελούνται από δοκούς οι οποίες συνδέονται μέσω άκαμπτων συνδέσεων με τα υποστυλώματα και οι οποίες μπορούν να παραλάβουν ροπές. Ο λόγος της απαίτησης των συνδέσεων να παραλαμβάνουν ροπές οφείλεται στο γεγονός ότι καθώς τα πλαίσια ροπής λειτουργούν μέσω κάμψης των δοκών και των υποστυλωμάτων, οι συνδέσεις πρέπει να είναι ικανές να μπορούν να μεταβιβάσουν με ασφάλεια τις δημιουργηθείσες ροπές από τις δοκούς των πλαισίων στα αντίστοιχα υποστυλώματα. Τα πλαίσια ροπής είναι συνήθως εύκαμπτα, γι αυτό και σημαντικό ρόλο στην αντισεισμική μελέτη τους παίζουν οι οριζόντιες μετατοπίσεις των ορόφων.

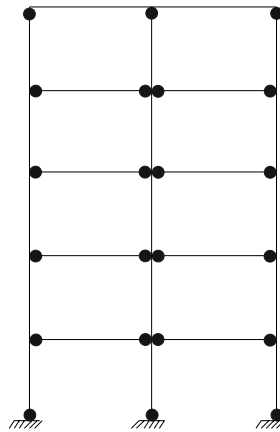


Σχήμα 4.1: Γεωμετρία πλαισίων ροπής

Τα πλαίσια ροής διακρίνονται σε χωρικά και σε περιμετρικά ανάλογα με τους κόμβους που συμμετέχουν στην πλαισιακή λειτουργία. Στα χωρικά πλαίσια η πλαισιακή λειτουργία υπάρχει σε όλους τους κόμβους της κατασκευής με αποτέλεσμα να χρειάζεται η διαμόρφωση κόμβων ροπής και στους δύο κύριους άξονες των υποστυλωμάτων, ώστε να υπάρχει μεγάλη δυνατότητα ανακατανομής των πλευρικών δυνάμεων στους κόμβους. Αντίθετα, στα περιμετρικά πλαίσια η πλαισιακή λειτουργία δημιουργείται μόνο στην περίμετρο της κατασκευής. Επομένως, συνδέσεις ροπής χρειάζονται αποκλειστικά στα περιμετρικά υποστυλώματα και μόνο στον ένα κύριο άξονά τους, εκτός από τα γωνιακά υποστυλώματα στα οποία οι συνδέσεις ροπής διαμορφώνονται και στους δύο κύριους άξονες. Οι υπόλοιπες συνδέσεις στο εσωτερικό του κτιρίου διαμορφώνονται ως απλές συνδέσεις τέμνουσας.

Η απορρόφηση ενέργειας των πλαισίων ροπής επιτυγχάνεται μέσω σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων σε συγκεκριμένες θέσεις της κατασκευής. Ο ικανοτικός σχεδιασμός αποσκοπεί στη

δημιουργία ενός μηχανισμού αστοχίας ο οποίος περιλαμβάνει το σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων στις δοκούς, με τα υποστυλώματα να παραμένουν στην ελαστική περιοχή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται φαινόμενα ολικής ή μερικής κατάρρευσης της κατασκευής εξαιτίας πλαστικοποίησης και πιθανής αστοχίας ενός ή περισσότερων υποστυλωμάτων. Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται η επιθυμητή διάταξη δημιουργίας πλαστικών αρθρώσεων στην οποία αποφεύγεται η πλαστικοποίηση των υποστυλωμάτων. Με την επίτευξη ενός επιθυμητού μηχανισμού αστοχίας μέσω χρήσης του ικανοτικού σχεδιασμού γίνεται εφικτή η αποφυγή ανεπιθύμητων φαινομένων όπως είναι ο σχηματισμός μαλακού ορόφου. Με την αποφυγή δημιουργίας πλαστικών αρθρώσεων στα υποστυλώματα επιτυγχάνεται επίσης ο περιορισμός μεγάλων παραμενουσών παραμορφώσεων μετά από σεισμικές δράσεις, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν τελικά σε κατάρρευση της κατασκευής.



Σχήμα 4.2: Θέσεις σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων πλαισίου ροπής

Η συμπεριφορά των μεταλλικών κατασκευών κατά το σεισμό του Northridge υπήρξε ικανοποιητική υπό την έννοια ότι δεν υπήρξαν καταρρεύσεις ενώ τα κτίρια συμπεριφέρθηκαν σύμφωνα με την στάθμη επιτελεστικότητας για την οποία είχαν σχεδιαστεί. Παρά όμως την εν γένει ικανοποιητική τους συμπεριφορά μια πιο προσεκτική εξέταση των κατασκευών αποκάλυψε σημαντικές βλάβες κυρίως στα σημεία των συγκολλήσεων των κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3. Οι δοκοί των κόμβων επέδειξαν υπεραντοχή η οποία οδήγησε στη φόρτιση της σύνδεσης με το σύνολο της σεισμικής δύναμης και την τελική αστοχία της.



Σχήμα 4.3: Ψαθυρής μορφής αστοχίες από το σεισμό του Northridge σε πλαίσια ροπής στη συγκόλληση δοκού-υποστυλώματος (αριστερά) και στο πέλμα του υποστυλώματος (δεξιά) [13]

Βλάβες αντίστοιχης μορφής παρατηρήθηκαν κατά το σεισμό του Hanshin στο Kobe της Ιαπωνίας (1995). Οι αστοχίες των συνδέσεων εντοπίστηκαν και σε αυτή την περίπτωση στις συγκολλήσεις μεταξύ δοκών και υποστυλωμάτων. Τα σεισμικά γεγονότα οδήγησαν σε μια σειρά ερευνών οι οποίες είχαν σαν βασική επιδίωξη τη βελτίωση της πρόβλεψης του μηχανισμού αστοχίας και επομένως τη βελτίωση της αντισεισμικής συμπεριφοράς των πλαισίων ροπής, μέσω διατύπωσης κατάλληλων οδηγιών στους κανονισμούς τόσο σε ότι αφορά τη μελέτη όσο και την ανέγερση των πλαισίων ροπής και ιδιαίτερα των συνδέσεων δοκών-υποστυλωμάτων.

Οι πιο διαδεδομένες μορφές ενίσχυσης των συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος περιγράφηκαν στην §1.3.4 και έχουν ως κύριο στόχο την ανακούφιση της συγκόλλησης από τις μεγάλες παραμορφώσεις εξαιτίας του σχηματισμού της πλαστικής άρθρωσης. Επιγραμματικά τα μέτρα που χρησιμοποιήθηκαν για την ενίσχυση των συνδέσεων ήταν η χρήση ενισχυμένων διατομών δοκών (haunched beam) στην περιοχή της σύνδεσης, η δημιουργία δοκών απομειωμένης διατομής (dog-bone) [24]-[26], η βελτίωση της ποιότητας των συγκολλήσεων μέσω χρήσης καταλληλότερων ηλεκτροδίων και του τρόπου διενέργειας της ίδιας της συγκόλλησης, η χρήση κοχλιώσεων για τη σύνδεση δοκών-υποστυλωμάτων καθώς και η πραγματοποίηση των συγκολλήσεων σε εργοστασιακό περιβάλλον υπό ελεγχόμενες συνθήκες και πιστοποιημένους συγκολλητές.

Η αναποτελεσματικότητα αυτή στην πρόβλεψη του μηχανισμού αστοχίας των πλαισίων ροπής κατά τους σεισμούς του Northridge και του Kobe, οδήγησε στην ανάγκη εύρεσης μιας μεθόδου η οποία θα μπορεί να προβλέπει πιθανές ρηγματώσεις σε σημεία της κατασκευής τα οποία έχουν παραλάβει μεγάλες παραμορφώσεις και ιδιαίτερα στην περιοχή των συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος, η κρισιμότητα της οποίας οφείλεται στα σημαντικά κατακόρυφα φορτία που καλείται να παραλάβει. Η παρούσα εργασία προσπαθεί να περιγράψει μια μεθοδολογία η οποία θα μπορεί με ένα τεκμηριωμένο τρόπο να προβλέψει τη θέση μιας πιθανής ρηγματώσεως σε συγκολλητές συνδέσεις πλαισίων ροπής. Με τον τρόπο αυτό γίνεται εφικτός ο προσδιορισμός των θέσεων που μπορεί να εμφανιστεί μια πιθανή ρηγματώση καθώς και η κρισιμότητα αυτής ως προς τη φέρουσα ικανότητα της σύνδεσης.

4.3 Αναλύσεις μεταλλικών φορέων με πλαίσια ροπής

Η σχετική μετατόπιση των ορόφων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης των απαιτήσεων σε όρους παραμορφώσεων του συνολικού μεταλλικού φορέα. Οι τιμές των μετατοπίσεων μπορεί να διαφέρουν, εξαρτώμενες από την εκάστοτε χρησιμοποιούμενη τυπολογία συστημάτων απορρόφησης ενέργειας κάθε φορέα. Σε πλαίσια ροπής, όπου η ανελαστική δράση αναμένεται επί το πλείστον συγκεντρωμένη στα άκρα των δοκών, η καθολική παραμόρφωση μπορεί να οριοθετηθεί μέσω των στροφών στις θέσεις αυτές. Σκοπός της ανάλυσης είναι, όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο υπολογισμός των απαιτήσεων σε όρους παραμορφώσεων του φέροντος οργανισμού των κτιρίων υπό σεισμικές καταπονήσεις. Οι απαιτήσεις επηρεάζονται τόσο από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, όσο και από αυτά της σεισμικής δράσης. Για το σκοπό αυτό κατά την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν πραγματικές καταγραφές τόσο ελληνικών όσο και διεθνών σεισμών. Το στατικό σύστημα των κτιρίων που μελετήθηκε αποτελείτο από χωρικά πλαίσια ροπής με δοκούς διατομής IPE και HEA και υποστυλώματα διατομής HEM μιας και αυτές ήταν οι διατομές από τις οποίες είχε προαποφασισθεί να κατασκευαστούν οι κόμβοι δοκού-υποστυλώματος για τις πειραματικές διερευνήσεις που θα παρουσιαστούν σε επόμενο κεφάλαιο (δεύτερο στάδιο ανάλυσης). Ο μεγάλος αριθμός διαφορετικών σεισμικών χρονοϊστοριών και κτιριακών διατάξεων επιχειρεί να προσδώσει την όσο το δυνατόν καλύτερη αντιπροσώπευση της αναμενόμενης συμπεριφοράς των πλαισίων ροπής και των συνδέσεών τους υπό σεισμικές διεγέρσεις.

4.3.1 Διαδικασία ανάλυσης

Με σκοπό την οριοθέτηση των απαιτήσεων σε όρους παραμορφώσεων, εξετάστηκε πλήθος κτιρίων διαφορετικής τυπολογίας. Τα κτίρια επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε οι φέροντες οργανισμοί τους να αποτελούν αντιπροσωπευτικό δείγμα της σύγχρονης Ευρωπαϊκής πρακτικής. Έτσι επιλέχθηκαν οκτώ κτίρια με διαφορετικό αριθμό ανοιγμάτων σε κάθε μια από τις δύο κύριες διευθύνσεις και με ύψος από τρεις έως οκτώ ορόφους όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.2. Στον Πίνακα αυτό περιγράφεται ο αριθμός των ανοιγμάτων και των ορόφων καθώς και η περίοδος του δισδιάστατου και του τρισδιάστατου αριθμητικού μοντέλου.

Πίνακας 4.2: Τυπολογία κτιρίων που εξετάστηκαν

Κτίριο	Αριθμός ορόφων	Αριθμός ανοιγμάτων (x)	Αριθμός ανοιγμάτων (y)	Δισδιάστατο προσομοίωμα	T ₁ [sec] 3D	T ₁ [sec] 2D
1	3	3	4	3x3	0,731	0,728
2	4	4	2	4x4	1,325	1,377
3	4	3	4	3x4	0,801	0,816
4	4	3	4	3x4	0,676	0,669
5	4	3	4	3x4	0,722	0,721
6	4	1	12	12x4	1,127	1,109
7	8	3	4	3x8	1,448	1,488
8	8	2	4	4x8	2,101	2,027

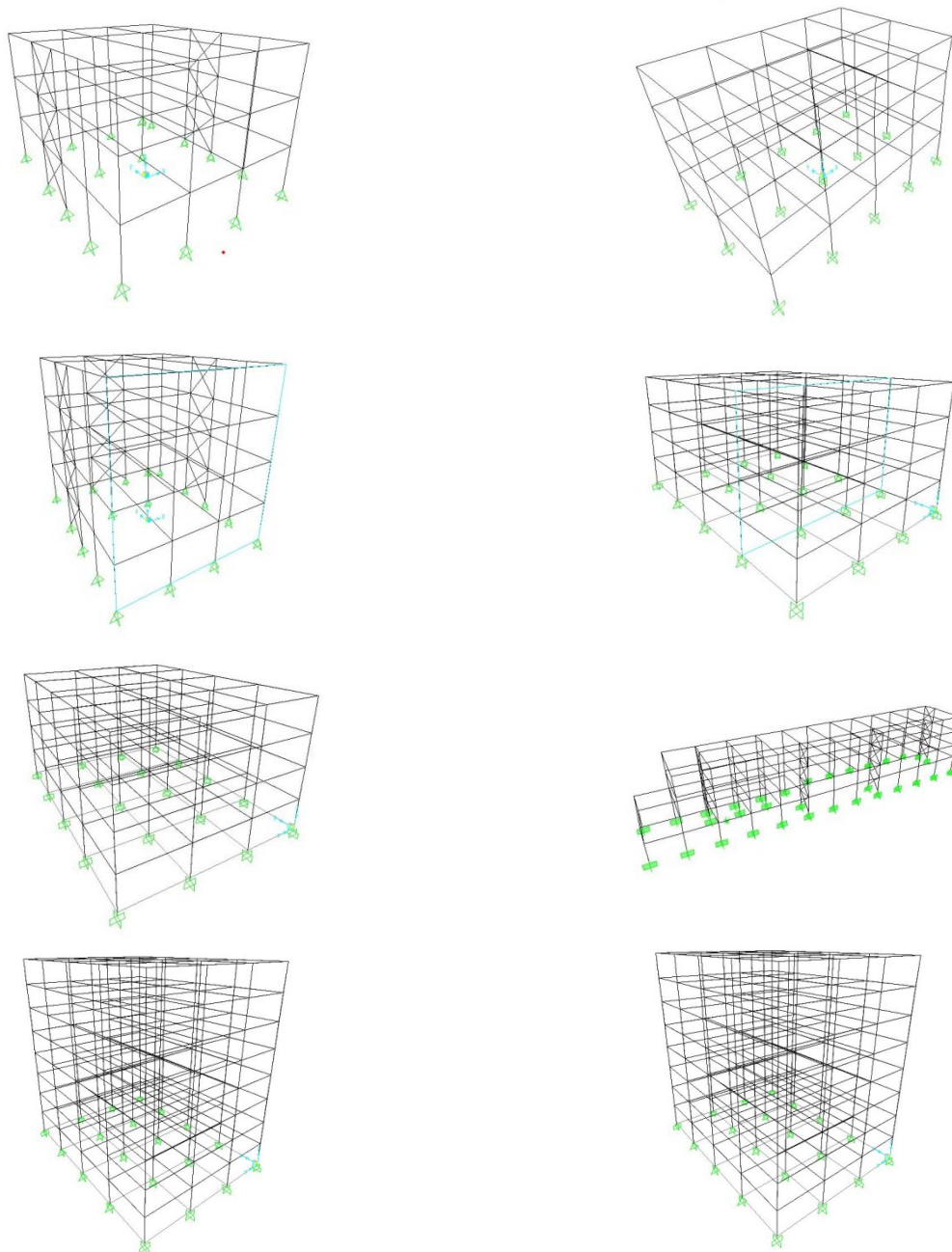
Ο σχεδιασμός των κτιρίων πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ορίζονται στον EN1993 [34] και EN1998 [43]. Για το σκοπό αυτό κάθε φορέας αποτυπώθηκε μέσω ενός τρισδιάστατου χωρικού προσομοιώματος το οποίο επέτρεψε τη διαστασιολόγηση των κτιρίων μέσω στατικής και δυναμικής ιδιομορφικής ανάλυσης. Στη συνέχεια ο υπολογισμός των απαιτήσεων σε όρους παραμορφώσεων έγινε μέσω μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης στα επίπεδα πλαίσια που συνθέτουν το χωρικό προσομοίωμα. Η πολύ μικρή διαφορά των ιδιοπεριοδών μεταξύ του τρισδιάστατου και δισδιάστατου μοντέλου κάνει εφικτή τη χρήση των επίπεδων πλαισίων του δισδιάστατου μοντέλου για τον υπολογισμό των στρωφικών απαιτήσεων των κόμβων ροπής.

4.3.2 Τρισδιάστατη ανάλυση

Ο αντισεισμικός σχεδιασμός έγινε μέσω φασματικής ιδιομορφικής ανάλυσης με χρήση του ελαστικού φάσματος εδαφικών επιταχύνσεων του EN1998 [43]. Με σκοπό την αποφυγή πολύπλοκων μη γραμμικών αναλύσεων, κατά τη φάση του σχεδιασμού, έγινε ελαστική ανάλυση και η ικανότητα των φορέων για ανελαστική απορρόφηση ενέργειας λήφθηκε υπόψη μέσω του συντελεστή συμπεριφοράς q . Το πρόγραμμα ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκε είναι το SAP2000 9.0.3. Οι βασικές παράμετροι σχεδιασμού είναι οι ακόλουθες:

- Μόνιμα φορτία (εκτός του ίδιου βάρους) $G = 2 \text{ kN/m}^2$
- Κινητά φορτία $Q = 5 \text{ kN/m}^2$
- Συντελεστής συνδυασμού μεταβλητών δράσεων $\Psi_{Ei} = 0,3$
- Φασματική επιτάχυνση $0,24g$
- Κατηγορία εδάφους B
- Συντελεστής συμπεριφοράς πλαισίων ροπής $q=6$
- Συντελεστής σπουδαιότητας $\gamma_I = 1.0$
- Συντελεστής απόσβεσης 4%

Το Σχήμα 4.4 απεικονίζει τα τρισδιάστατα μοντέλα των οκτώ κτιρίων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την ανάλυση.



Σχήμα 4.4: Τρισδιάστατα προσομοιώματα των 8 κτιρίων της μελέτης

Ο σχεδιασμός του κάθε φορέα έγινε με βάση τις απαιτήσεις των κανονισμών τόσο σε ότι αφορά τα φαινόμενα δευτέρας τάξεως όσο και τους περιορισμούς βλαβών λόγω σχετικών μετατοπίσεων των ορόφων, οι οποίες περιορίστηκαν στο 0,75% όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.3. Ο περιορισμός αυτός έχει σκοπό την αποφυγή βλαβών σε μη φέροντα στοιχεία της κατασκευής για την περίπτωση συχνών σεισμικών φαινομένων. Κατά τη διαστασιολόγηση των μελών πραγματοποιήθηκε ικανοτικός έλεγχος κόμβων. Οι έλεγχοι έγιναν με βάση τον EN1993 [34]. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας ήταν ο σχεδιασμός ενός αντιπροσωπευτικού κτιρίου σε σειсмоγενή περιοχή με βάση τους ισχύοντες κανονισμούς.

Πίνακας 4.3: Διατάξεις EN1998 για την ανάλυση και το σχεδιασμό κτιρίων

Εκκεντρότητες μαζών	$e = \pm 0,005L_i$
Φαινόμενα δευτέρας τάξεως	$\theta = \frac{P_{tot} \cdot d_r}{V_{tot} \cdot h}$
Περιορισμός σχετικών μετακινήσεων ορόφων	$d_r, v \leq 0,0075h$

Στους Πίνακες 4.4 και 4.5 φαίνονται οι τυπικοί έλεγχοι που διενεργούνται σε ένα από τα κτίρια της ανάλυσης σε ότι αφορά τους ελέγχους των φαινομένων δευτέρας τάξεως και τις μέγιστες σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ των ορόφων αντίστοιχα. Στην περίπτωση που οι έλεγχοι δεν ήταν επαρκείς τα κτίρια επανασχεδιάζονταν με κυρίαρχη λογική οι διατομές των δοκών και των υποστλωμάτων να αποτελούν τις ίδιες με αυτές που θα χρησιμοποιηθούν κατά την πειραματική διερεύνηση των κόμβων.

Πίνακας 4.4: Τυπικοί έλεγχοι φαινομένων δευτέρας τάξεως για ένα από τα κτίρια

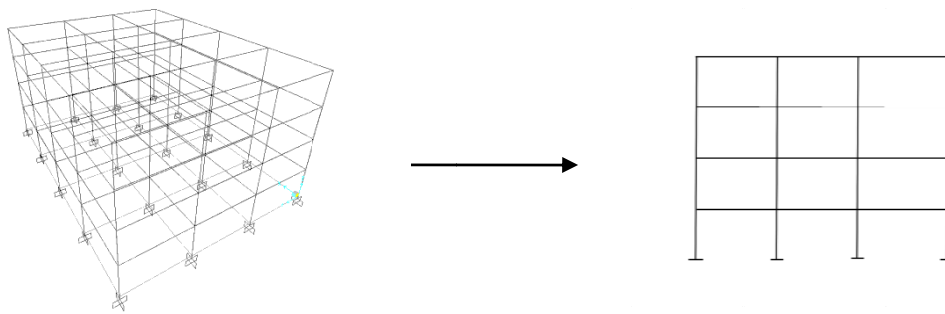
Όροφος	P_{tot} [kN]	$d_{r(x)}$	$d_{r(y)}$	$V_{tot(x)}$ [kN]	$V_{tot(y)}$ [kN]	H [m]	$\theta_{(x)}$	$\theta_{(y)}$
Ισόγειο	6146,73	0,0336	0,0168	857,54	906,58	3,0	0,08028	0,03796
1 ^{ος}	4646,05	0,063	0,0272	648,17	685,24	3,0	0,12424	0,06147
2 ^{ος}	3146,05	0,0488	0,0228	438,91	464,01	3,0	0,11659	0,05152
3 ^{ος}	1706,43	0,00376	0,0014	238,04	251,68	3,0	0,00898	0,00316

Πίνακας 4.5: Τυπικοί έλεγχοι σχετικών μετακινήσεων των ορόφων για ένα από τα κτίρια

Όροφος	H [m]	$d_r, v(x) / H$	$d_r, v(y) / H$
Ισόγειο	3,0	0,00448	0,00224
1 ^{ος}	3,0	0,006933	0,003627
2 ^{ος}	3,0	0,006507	0,00304
3 ^{ος}	3,0	0,005013	0,001867

4.3.3 Δισδιάστατη μη γραμμική ανάλυση

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο σκοπός των αναλύσεων που ακολουθούν είναι να καθοριστεί η χρονοϊστορία των απαιτήσεων πλαστιμότητας σε όρους παραμορφώσεων σε μεταλλικά πλαίσια ροπής τα οποία ανήκουν σε κτίρια, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα στην πειραματική και αναλυτική διερεύνηση συγκολλητών κόμβων δοκών-υποστλωμάτων που θα ακολουθήσει κατά το δεύτερο και τρίτο στάδιο της διαδικασίας που περιγράφηκε προηγουμένως. Για το λόγο αυτό η συμπεριφορά των επιλεχθέντων δομημάτων μελετήθηκε μέσω μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης σε δισδιάστατα μοντέλα των αντίστοιχων κτιρίων όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5. Ο λόγος για αυτή τη μετατροπή ήταν η ανάγκη καταγραφής της χρονοϊστορίας των πλαστικών στροφών των κόμβων του κάθε κτιρίου, εφαρμογή την οποία δεν παρείχε το πρόγραμμα ανάλυσης των τρισδιάστατων μοντέλων. Για τις αναλύσεις αυτές χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα DRAIN 2D.

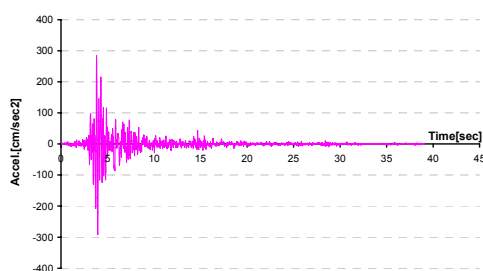


Σχήμα 4.5: Δισδιάστατο προσομοίωμα κτιρίου της μελέτης

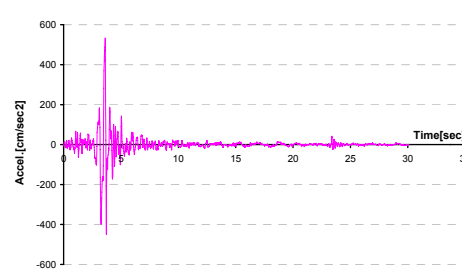
Με σκοπό τη διεξαγωγή συμπερασμάτων από ευρύ φάσμα σεισμικών καταγραφών, κάθε κτίριο αναλύθηκε με δέκα (10) διαφορετικά επιταχυνσιογραφήματα Ευρωπαϊκών και διεθνών σεισμών όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.6. Στο Σχήμα 4.6 φαίνονται τα επιταχυνσιογραφήματα των τεσσάρων ελληνικών σεισμικών καταγραφών που χρησιμοποιήθηκαν, ενώ στο Σχήμα 4.7 φαίνονται τα επιταχυνσιογραφήματα των υπολοίπων έξι διεθνών σεισμικών γεγονότων της μελέτης.

Πίνακας 4.6: Τύποι και χαρακτηριστικά σεισμικών καταγραφών

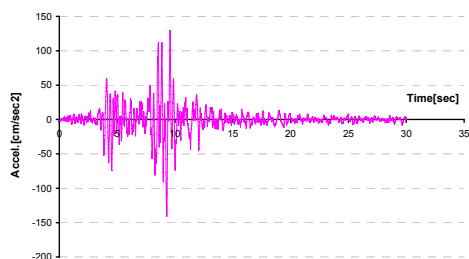
Τύπος	Θέση	PGA[g]
Ελληνικοί	Θεσσαλονίκη (1978)	0,144
	Καλαμάτα (1985)	0,294
	Αίγιο (1995)	0,543
	Αθήνα (1999)	0,298
Ευρωπαϊκοί	Vrancea Romania (1977)	0,198
	Turkey (1999)	0,325
Διεθνείς	El. Centro	0,355
	Northridge USA (1994)	0,589
	Kobe Japan (1995)	0,833
	Taiwan (1999)	0,977



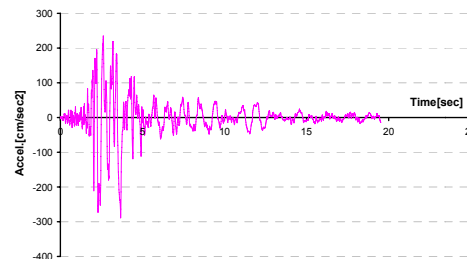
Αθήνα 1999



Αίγιο 1995

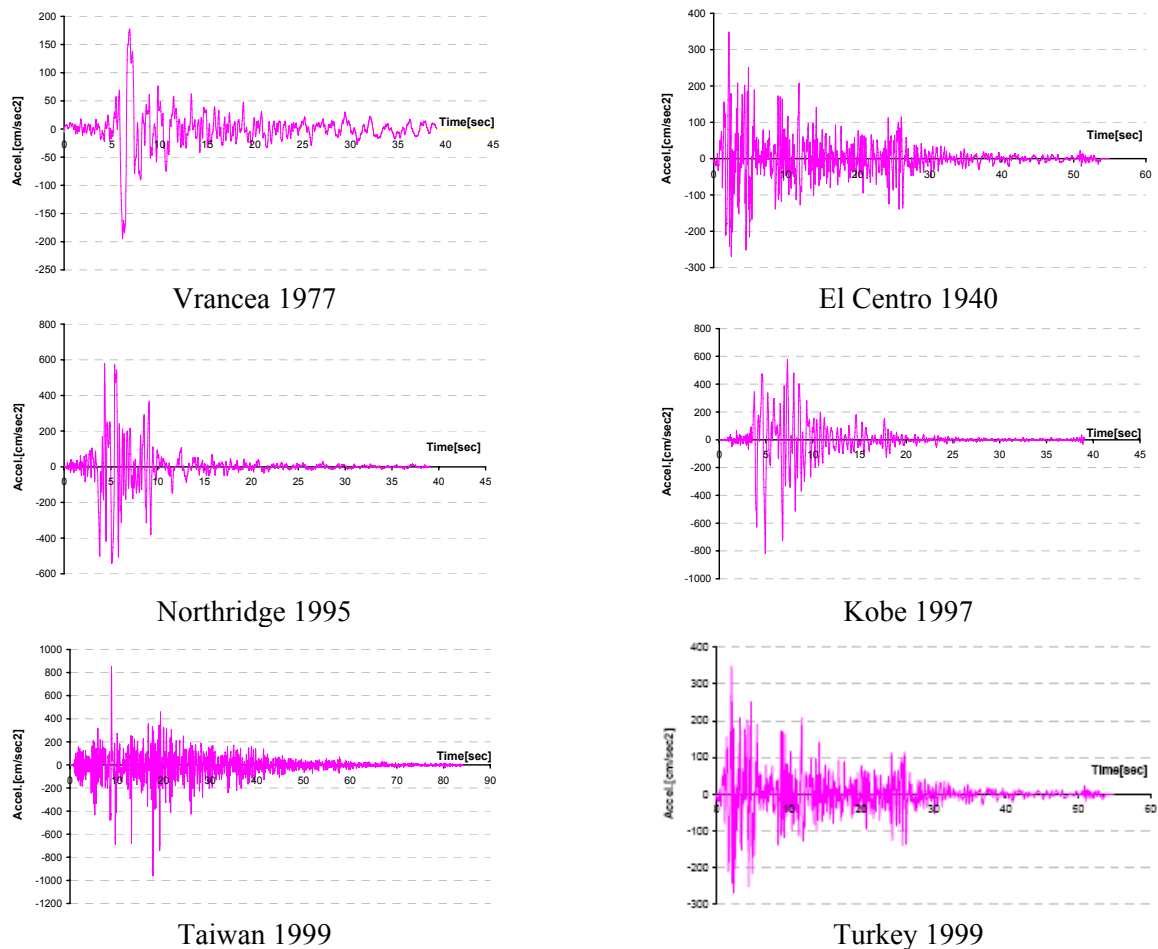


Θεσσαλονίκη 1978



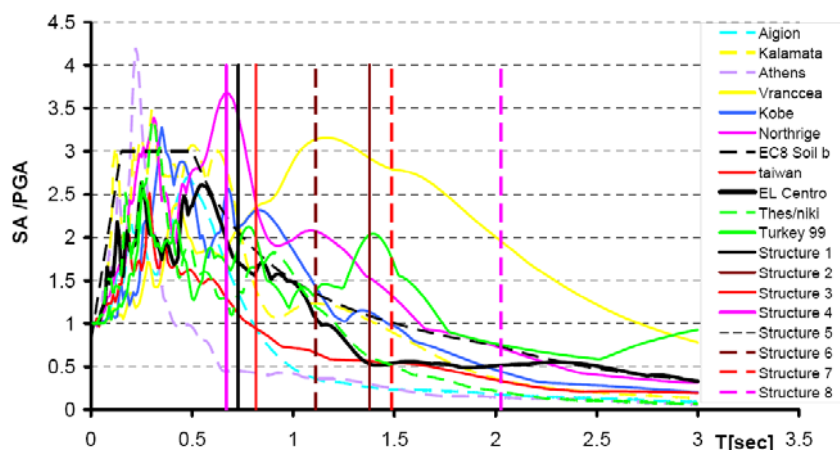
Καλαμάτα 1985

Σχήμα 4.6: Επιταχυνσιογραφήματα ελληνικών σεισμικών καταγραφών της εργασίας



Σχήμα 4.7: Επιταχυνσιογραφήματα διεθνών σεισμικών καταγραφών της εργασίας

Στο Σχήμα 4.8 φαίνονται τα φάσματα επιταχύνσεων των επιλεχθέντων επιταχυνσιογραφήματων, το φάσμα σχεδιασμού του κανονισμού για έδαφος κατηγορίας B και η τιμή της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου των εξετασθέντων κτιρίων. Είναι σαφές ότι τόσο τα χαρακτηριστικά των σεισμικών καταγραφών όσο και αυτά των κτιρίων καλύπτουν ένα ευρύ πεδίο σεισμικών μεγεθών και αποκρίσεων από αντιπροσωπευτικές μεταλλικές κατασκευές που έχουν σχεδιαστεί με βάση τον EN1993 [34] και EN 1998 [43].



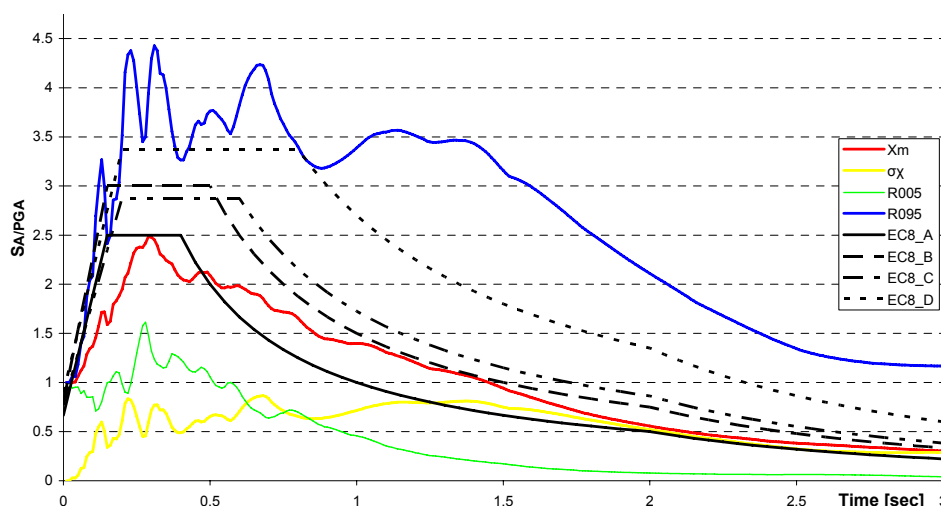
Σχήμα 4.8: Φάσματα επιταχύνσεων των σεισμικών καταγραφών σε αντιπαράθεση με το φάσμα σχεδιασμού για έδαφος τύπου B

Στο Σχήμα 4.9 φαίνονται η μέση τιμή και τα ποσοστημόρια 5% και 95% των φασμάτων επιτάχυνσης σε αντιπαράθεση με τα φάσματα σχεδιασμού του κανονισμού για διάφορες κατηγορίες εδάφους. Οι εξισώσεις (4.1) και (4.2) χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της μέσης τιμής και των ποσοστημόριων 5% και 95% αντίστοιχα.

$$X_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.1)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2} \quad (4.2)$$

Από το Σχήμα 4.9 συμπεραίνουμε ότι η μέση τιμή των φασμάτων επιτάχυνσης των σεισμών που μελετήθηκαν είναι όμοια με αυτή του EN1998 [43] για τύπο εδάφους A και B ανάλογα με την ιδιοπερίοδο της κατασκευής. Για τα κτίρια της μελέτης η μέση τιμή του φάσματος αντιστοιχεί με εκείνη της εδαφικής κατηγορίας B του κανονισμού.

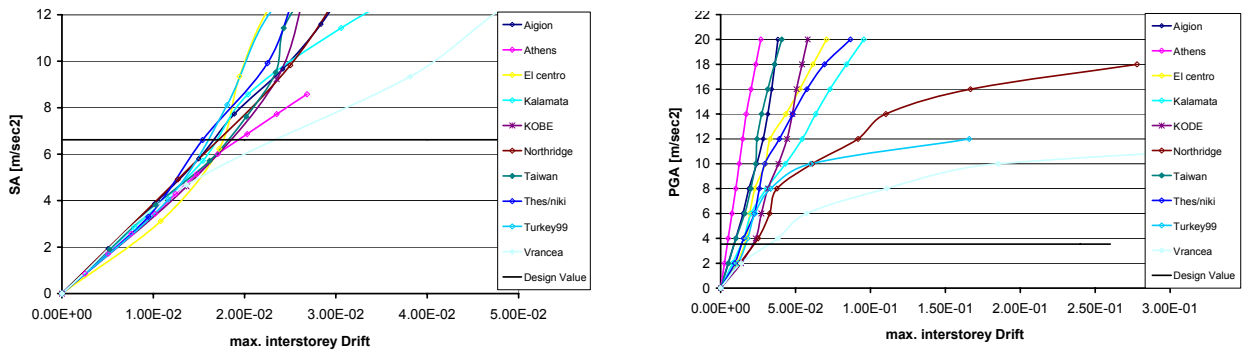


Σχήμα 4.9: Μέση τιμή των φασμάτων επιταχύνσεων των δέκα σεισμικών καταγραφών σε αντιπαράθεση με τα φάσματα σχεδιασμού για διάφορες κατηγορίες εδάφους του EN1998

Η μη γραμμική απόκριση των φορέων εξετάστηκε παραμετρικά μέσω επαυξητικής δυναμικής ανάλυσης (incremental dynamic analysis IDA) η οποία αποτελεί μία ιδιαίτερος χρήσιμη μέθοδο αφού μας δίνει τη δυνατότητα να εκτιμήσουμε με ικανοποιητική ακρίβεια τη συμπεριφορά του κτιρίου για μεγάλο εύρος επιταχύνσεων και να εκτιμήσουμε τη δυναμική του απόκριση [78]. Η επαυξητική δυναμική ανάλυση αποτελείται από μια σειρά μη γραμμικών δυναμικών αναλύσεων κλιμακούμενης έντασης. Κάθε ανάλυση χαρακτηρίζεται από δύο παραμέτρους, με την πρώτη να αφορά την ένταση του σεισμικού γεγονότος και τη δεύτερη τις απαιτήσεις από πλευράς κατασκευής. Ως μέγεθος προς παρατήρηση των απαιτήσεων παραμόρφωσης της κατασκευής επιλέχθηκε η μέγιστη σχετική μετατόπιση των ορόφων.

Οι αναλύσεις έγιναν για δύο διαφορετικές μεθόδους κλιμάκωσης των επιταχυνσιογραφημάτων. Στην πρώτη μέθοδο έγινε κλιμάκωση με βάση τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση ($PGA=0,24g$), ενώ στη δεύτερη έγινε κλιμάκωση με βάση τη φασματική επιτάχυνση (SA) που αντιστοιχεί στη θεμελιώδη ιδιοπερίοδο κάθε κτιρίου. Χαρακτηριστικά αποτελέσματα της επαυξητικής δυναμικής ανάλυσης για ένα από τα κτίρια της μελέτης για τους δύο διαφορετικούς τρόπους κλιμάκωσης

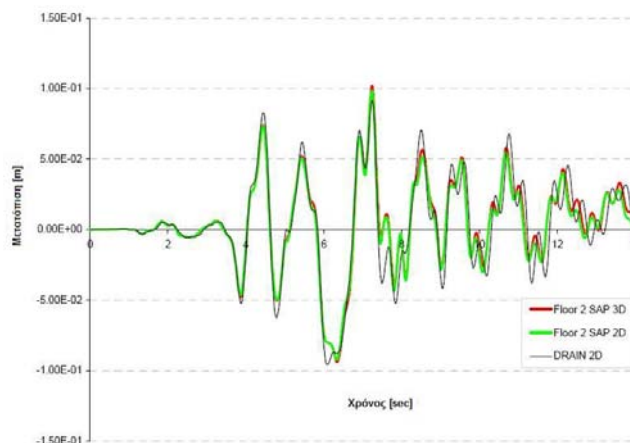
φαίνονται στο Σχήμα 4.10. Οι οριζόντιες γραμμές των σχημάτων αντιστοιχούν στις τιμές φασματικής και εδαφικής επιτάχυνσης σχεδιασμού.



Σχήμα 4.10: Κλιμάκωση με βάση την αντίστοιχη φασματική επιτάχυνση (SA) (αριστερά) και με βάση την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA) (δεξιά)

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα της επαυξητικής δυναμικής ανάλυσης είναι ότι η διασπορά είναι μικρότερη όταν η κλιμάκωση πραγματοποιείται με βάση τη φασματική επιτάχυνση κάθε κτιρίου παρά όταν πραγματοποιείται κλιμάκωση με βάση τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση. Για το λόγο αυτό η κλιμάκωση των επιταχυνσιογραφημάτων επιλέχθηκε να γίνει στην τιμή της φασματικής επιτάχυνσης κάθε κτιρίου. Σημειώνεται ότι οι τιμές κάθε καμπύλης της επαυξητικής δυναμικής μεθόδου προέρχονται από είκοσι (20) αναλύσεις με διαφορετικό συντελεστή κλιμάκωσης κάθε μίας από αυτές. Ο συνολικός αριθμός αναλύσεων συνεπώς είναι 8 (κτίρια) \times 10 (επιταχυνσιογραφήματα) \times ~ 20 (στάδια κλιμάκωσης) ≈ 1600 . Για καθαρά υπολογιστικούς λόγους η μη γραμμική ανάλυση επιλέχθηκε να γίνει στα επίπεδα πλαίσια που συνθέτουν κάθε κτίριο με βάση το πρόγραμμα που DRAIN 2D.

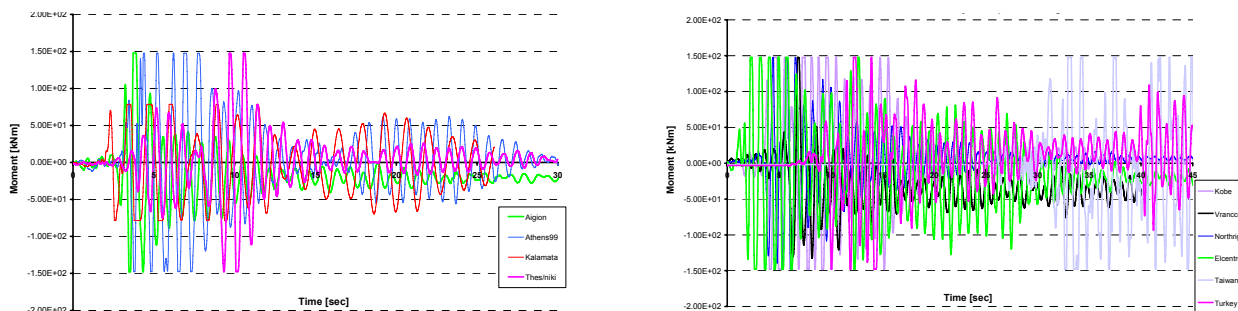
Προκειμένου να ελεγχθεί κατά πόσον τα αποτελέσματα των δισδιάστατων αναλύσεων αναπαριστούν με ακρίβεια την καθολική συμπεριφορά του φορέα, πραγματοποιήθηκε μια σειρά αναλύσεων τόσο σε δισδιάστατα όσο και σε τρισδιάστατα μοντέλα με τη χρήση διαφορετικών προγραμμάτων. Στο Σχήμα 4.11 φαίνονται τα συγκριτικά αποτελέσματα από αυτές τις αναλύσεις. Είναι εμφανές ότι το δισδιάστατο μοντέλο αναπαριστά με επάρκεια τη μη γραμμική συμπεριφορά του φορέα συγκρινόμενο με τα αποτελέσματα της τρισδιάστατης ανάλυσης. Η παρατήρηση αυτή ήταν έγκυρη όταν οι θεμελιώδεις ιδιοπερίοδοι των δισδιάστατων και τρισδιάστατων μοντέλων ήταν παρόμοιες, γεγονός που ισχύει στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, όπως φάνηκε στον Πίνακα 4.2.



Σχήμα 4.11: Αποτελέσματα μη γραμμικών δυναμικών αναλύσεων σε τρισδιάστατα και δισδιάστατα μοντέλα με χρησιμοποίηση διαφορετικών προγραμμάτων

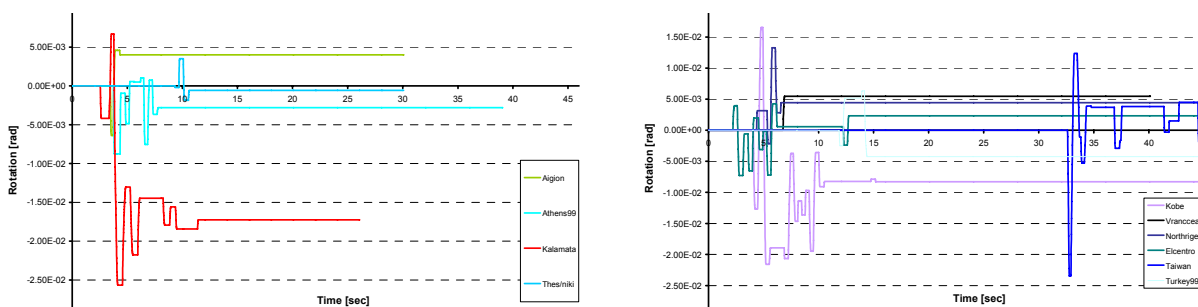
4.3.4 Χρονοϊστορίες φορτίσεων-Απαιτήσεις σε όρους παραμορφώσεων

Από τα αποτελέσματα της μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης προέκυψε η χρονοϊστορία των εντατικών μεγεθών και των παραμορφώσεων των κτιρίων για κάθε μια από τις δέκα επιλεγθείσες σεισμικές καταγραφές [79]. Το Σχήμα 4.12 παρουσιάζει αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα για την χρονοϊστορία των ροπών στη θέση της πλαστικής άρθρωσης ενός από τα κτίρια της εργασίας για ελληνικούς και διεθνείς σεισμούς αντίστοιχα.



Σχήμα 4.12: Χρονοϊστορία καμπτικών ροπών για Ελληνικούς (αριστερά) και διεθνείς (δεξιά) σεισμούς

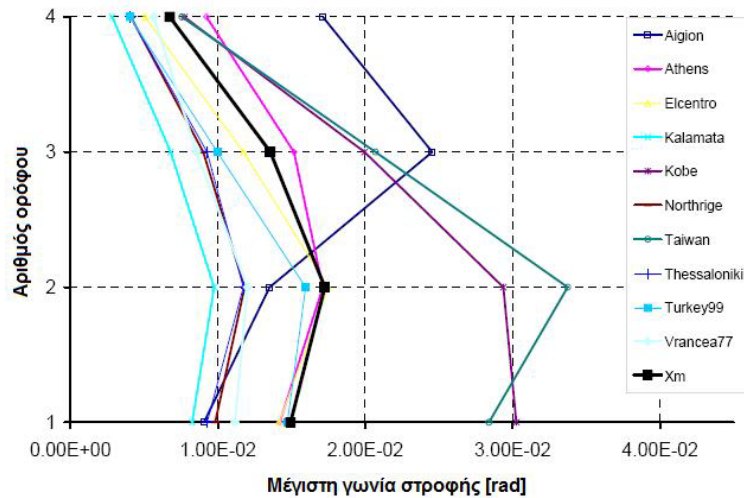
Στο Σχήμα 4.13 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα της χρονοϊστορίας των στροφών στη θέση της πλαστικής άρθρωσης του κτιρίου που ήδη παρουσιάστηκε στο Σχήμα 4.12. Από τα σχήματα αυτά φαίνεται ότι οι ροπές στις πλαστικές αρθρώσεις φτάνουν μια μέγιστη τιμή ίση με την πλαστική ροπή των δοκών στην εν λόγω σύνδεση. Μετά τη μέγιστη αυτή τιμή ξεκινούν οι πλαστικές στροφές στην σύνδεση. Παρατηρείται ότι οι εναλλαγές των ροπών είναι περισσότερες από τις αντίστοιχες των πλαστικών στροφών, γεγονός που οφείλεται στο ότι η ανελαστική συμπεριφορά και επομένως οι πλαστικές στροφές αναπτύσσονται κυρίως στο διάστημα της έντονης σεισμικής διέγερσης.



Σχήμα 4.13: Χρονοϊστορία πλαστικών στροφών για Ελληνικούς (αριστερά) και διεθνείς (δεξιά) σεισμούς.

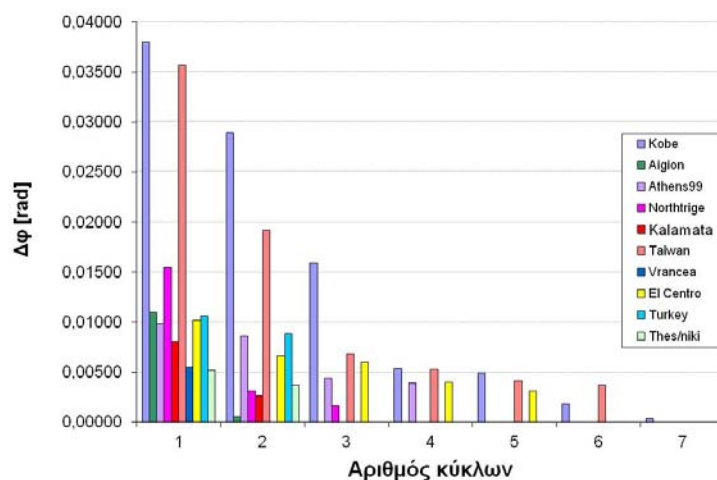
Στο Σχήμα 4.14 φαίνονται οι σχετικές μετατοπίσεις των ορόφων οι οποίες δίνουν πληροφορίες σχετικά με την ολική συμπεριφορά ενός κτιρίου έναντι μιας σεισμικής διέγερσης. Πιο αναλυτικά βλέπουμε ότι για το συγκεκριμένο τετραώροφο κτίριο του παραδείγματος οι μέγιστες απαιτήσεις παραμορφώσεων παρατηρούνται στον δεύτερο όροφο για τις περισσότερες των σεισμικών δράσεων που εισήχθησαν στην ανάλυση. Στο σχήμα παρουσιάζεται η μέση τιμή των στροφικών απαιτήσεων η οποία για το δεύτερο όροφο είναι $\sim 1,8\%$ με τη μέγιστη τιμή να προέρχεται από το σεισμό της Taiwan και να έχει τιμή $\sim 3,4\%$. Οι τιμές αυτές είναι αποδεκτές για μεταλλικά πλαίσια ροπής τα

οποία πληρούν τις απαιτήσεις των κανονισμών. Ο EN1998 [43] απαιτεί στροφική ικανότητα 3,5% για υψηλή κατηγορία πλαστιμότητας και 2,5% για τη μεσαία κατηγορία πλαστιμότητας.



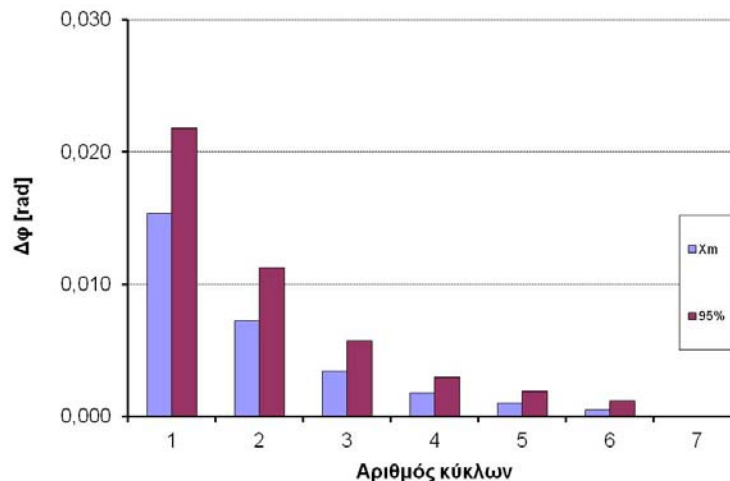
Σχήμα 4.14: Απαιτήσεις στροφικής ικανότητας ενός κτιρίου της μελέτης

Η παρούσα διατριβή μελετά την επίδραση των σεισμικών διεγέρσεων στα χαρακτηριστικά του χάλυβα. Ο σεισμός ως φόρτιση αποτελείται από μικρό αριθμό κύκλων από τους οποίους λίγοι είναι εκείνοι που έχουν σαν αποτέλεσμα την πλαστικοποίηση μιας κατασκευής. Αυτό το γεγονός καθιστά τις αστοχίες που προέρχονται λόγω σεισμικών φαινομένων να κατατάσσονται στο φαινόμενο της υπέρ-ολιγοκυκλικής κόπωσης η οποία περιγράφεται καλύτερα μέσω των παραμορφώσεων σε σχέση με τη συνήθη κόπωση για την οποία χρησιμοποιείται το ιστορικό των τάσεων. Για το λόγο αυτό οι απαιτήσεις σε όρους παραμορφώσεων των κτιρίων της εργασίας εκφράζονται μέσω των πλαστικών στροφών των κόμβων. Με τη χρησιμοποίηση μεθόδων αντίστοιχων με αυτές της κόπωσης (αλγόριθμος rainflow [80]-[81], μέθοδος reservoir [82]) μπορεί να παραχθεί το φάσμα των πλαστικών στροφών από τις αντίστοιχες χρονοϊστορίες. Στο Σχήμα 4.15 φαίνεται το φάσμα των πλαστικών στροφών με τη μορφή ιστογραμμάτων για ένα από τα κτίρια, το οποίο έχει αναλυθεί τόσο για τους ελληνικούς όσο και για τους διεθνείς σεισμούς της εργασίας. Για παράδειγμα στο σεισμό της Αθήνας παρατηρούμε ότι η πλαστική άρθρωση καλείται να ανταπεξέλθει σε ένα κύκλο με πλαστική στροφή ~1%, δύο κύκλους με ~0,8%, τρεις κύκλους με ~0,5% και τέσσερις κύκλους με ~0,4%.



Σχήμα 4.15: Ιστόγραμμα πλαστικών στροφών για το κτίριο της ανάλυσης για τους σεισμούς της μελέτης

Από τα αποτελέσματα του σχήματος γίνεται αντιληπτό ότι υπάρχει διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων ανάλογα με το σεισμό που ελέγχεται κάθε φορά. Υποθέτοντας κανονική κατανομή των αποτελεσμάτων μπορούμε να υπολογίσουμε τη μέση τιμή αυτών καθώς και το ποσοστημόριο του 95%, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.16.



Σχήμα 4.16: Ιστόγραμμα μέσης τιμής και ποσοστημορίου 95% για όλους τους σεισμούς

Τα ως άνω αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν ως χρονοϊστορία στα πειράματα συγκολλητών κόμβων δοκού-υποστυλώματος που θα περιγραφούν στη συνέχεια. Δηλαδή οι χρονοϊστορίες που εξήχθησαν αποτέλεσαν τη φόρτιση του δεύτερου σταδίου της ανάλυσης κατά το οποίο απομονώνονται οι συνδέσεις δοκού-υποστυλώματος και μελετώνται ξεχωριστά. Οι χρονοϊστορίες που χρησιμοποιήθηκαν δηλαδή αποτελούν ρεαλιστικά παραδείγματα μετατοπίσεων σε κατασκευές που έχουν σχεδιαστεί σύμφωνα με τις προδιαγραφές του EN1993 [34] και EN1998 [43]. Εκτός από τα ιστορικά φόρτισης που προέκυψαν με την ανώτερη διαδικασία, στα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν επίσης οι Ευρωπαϊκές προδιαγραφές της ECCS [83] οι οποίες περιγράφουν τρεις κύκλους φόρτισης με αυξανόμενη ένταση (ίση με $2\Delta\varphi$) μέχρι αστοχίας.

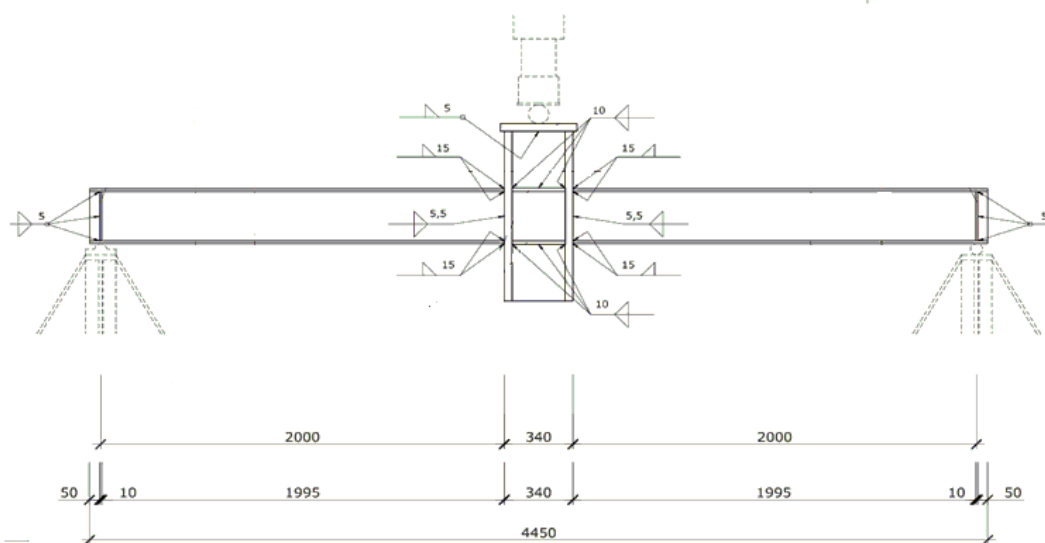
4.4 Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις

Ανακεφαλαιώνοντας πρέπει να τονιστεί ότι το πλήθος των μεταλλικών πλαισίων που μελετήθηκαν είχε ως σκοπό την εξαγωγή δεδομένων για τον καθορισμό των απαιτήσεων σε όρους παραμορφώσεων ανάλογα με την απαιτούμενη αντοχή προκειμένου αυτά να χρησιμοποιηθούν ως χρονοϊστορίες στις πειραματικές και αναλυτικές διερευνήσεις που ακολουθούν. Η συμπεριφορά των πλαισίων μελετήθηκε μέσω της επαυξητικής δυναμικής ανάλυσης, ενώ κατάλληλες μέθοδοι χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό της απόκρισης των κατασκευών σε σχέση με το σχεδιασμό αυτών. Με τη χρησιμοποίηση ευρέως αποδεκτών μεθόδων παρήχθησαν μεταβλητού εύρους φάσματα παραμορφώσεων, των οποίων η στατιστική αξιολόγηση επέτρεψε τον υπολογισμό της μέσης τιμής και του ποσοστημορίου 95%. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε εποπτικά η διαδικασία ανάλυσης για ένα από τα συνολικά κτίρια που μελετήθηκαν. Τα συνολικά αποτελέσματα των αναλύσεων περιέχονται στα αποτελέσματα του ευρωπαϊκού προγράμματος PLASTOTOUGH [2] ενώ αποτελούν μέρος της διδακτορικής διατριβής του Υποψήφιου Διδάκτορα Α.Σπηλιόπουλου [84]-[85].

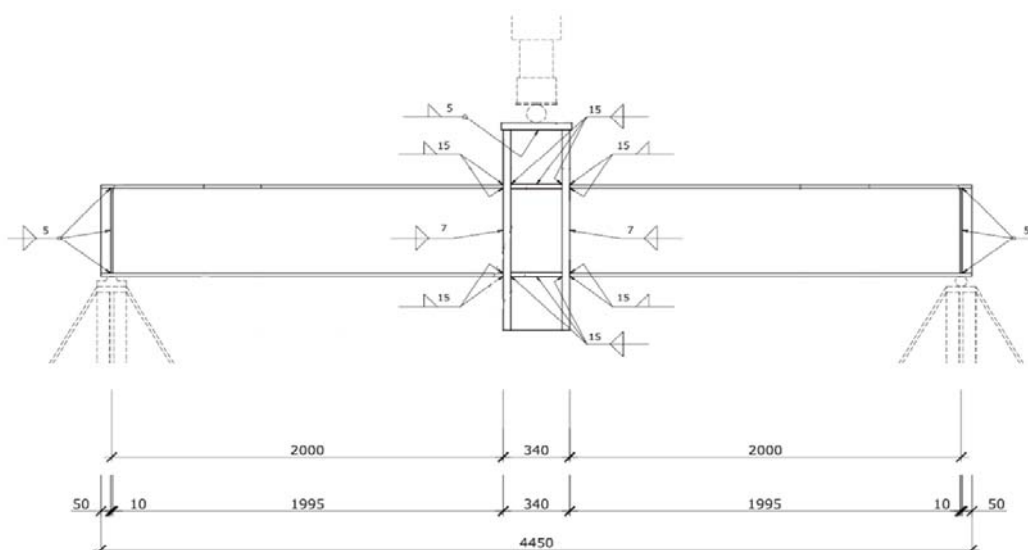
5 Πειραματικές διερευνήσεις συγκολλητών κόμβων δοκού-υποστυλώματος

5.1 Πειραματική διάταξη και περιγραφή δοκιμών δοκού-υποστυλώματος

Η γεωμετρική διάταξη των συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος που θα διερευνηθούν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας φαίνεται στα Σχήματα 5.1 και 5.2. Οι διατομές παρήχθησαν στα χαλυβουργεία του Reine στην Γερμανία ενώ τα πειράματα διεξήχθησαν στο εργαστήριο μεταλλικών κατασκευών του Πολυτεχνείου του Aachen από το συγγραφέα της παρούσας διατριβής. Τα πλήρη σχέδια των κόμβων περιλαμβάνονται στο Παράρτημα Β.

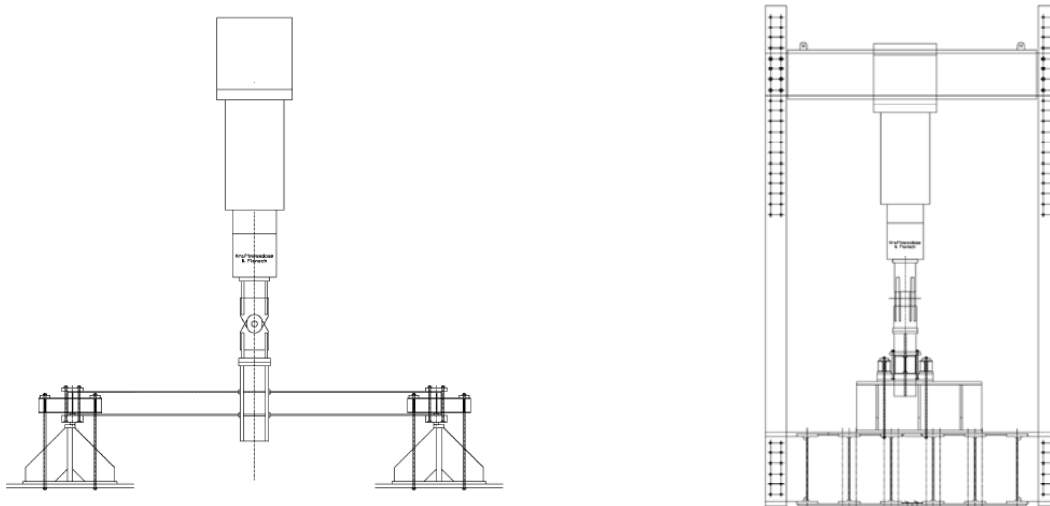


Σχήμα 5.1: Γεωμετρική διάταξη κόμβων δοκού-υποστυλώματος με διατομές δοκών HEA300



Σχήμα 5.2: Γεωμετρική διάταξη κόμβων δοκού-υποστυλώματος με διατομές δοκών IPE500

Όπως φαίνεται από τα σχήματα, η γεωμετρική διάταξη αποτελείται από δύο οριζόντιες δοκούς, μήκους δύο μέτρων η κάθε μία. Η λογική που διέπει το σχεδιασμό της πειραματικής διάταξης είναι η δυνατότητα θετικών και αρνητικών κατακόρυφων μετατοπίσεων. Αρχικά κάθε διάταξη υποβλήθηκε σε μονοτονική φόρτιση μέχρι αστοχίας, ενώ στη συνέχεια εφαρμόστηκαν ανακυκλιζόμενες φορτίσεις. Για τις ανακυκλιζόμενες φορτίσεις σε πρώτη φάση χρησιμοποιήθηκαν 8 κόμβοι δοκού-υποστυλώματος με δοκούς διατομής HEA300, ενώ σε δεύτερη φάση φορτίστηκαν 6 δοκίμια με δοκούς διατομής IPE500. Οι δοκοί συγκολλούνται μέσω εξωραφών ή εσωραφών με μία διατομή HEM300 η οποία είναι τοποθετημένη στην κατακόρυφη διεύθυνση και η οποία προσομοιώνει το υποστύλωμα. Οι δύο δοκοί υποστηρίζονται στα άκρα τους με απλές στηρίξεις ώστε να μπορούν να στραφούν ελεύθερα, ενώ η διατομή του υποστυλώματος δεσμεύεται πλευρικά ώστε να αποφευχθούν εκτός επιπέδου μετατοπίσεις. Το υποστύλωμα έφερε επίσης εγκάρσιες ενισχύσεις κορμού τοποθετημένες στη στάθμη των πελμάτων των δοκών. Τα φορτία εφαρμόζονταν μέσω υδραυλικού εμβόλου ικανότητας 2000 kN και μέγιστης δυνατότητας μετακίνησης 600mm (± 300 mm) το οποίο δρα στο μέσο του υποστυλώματος. Στο Σχήμα 5.3 αποτυπώνεται γραφικά η πειραματική διάταξη ενώ στο Σχήμα 5.4 φαίνεται η διάταξη τοποθετημένη στο εργαστήριο.



Σχήμα 5.3: Απεικόνιση της πειραματικής διάταξης σε όψη (αριστερά) και με την παρουσία του πλαισίου στήριξης (δεξιά)

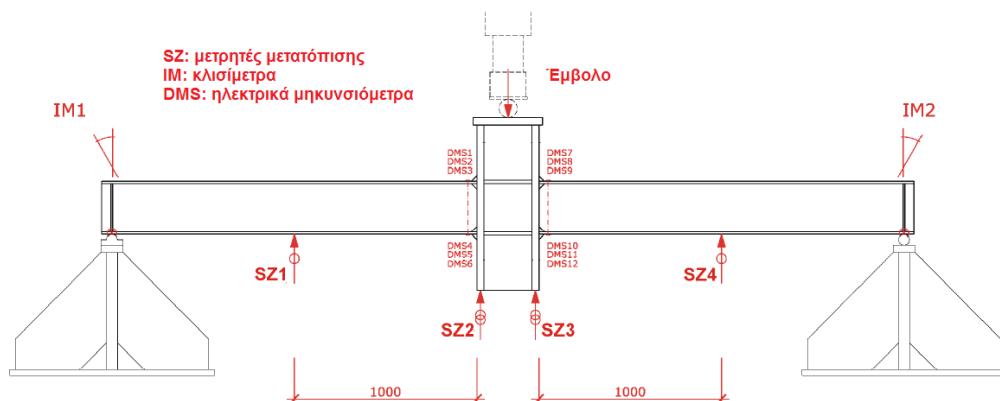


Σχήμα 5.4: Πειραματική διάταξη στο εργαστήριο

Κάθε ένα από τα πειραματικά δοκίμια ήταν εξοπλισμένο με τα ακόλουθα όργανα μέτρησης:

- Δώδεκα ηλεκτρικά μηχανοσκόπια, διατεταγμένα σε τέσσερις ομάδες των τριών. Κάθε ομάδα είχε τοποθετηθεί 20mm από τη συγκόλληση σε κάθε ένα από τα πέλματα των δύο δοκών
- Τέσσερις μετρητές μετατόπισης, δύο στο κάτω μέρος του υποστυλώματος και από ένας στο μέσο κάθε δοκού προκειμένου να μετρούν την κατακόρυφη μετατόπιση
- Δύο κλισίμετρα, ένα σε κάθε στήριξη, προκειμένου να μετρούν τη στροφή των δοκών
- Μετρητής φορτίου και μετατόπισης του εμβόλου

Στο Σχήμα 5.5 φαίνεται η διάταξη όλων των οργάνων μέτρησης σε ένα δοκίμιο με δοκούς διατομής HEA300, ενώ στα Σχήματα 5.6 και 5.7 φαίνονται τα όργανα τοποθετημένα στο πειραματικό δοκίμιο. Η ίδια διάταξη διατηρήθηκε και στην περίπτωση των δοκών IPE500.



Σχήμα 5.5: Διάταξη οργάνων μέτρησης για τα πειράματα

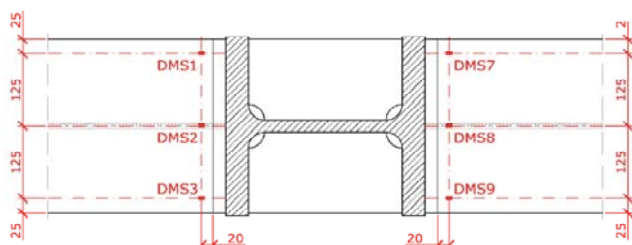


Σχήμα 5.6: Μετρητές μετατόπισης (αριστερά) και κλισίμετρο (δεξιά)



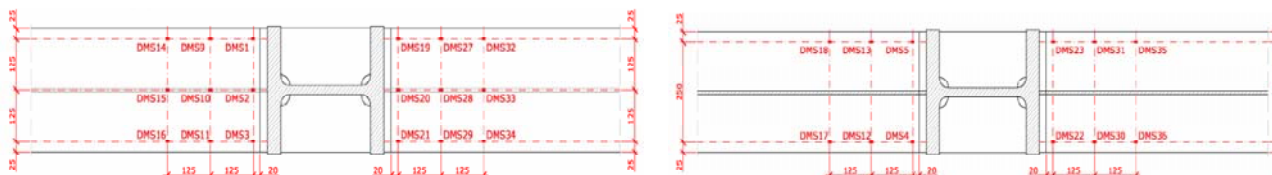
Σχήμα 5.7: Ηλεκτρικά μηχανοσκόπια (αριστερά) και έμβολο (δεξιά)

Στο Σχήμα 5.8 φαίνεται η διάταξη των ηλεκτρονικών μηχανοσυστοιχιών σε κάτοψη στο άνω πέλμα των δοκών. Την ίδια γεωμετρία έχουν και τα μηχανοσυστοιχία που διατάσσονται στο κάτω πέλμα των δοκών, με αποτέλεσμα κάθε δοκός να έχει συνολικά έξι ηλεκτρικά μηχανοσυστοιχία στην περιοχή της συγκόλλησης.



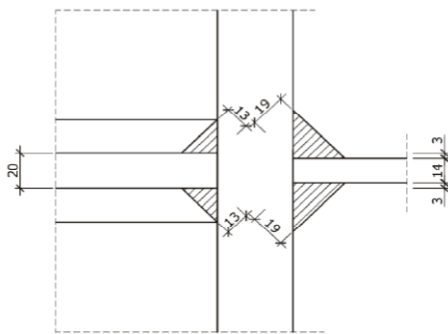
Σχήμα 5.8: Διάταξη ηλεκτρικών μηχανοσυστοιχιών σε κάτοψη (δοκοί HEA300)

Σε ορισμένες πειραματικές διατάξεις προκειμένου να μετρηθούν οι παραμορφώσεις στην περιοχή δημιουργίας της πλαστικής άρθρωσης ο αριθμός των ηλεκτρικών μηχανοσυστοιχιών αυξήθηκε σύμφωνα με το Σχήμα 5.9. Στο σχήμα αυτό φαίνεται η πύκνωση των ηλεκτρικών μηχανοσυστοιχιών στο άνω πέλμα μιας δοκού διατομής HEA300. Συγκεκριμένα, στην άνω επιφάνεια του άνω πέλματος της κάθε δοκού τοποθετούνται 9 ηλεκτρικά μηχανοσυστοιχία, ενώ στην κάτω επιφάνεια του άνω πέλματος της δοκού 6. Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτρικών μηχανοσυστοιχιών είναι τέτοια ώστε να περιλαμβάνεται πλήρως η περιοχή σχηματισμού της πλαστικής άρθρωσης όπως αυτή μετρήθηκε στα πειράματα μονοτονικής φόρτισης.



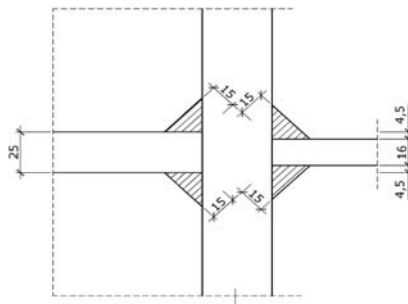
Σχήμα 5.9: Διάταξη ηλεκτρικών μηχανοσυστοιχιών στην άνω (αριστερά) και κάτω (δεξιά) επιφάνεια του άνω πέλματος της δοκού για μέτρηση των παραμορφώσεων της πλαστικής άρθρωσης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί τα πειράματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τη μορφή της συγκόλλησης που χρησιμοποιήθηκε κάθε φορά για τη σύνδεση μεταξύ δοκού και υποστυλώματος έτσι ώστε να μελετηθούν τυχόν διαφορές στη συμπεριφορά των συνδέσεων. Στον πρώτο τύπο, κάθε δοκός είχε συγκολληθεί με το υποστύλωμα με τη βοήθεια εξωραφών. Η πραγματοποίηση των εξωραφών έγινε στο εργοστάσιο παραγωγής των συνδέσεων και το πάχος τους ήταν σύμφωνο με τις προδιαγραφές του EN1993 [34] και του EN1998 [43]. Συγκεκριμένα για τα πειράματα των ανακυκλιζόμενων φορτίσεων με εξωραφές κατασκευάστηκαν 4 συνδέσεις με δοκούς διατομής HEA300 και 3 συνδέσεις με δοκούς διατομής IPE500. Στο Σχήμα 5.10 φαίνονται τα γεωμετρικά στοιχεία των εξωραφών που χρησιμοποιήθηκαν για την περίπτωση των δοκών διατομής HEA300. Όπως μπορεί να γίνει αντιληπτό και από τις φωτογραφίες η ποιότητα των συγκολλήσεων είναι πολύ καλή, γεγονός που εξακριβώθηκε και κατά την εκτέλεση των πειραματικών μετρήσεων.



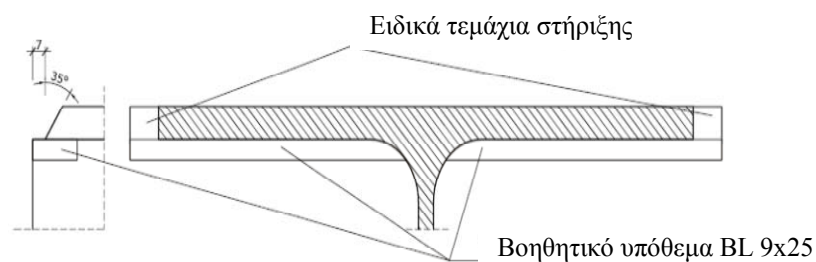
Σχήμα 5.10: Λεπτομέρεια εξωραφών για την περίπτωση δοκών διατομής HEA300

Στο Σχήμα 5.11 φαίνεται η λεπτομέρεια της συγκόλλησης για την περίπτωση εξωραφών των δοκών διατομής IPE500. Ομοίως με τις δοκούς διατομής HEA, είναι εμφανής η πολύ καλή ποιότητα της συγκόλλησης που πραγματοποιήθηκε μεταξύ του πέλματος της δοκού και του πέλματος του υποστυλώματος.



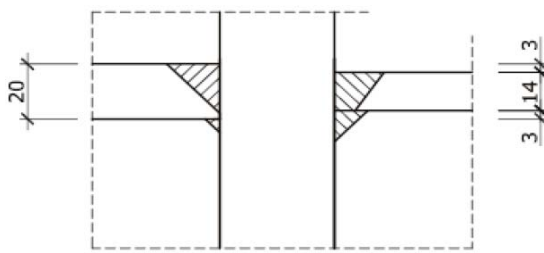
Σχήμα 5.11: Λεπτομέρεια εξωραφών για την περίπτωση δοκών διατομής IPE500

Στο δεύτερο τύπο συνδέσεων το πέλμα των δοκών συνδέεται με το υποστύλωμα με τη βοήθεια εσωραφών. Συγκεκριμένα, τα πέλματα είχαν λειανθεί υπό γωνία 35° και στη συνέχεια συγκολλήθηκαν στο υποστύλωμα. Η ραφή της συγκόλλησης έγινε με τη βοήθεια ενός βοηθητικού υποθέματος στην περιοχή της ρίζας της συγκόλλησης ενώ στα άκρα του πέλματος χρησιμοποιούνται ειδικά τεμάχια στήριξης προκειμένου να μην χυθεί το ρευστό υλικό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.12. Τόσο το βοηθητικό υπόθεμα συγκόλλησης, όσο και τα ειδικά τεμάχια στήριξης αφαιρέθηκαν μετά το πέρας της συγκόλλησης.



Σχήμα 5.12: Λεπτομέρεια διαδικασίας συγκόλλησης εσωραφών

Μετά την πραγματοποίηση της εσωραφής, η ρίζα της συγκόλλησης σφραγίζεται επιπρόσθετα με μία εξωραφή πάχους 8mm. Για το λόγο αυτό ενώ στην άνω επιφάνεια των πελμάτων έχουμε τη δημιουργία εσωραφών, στην κάτω επιφάνεια των πελμάτων δημιουργείται ουσιαστικά εξωραφή. Στο Σχήμα 5.13 φαίνεται η τελική μορφή της συγκόλλησης για την περίπτωση δοκού διατομής HEA300. Η ποιότητα της ραφής ελέγχθηκε με τη βοήθεια υπερήχων. Ο κορμός της δοκού συνδέεται με το υποστύλωμα με τη χρήση εξωραφών.



Σχήμα 5.13: Λεπτομέρεια εσωραφών για την περίπτωση των δοκών HEA300

Στον Πίνακα 5.1 φαίνεται η διαδικασία συγκόλλησης που ακολουθήθηκε στην περίπτωση των εξωραφών. Η ταχύτητα της συγκόλλησης είναι μικρότερη κατά το πρώτο πέρασμα του ηλεκτροδίου προκειμένου να προστατευθεί όσο το δυνατόν περισσότερο η ρίζα της συγκόλλησης που αποτελεί κρίσιμη περιοχή για πιθανές αστοχίες.

Πίνακας 5.1: Διαδικασία συγκόλλησης για εξωραφές πολλαπλών στρώσεων

Πέρασμα	Διάμετρος ηλεκτροδίου [mm]	Ένταση ρεύματος [A]	Τάση ρεύματος [V]	Πολικότητα	Ταχύτητα συγκόλλησης [cm/min]	Τροφοδοσία ηλεκτροδίου [m/min]
1 ^ο (ρίζα)	1,2	100-130	18-20	DC+	15-25	2,7-3,3
2 ^ο -n	1,2	250-290	27-29	DC+	30-60	8,5-9,5

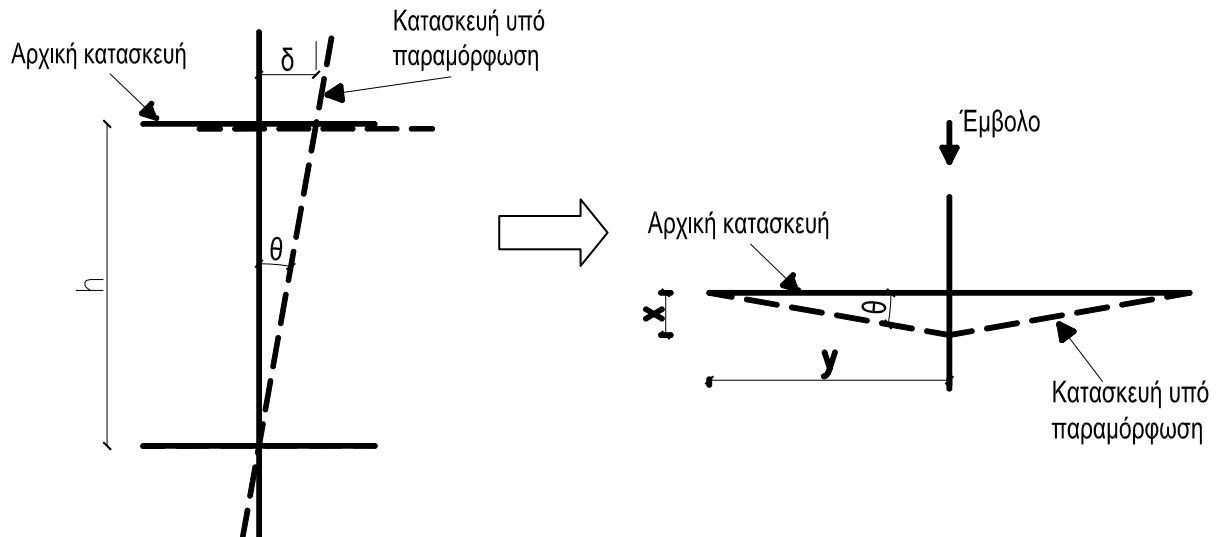
Η ρίζα της συγκόλλησης λειαίνεται και σφραγίζεται
Θερμοκρασία προθέρμανσης: 100° C για χάλυβα S355J2 όταν t>30mm

Συνολικά επομένως εξετάστηκαν τέσσερις τύποι δοκιμών. Στον Πίνακα 5.2 φαίνεται ο συνολικός αριθμός και ο τύπος των δοκιμών που εξετάστηκαν πειραματικά καθώς και ο τύπος φόρτισης κάθε κόμβου. Όπως φαίνεται από τον πίνακα, για κάθε πειραματική διάταξη πριν την εφαρμογή των ανακυκλιζόμενων φορτίσεων προηγήθηκε μία μονοτονική φόρτιση προκειμένου να βρεθεί πειραματικά το σημείο διαρροής της σύνδεσης. Σκοπός των δύο διαφορετικών τύπων συγκόλλησης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η αξιολόγηση της συμπεριφοράς τους και η μεταξύ τους σύγκριση.

Πίνακας 5.2: Σύνολο πειραματικών δοκιμών

Πίνακας πειραματικών δοκιμών	Αριθμός πειραμάτων							
	S355J2				S460M			
	Μονοτονική		Ανακυκλιζόμενη		Μονοτονική			
Ποιότητα χάλυβα	HEA300		IPE500		HEA300		IPE500	
Τύπος φόρτισης	Μονοτονική		Ανακυκλιζόμενη		Μονοτονική		Μονοτονική	
Διατομή δοκού	HEA300	IPE500	HEA300	IPE500	HEA300	IPE500	HEA300	IPE500
Εσωραφές	1	1	4	3	1		1	
Εξωραφές	1	1	4	3	1		1	
Σύνολο	2	2	8	6	2		2	

Στο Σχήμα 5.14 φαίνονται οι παραδοχές που ακολουθήθηκαν κατά την αναγωγή των αποτελεσμάτων στροφών των κόμβων από την ανάλυση των κτιρίων στις χρονοϊστορίες οι οποίες επιβλήθηκαν στην πειραματική διάταξη. Από το σχήμα φαίνεται η μέτρηση της σχετικής μετατόπισης ενός ορόφου ως προς τον υποκείμενο όροφο, η οποία και ορίζεται ως ο λόγος της διαφοράς των μετατοπίσεων του ενός ως προς τον άλλο προς το ύψος που τους διαχωρίζει. Για το λόγο αυτό η γωνία θ είναι αυτή που εφαρμόζεται και στην πειραματική διάταξη εναρμονισμένη στις διαστάσεις του δοκιμίου.



Σχήμα 5.14: Μετατροπή στροφών κόμβων σε χρονοϊστορία μετατοπίσεων της πειραματικής διάταξης

Ο Πίνακας 5.3 παρουσιάζει την κωδική ονομασία κάθε πειράματος που πραγματοποιήθηκε και τα χαρακτηριστικά του κόμβου στα οποία αντιστοιχεί. Με βάση τις ονομασίες αυτές θα παρουσιαστούν στη συνέχεια τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Πίνακας 5.3: Κωδικές ονομασίες μονοτονικών και ανακυκλιζόμενων δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν

Πείραμα	Διατομή δοκού	Ποιότητα χάλυβα	Τύπος συγκόλλησης
RT IPE 355ns	IPE500	S355J2	Εξωραφή
RT IPE 355s	IPE500	S355J2	Εσωραφή
RT HEA 355ns	HEA300	S355J2	Εξωραφή
RT HEA 355s	HEA300	S355J2	Εσωραφή
RT IPE 460ns	IPE500	S460M	Εξωραφή
RT IPE 460s	IPE500	S460M	Εσωραφή
RT HEA 460ns	HEA300	S460M	Εξωραφή
RT HEA 460s	HEA300	S460M	Εσωραφή

5.2 Τύποι φορτίσεων

Στους συγκολλητούς κόμβους δοκού-υποστυλώματος επεβλήθησαν τέσσερα διαφορετικά είδη φορτίσεων με έλεγχο της επιβαλλόμενης μετατόπισης στη θέση που ασκείται το φορτίο. Οι φορτίσεις, οι οποίες διέφεραν ως προς το εύρος και τη διαδικασία φόρτισης, περιγράφονται στη συνέχεια:

- i. Μονοτονική φόρτιση
- ii. Ανακυκλιζόμενες φορτίσεις με κύκλους διαρκώς αυξανόμενου πλάτους σύμφωνα με τις διατάξεις της ECCS (European Convention for Constructional Steelwork) [83]. Συγκεκριμένα αν θεωρήσουμε την παραμόρφωση διαρροής ίση με δ_y , η φόρτιση αυτή αποτελείται από μια σειρά κύκλων φόρτισης με πλάτη ίσα με $\frac{1}{4}\delta_y$, $\frac{1}{2}\delta_y$, $\frac{3}{4}\delta_y$ και δ_y , οι οποίοι επιβάλλονται διαδοχικά κατά τις δύο κατακόρυφες κατευθύνσεις της φόρτισης και εκτελούνται από μία φορά ο καθένας. Στη συνέχεια επιβάλλονται κύκλοι φόρτισης για κάθε πολλαπλάσιο της παραμόρφωσης διαρροής ($2\delta_y$, $4\delta_y$, $6\delta_y$ κοκ.) μέχρι την αστοχία του δοκιμίου, με την κάθε μετατόπιση να επαναλαμβάνεται τρεις φορές. Ο Πίνακας 5.4 δείχνει τη χρονοϊστορία μετατοπίσεων που χρησιμοποιήθηκε για τη συγκεκριμένη φόρτιση και στις δύο περιπτώσεις συνδέσεων με δοκούς διαφορετικής διατομής. Η παραμόρφωση δ_y υπολογίστηκε τόσο με αναλυτικό όσο και με πειραματικό τρόπο μέσω των πειραμάτων μονοτονικής φόρτισης και βρέθηκε ότι στην περίπτωση των συγκολλητών συνδέσεων με δοκούς διατομής HEA300 είχαμε $\delta_y=26\text{mm}$ ενώ για την περίπτωση των δοκών διατομής IPE500 προέκυψε $\delta_y=16\text{mm}$.

Πίνακας 5.4: Χρονοϊστορία φόρτισης σύμφωνα με τις προδιαγραφές της ECCS

Αριθμός κύκλων	Κατακόρυφη μετατόπιση			Σχετική μετατόπιση ορόφων	
	Σύμφωνα με το δ_y	HEA300	IPE500	HEA300	IPE500
		mm	mm	(%)	(%)
1	$0,25\delta_y$	6,5	4	0,325	0,2
1	$0,50\delta_y$	13	8	0,65	0,4
1	$0,75\delta_y$	19,5	12	0,975	0,6
1	δ_y	26	16	1,3	0,8
3	$2\delta_y$	52	32	2,6	1,6
3	$4\delta_y$	104	64	5,2	3,2
3	$6\delta_y$	156	96	7,8	4,8

- iii. Ανακυκλιζόμενες φορτίσεις με κύκλους μεταβλητού πλάτους. Η χρονοϊστορία αυτών των φορτίσεων προέκυψε σύμφωνα με τη διαδικασία που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 4. Συγκεκριμένα επιλέχθηκε ένα από τα κτίρια τα οποία αναλύθηκαν και απομονώθηκε η χρονοϊστορία πλαστικών στροφών του δυσμενέστερου κόμβου των πλαισίων ροπής από τα οποία αποτελείται. Στη συνέχεια οι στρόφες αυτές μετατράπηκαν σε μετατοπίσεις σύμφωνα με το Σχήμα 5.14, οι οποίες και εφαρμόστηκαν τελικά στο υπό εξέταση δοκίμιο. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε το ποσοστημόριο 95% από το σύνολο των σεισμικών συνδυασμών προκειμένου να εφαρμοστεί τόσο στις περιπτώσεις των κόμβων με δοκούς διατομής HEA όσο και σε αυτές με δοκούς διατομής IPE, ενώ η φόρτιση που προκύπτει από το σεισμό του Kobe εφαρμόστηκε μόνο στους κόμβους με δοκούς διατομής HEA. Στον Πίνακα 5.5 περιγράφονται οι χρονοϊστορίες φόρτισης για κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις.

Πίνακας 5.5: Χρονοϊστορία φορτίσεων μεταβλητού πλάτους

Αριθμός κύκλων	Κατακόρυφη μετατόπιση		
	Ποσοστημόριο 95%		Σεισμός Kobe
	HEA300	IPE500	HEA300
	mm	mm	mm
6	2,3	-	3,2
5	3,8	4,0	7,7
4	5,9	5,0	8,6
3	11,5	8,0	22,0
2	22,6	20,0	44,0
1	43,6	40,0	60,0

iv. Ανακυκλιζόμενη φόρτιση με κύκλους σταθερού εύρους. Συγκεκριμένα επιβλήθηκαν κύκλοι κατακόρυφης μετατόπισης 70mm (ανακυκλιζόμενες φορτίσεις μεταξύ των τιμών -70mm και +70mm) για τις συνδέσεις με διατομές δοκών HEA και κύκλοι με κατακόρυφη μετατόπιση 50mm (ανακυκλιζόμενες φορτίσεις μεταξύ των τιμών -50mm και +50mm) στις συνδέσεις με διατομές δοκών IPE.

Οι Πίνακες 5.6 και 5.7 παρουσιάζουν συνοπτικά τις χρονοϊστορίες των ανακυκλιζόμενων φορτίσεων που χρησιμοποιήθηκαν για τις διατομές HEA300 και IPE500 αντίστοιχα. Η κάθε μία από τις χρονοϊστορίες εφαρμόστηκε στις συνδέσεις περισσότερες από μία φορά και μέχρι να υπάρξει αστοχία της σύνδεσης με κυρίαρχο κριτήριο τη δημιουργία και επέκταση ρωγμών στο υλικό είτε της συγκόλλησης είτε της διατομής των δοκών.

Πίνακας 5.6: Χρονοϊστορία φόρτισης κόμβων με διατομές δοκών HEA300

ECCS	Αριθμός κύκλων	<i>N</i>	1	1	1	1	3	3+n
	Κατακόρυφη μετατόπιση	δ	$\pm 6,5$	$\pm 13,0$	$\pm 19,5$	$\pm 26,0$	$\pm 52,0$	$\pm 104,0$
Ποσοστημόριο 95%	Αριθμός κύκλων	<i>N</i>	6	5	4	3	2	1
	Κατακόρυφη μετατόπιση	δ	$\pm 2,3$	$\pm 3,8$	$\pm 5,9$	$\pm 11,5$	$\pm 22,6$	$\pm 43,6$
Kobe	Αριθμός κύκλων	<i>N</i>	6	5	4	3	2	1
	Κατακόρυφη μετατόπιση	δ	$\pm 3,2$	$\pm 7,7$	$\pm 8,6$	$\pm 22,0$	$\pm 44,0$	$\pm 60,0$
Σταθερού εύρους	Αριθμός κύκλων	<i>N</i>	x					
	Κατακόρυφη μετατόπιση	δ	± 70					

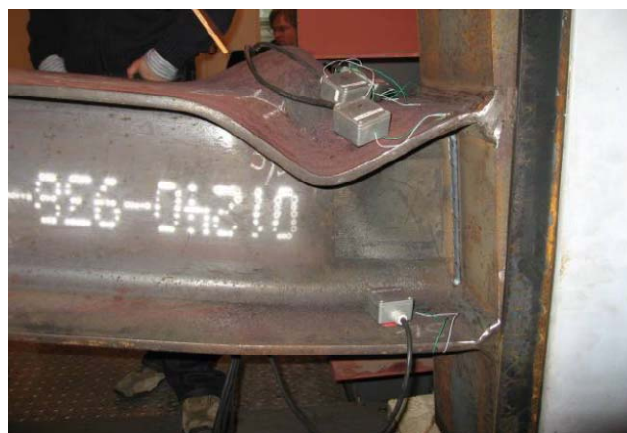
Πίνακας 5.7: Χρονοϊστορία φόρτισης κόμβων με διατομές δοκών IPE500

ECCS	Αριθμός κύκλων	N	1	1	1	1	3	3+n
	Κατακόρυφη μετατόπιση	δ	$\pm 4,0$	$\pm 8,0$	$\pm 12,0$	$\pm 16,0$	$\pm 32,0$	$\pm 64,0$
Ποσοστημόριο 95%	Αριθμός κύκλων	N	5	4	6	5	4	
	Κατακόρυφη μετατόπιση	δ	$\pm 4,0$	$\pm 5,0$	$\pm 8,0$	$\pm 20,0$	$\pm 40,0$	
Σταθερού εύρους	Αριθμός κύκλων	N	x					
	Κατακόρυφη μετατόπιση	δ	± 50					

5.3 Αποτελέσματα μονοτονικών φορτίσεων

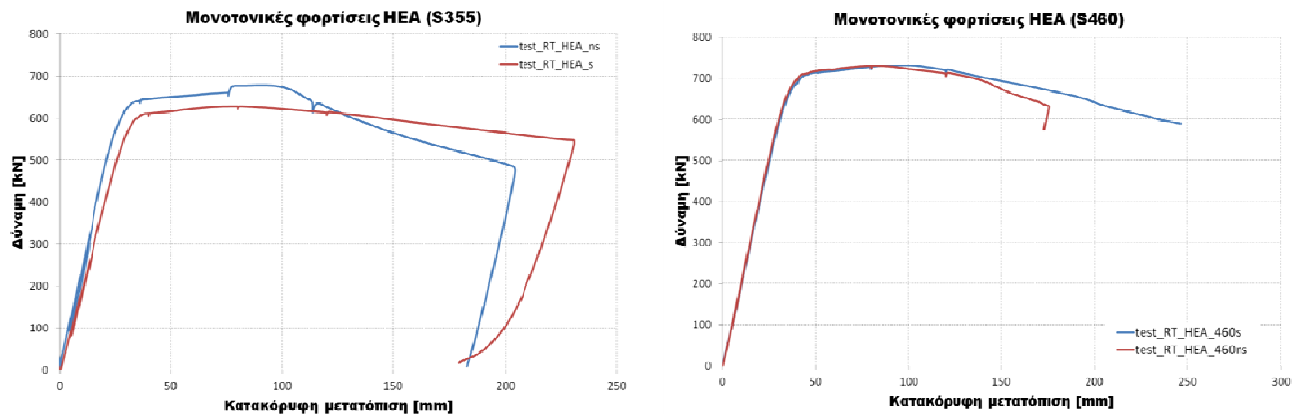
Τα πειράματα μονοτονικών φορτίσεων αποτέλεσαν τα πρώτα της σειράς που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο μεταλλικών κατασκευών του Πολυτεχνείου του Aachen στη Γερμανία υπό την παρουσία του συγγραφέα της διατριβής. Σκοπός αυτών των πειραμάτων ήταν η εύρεση του φορτίου στο οποίο λαμβάνει χώρα η διαρροή της σύνδεσης, καθώς και ο έλεγχος της πειραματικής διάταξης για την επίλυση τυχόν προβλημάτων που θα ανακύψουν προκειμένου να αποφευχθούν λανθασμένες μετρήσεις κατά τη διάρκεια των ανακυκλιζόμενων φορτίσεων.

Όλα τα δοκίμια που εξετάστηκαν υπό μονοτονική φόρτιση έδειξαν γραμμική αύξηση του φορτίου μέχρι το σημείο της πλαστικής ροπής αντοχής της διατομής της δοκού, ενώ μετά το σημείο αυτό το φορτίο αυξάνεται με αργό ρυθμό. Με το πέρας μιας συγκεκριμένης τιμής κατακόρυφης μετατόπισης το άνω πέλμα της δοκού που είναι υπό θλίψη υπόκειται σε τοπικό λυγισμό και σχηματίζεται πλαστική άρθρωση. Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τη φόρτιση του συγκολλητού κόμβου, καταγράφεται απόκλιση της διατομής του υποστυλώματος από το κατακόρυφο επίπεδο, η οποία επιδεινώνεται καθώς το φορτίο αυξάνεται. Στη συνέχεια του πειράματος το φορτίο μειώνεται βαθμιαία και το πείραμα σταματά όταν η κλίση του υποστυλώματος φτάσει μια κρίσιμη τιμή η οποία αποτελεί όριο για την ορθή λειτουργία του εμβόλου. Στο Σχήμα 5.15 φαίνεται το δοκίμιο RT_HEA_355ns μετά το πέρας της φόρτισης καθώς και το σημείο τοπικού λυγισμού.

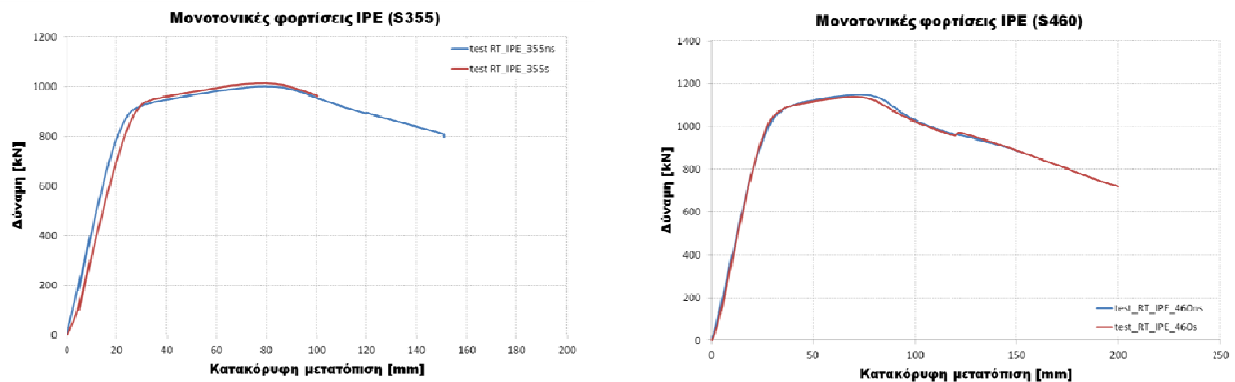


Σχήμα 5.15: Δοκίμιο RT_HEA_355ns μετά το πέρας της μονοτονικής φόρτισης

Η θέση της πλαστικής άρθρωσης διαφέρει ανάμεσα στα πειραματικά δοκίμια. Ο τοπικός λυγισμός λαμβάνει χώρα είτε στη μία από τις δύο δοκούς, είτε ταυτόχρονα και στις δύο διατομές. Το γεγονός αυτό επηρεάζει τη μετέπειτα συμπεριφορά του δοκιμίου, γεγονός το οποίο φαίνεται και από τα διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης του Σχήματος 5.16. Το φαινόμενο αυτό ελήφθη υπόψη κατά τις αριθμητικές διερευνήσεις που ακολούθησαν, έτσι ώστε το κάθε προσομοίωμα με τη βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων να αποτυπώνει σωστά τη δημιουργία τοπικού λυγισμού είτε στη μία είτε και στις δύο δοκούς του κόμβου. Στα Σχήματα 5.16 και 5.17 φαίνονται οι καμπύλες φορτίου-μετατόπισης των μονοτονικών φορτίσεων της πειραματικής διάταξης που περιγράφηκε προηγουμένως. Το Σχήμα 5.16 αφορά συνδέσεις με διατομές δοκών HEA300 ενώ τα διαγράμματα του Σχήματος 5.17 αφορούν συνδέσεις με διατομές δοκών IPE500.



Σχήμα 5.16: Διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης κόμβων με διατομή δοκών HEA300 και ποιότητα χάλυβα S355J2 (αριστερά) και S460M (δεξιά)



Σχήμα 5.17: Διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης κόμβων με διατομή δοκών IPE 500 και ποιότητα χάλυβα S355J2 (αριστερά) και S460M (δεξιά)

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων των πειραμάτων πραγματοποιείται με βάση τις συστάσεις της ECCS [83]. Σύμφωνα με αυτή τη διαδικασία η δυσκαμψία υπολογίζεται ως η εφαπτομένη του ελαστικού κλάδου της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης σύμφωνα με την εξίσωση:

$$E_t = \tan \alpha_y \quad (5.1)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται το σημείο του διαγράμματος δύναμης-μετατόπισης στο οποίο η εφαπτομένη έχει κλίση $E_t/10$. Από το σημείο τομής των δύο εφαπτόμενων προκύπτει το φορτίο διαρροής F_y και η αντίστοιχη μετατόπιση διαρροής e_y . Επιπλέον από τα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης προκύπτουν το μέγιστο φορτίο F_{max} καθώς και η στροφική ικανότητα φ_{rot} της σύνδεσης δοκού-υποστυλώματος.

Στον Πίνακα 5.6 φαίνονται συνοπτικά οι παράμετροι που εξήχθησαν από τα διαγράμματα φορτίου-παραμόρφωσης των Σχημάτων 5.16 και 5.17 σε σύγκριση με το θεωρητικό ελαστικό και πλαστικό φορτίο αντοχής των διατομών που προκύπτουν από τις εξισώσεις (5.2) και (5.3).

$$F_{el} = \frac{4 \cdot f_y \cdot W_{y,el}}{4,0} \quad (5.2)$$

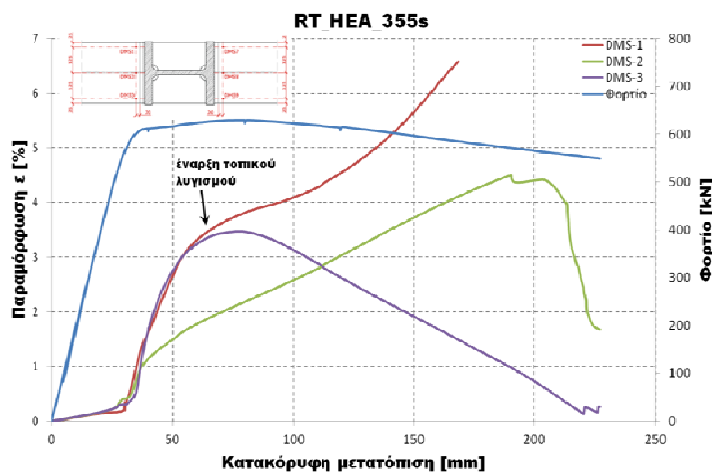
$$F_{pl} = \frac{4 \cdot f_y \cdot W_{y,pl}}{4,0} \quad (5.3)$$

όπου $W_{y,el}$ και $W_{y,pl}$ η ελαστική και πλαστική ροπή αντίστασης των διατομών αντίστοιχα.

Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα εύρεσης παραμέτρων μέσω των μονοτονικών φορτίσεων

Πείραμα	E_t [kN/m]	e_y [mm]	F_y [kN]	F_{max} [kN]	φ_{rot} [mrad]	F_{el} [kN]	F_{pl} [kN]
RT_HEA_355ns	24920	26,2	621,5	662,0	46,0	580,5	637,1
RT_HEA_355s	23184	27,3	592,0	629,3	63,5	580,5	637,1
RT_HEA_460ns	24980	30,8	697,0	731,0	55,0	680,4	746,8
RT_HEA_460s	24326	31,4	691,3	730,0	60,8	680,4	746,8
RT_IPE_355ns	62396	16,0	890,1	1000,1	52,0	855,8	972,8
RT_IPE_355s	49190	18,2	923,6	1013,5	-	855,8	972,8
RT_IPE_460ns	60709	18,4	1014,2	1148,2	38,2	961,5	1093,1
RT_IPE_460s	58265	18,2	1021,5	1138,8	38,0	961,5	1093,1

Κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών μετρούνταν οι παραμορφώσεις περιμετρικά των συγκολλήσεων μέσω ηλεκτρικών μηκυνσίόμετρων. Οι τιμές που προέκυψαν συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες αναλυτικών διερευνήσεων οι οποίες θα παρουσιαστούν στη συνέχεια. Το Σχήμα 5.18 αποτυπώνει την εξέλιξη των παραμορφώσεων κατά τη διάρκεια του μονοτονικού πειράματος με δοκούς διατομής HEA300 με εσωραφές και ποιότητα χάλυβα S355J2.



Σχήμα 5.18: Μετρήσεις των παραμορφώσεων στη συγκόλληση για δοκούς HEA300 με εσωραφές και ποιότητας χάλυβα S355J2

Από το Σχήμα 5.18 φαίνεται ότι όσο βρισκόμαστε στην ελαστική περιοχή της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης οι παραμορφώσεις (ελαστικές) αυξάνονται με αργό ρυθμό έως ότου υπάρξει διαρροή ολόκληρης της διατομής. Στη συνέχεια οι παραμορφώσεις (πλαστικές) αυξάνονται και στις

τρεις περιοχές που πραγματοποιούνται μετρήσεις. Μετά την ολοκλήρωση της διαρροής ολόκληρης της διατομής της δοκού, οι παραμορφώσεις στην εξωτερική πλευρά των πελμάτων της δοκού αυξάνονται με μεγαλύτερο ρυθμό σε σχέση με τις αντίστοιχες στη μέση του πέλματος. Κατά την έναρξη του τοπικού λυγισμού και το σχηματισμό της πλαστικής άρθρωσης οι παραμορφώσεις στη μία πλευρά του πέλματος συνεχίζουν να αυξάνονται ενώ στην άλλη πλευρά μειώνονται ως συνέπεια της αναδίπλωσης του πέλματος, η οποία από τη μία πλευρά είναι θετική ενώ στην άλλη είναι αρνητική. Το μέσο του πέλματος σχεδόν δεν επηρεάζεται από τον λυγισμό. Αυτή η τάση εναλλαγής των τιμών των παραμορφώσεων ήταν εμφανής σε όλα τα πειράματα μετά τον τοπικό λυγισμό των πελμάτων των δοκών.

5.4 Αποτελέσματα ανακυκλιζόμενων φορτίσεων

Τα αποτελέσματα των ανακυκλιζόμενων φορτίσεων είτε μεταβλητού είτε σταθερού πλάτους παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα Γ λόγω του μεγάλου αριθμού τους. Ενδεικτικά παρατίθενται τα αποτελέσματα από το δοκίμιο HEA_355s_04 το οποίο έχει υποστεί ανακυκλιζόμενες φορτίσεις σύμφωνα με τη χρονοϊστορία που προέκυψε από την επιβολή του σεισμού του Kobe σε ένα από τα κτίρια που εξετάστηκαν στο Κεφάλαιο 4. Στο Σχήμα 5.19 περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα του πειράματος. Συγκεκριμένα περιέχονται η χρονοϊστορία φόρτισης του δοκιμίου, μια φωτογραφία από την περιοχή του τοπικού λυγισμού της δοκού, καθώς και τέσσερα διαγράμματα στα οποία κατά σειρά απεικονίζονται οι ακόλουθες μεταβλητές:

- Η χρονοϊστορία μετατοπίσεων του εμβόλου
- Η χρονοϊστορία της εφαρμοζόμενης δύναμης
- Η χρονοϊστορία της γωνίας κλίσης του υποστυλώματος.
- Η πειραματική καμπύλη αξονικής δύναμης- μετατόπισης.

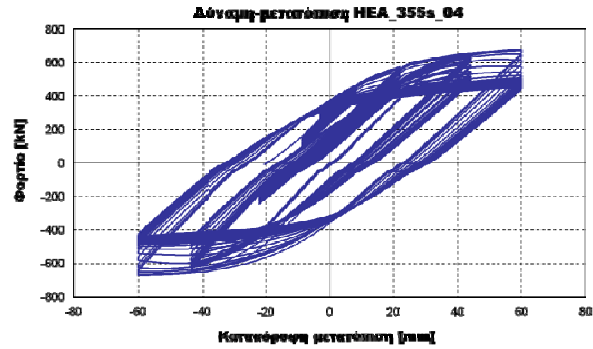
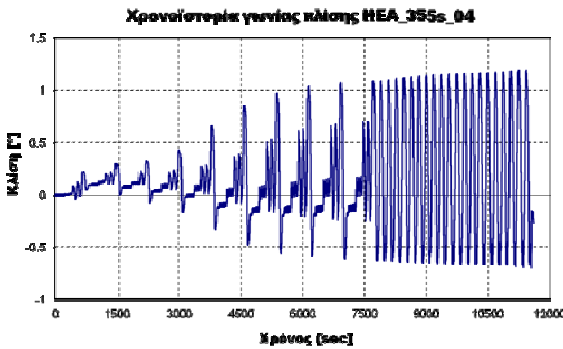
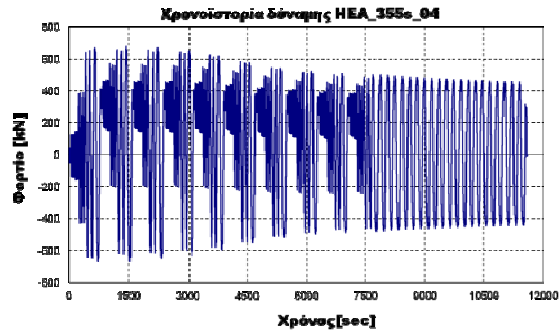
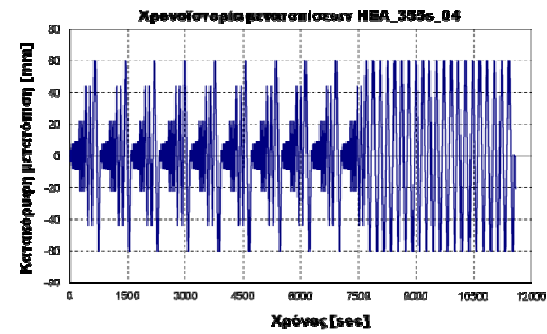
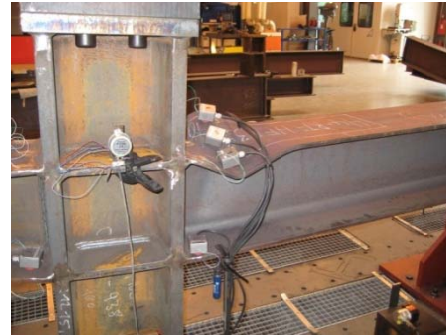
Πρώτο μέρος:

Χρονοϊστορία φόρτισης: Kobe, 10 κύκλοι

N	-	6	5	4	3	2	1
Δ	mm	±3,2	±7,5	±8,6	±22	±44	±60

Δεύτερο μέρος:

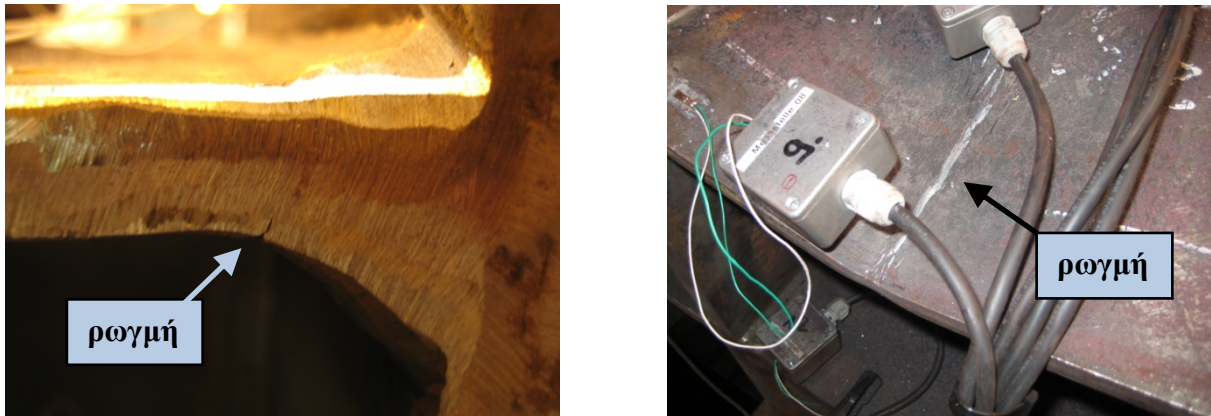
Σταθερού εύρους φόρτιση: Δ=±60mm, 20 κύκλοι



Σχήμα 5.19: Αποτελέσματα πειράματος ανακυκλιζόμενης φόρτισης σύμφωνα με τη χρονοϊστορία του σεισμού του Kobe.

Τα αποτελέσματα αυτά προέρχονται από την εφαρμογή της χρονοϊστορίας του σεισμού του Kobe σε δοκίμιο που αποτελείται από δοκούς διατομής HEA300 οι οποίες έχουν συγκολληθεί στο υποστύλωμα με τη βοήθεια εσωραφών. Η χρονοϊστορία εφαρμόστηκε στο δοκίμιο 10 φορές και στη συνέχεια εφαρμόστηκαν σταθεροί κύκλοι πλάτους 60mm, όσο δηλαδή και η μέγιστη μετατόπιση της χρονοϊστορίας του Kobe. Κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου της χρονοϊστορίας του Kobe παρατηρήθηκε τοπικός λυγισμός στη μία από τις δύο δοκούς.

Η απαρχή των δύο πρώτων ρηγματώσεων παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια του έκτου και του όγδοου κύκλου στο σημείο της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης του άνω πέλματος της δοκού στη διεπιφάνεια μεταξύ συγκόλλησης και μητρικού υλικού. Οι ρωγμές εμφανίστηκαν στην κάτω επιφάνεια του άνω πέλματος της δοκού τόσο στο αριστερό όσο και στο δεξί μέρος του πέλματος. Κατά την διάρκεια των επόμενων κύκλων οι δύο αυτές ρωγμές επεκτάθηκαν καθ' ύψος του πέλματος. Κατά τη διάρκεια του τέταρτου κύκλου σταθερού εύρους μετατοπίσεων αναπτύχθηκαν ρωγμές στο σημείο του τοπικού λυγισμού της πρώτης δοκού. Οι ρωγμές αυτές μεγάλωσαν κατά τους επόμενους κύκλους με αποτέλεσμα μία από τις ρωγμές να διαπεράσει ολόκληρο το πάχος και το μισό του πλάτους του πέλματος της δοκού κατά τη διάρκεια του εικοστού κύκλου σταθερού εύρους μετατοπίσεων. Στο Σχήμα 5.20 φαίνεται μία από τις ρωγμές στα άκρα του πέλματος της δοκού στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη καθώς και η ρωγμή στο σημείο του τοπικού λυγισμού μετά το πέρας του πειράματος.



Σχήμα 5.20: Απαρχή ρηγμάτωσης πλησίον της συγκόλλησης (αριστερά) και στην περιοχή του τοπικού λυγισμού του πέλματος της δοκού (δεξιά)

Προκειμένου να βαθμονομηθούν και να διαπιστευθούν τα αποτελέσματα των αναλυτικών προσομοιωμάτων που θα ακολουθήσουν, όλα τα ανακυκλιζόμενα πειράματα εξετάστηκαν με τη διαδικασία που περιγράφηκε. Στο παράρτημα Γ περιέχεται το σύνολο των πειραματικών αποτελεσμάτων για τις συνδέσεις δοκού-υποστυλώματος. Το αποτέλεσμα των πειραματικών διερευνήσεων ως προς το συνολικό αριθμό κύκλων φόρτισης στον οποίο έχουμε την απαρχή ρηγμάτωσης φαίνεται στον Πίνακα 5.7.

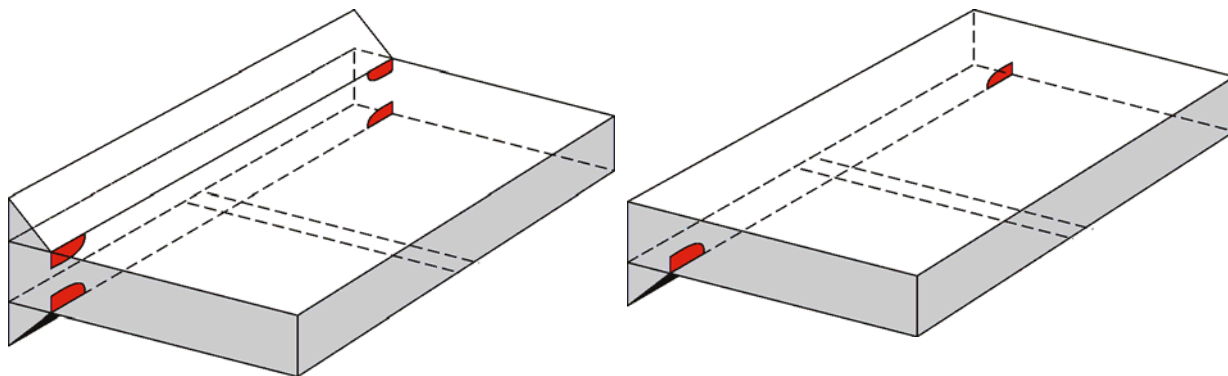
Πίνακας 5.7: Αριθμός κύκλων φόρτισης μέχρι την απαρχή ρηγμάτωσης του κόμβου δοκού-υποστυλώματος

	Χρονοϊστορία φόρτισης	Αριθμός κύκλων για απαρχή ρωγμής	
		Εξωραφές	Εσωραφές
Δοκοί HEA300	ECCS	9	9
	Ποσοστημόριο 95%	25	24
	Kobe	3	6
	Σταθερού εύρους 70mm	8	6
Δοκοί IPE500	ECCS	6	7
	Ποσοστημόριο 95%	14	23
	Σταθερού εύρους 50mm	10	8

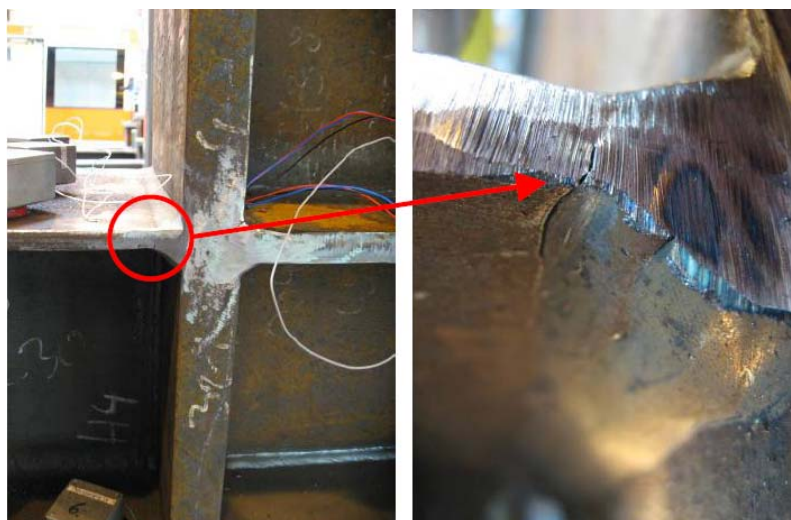
Είναι εμφανές ότι εξαιρουμένης της φόρτισης του ποσοστημρίου 95% στις συνδέσεις με δοκούς διατομής IPE500, δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις συγκολλήσεις με εσωραφές και εξωραφές.

Με βάση τα πειράματα των ανακυκλιζόμενων φορτίσεων παρατηρήθηκαν δύο τύποι ρωγμών.

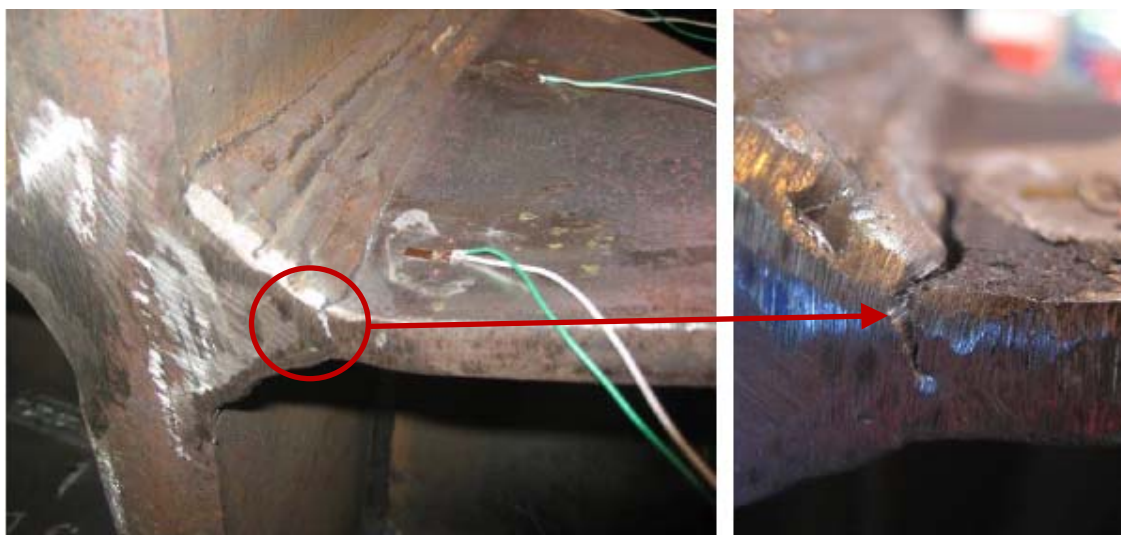
- i. **Τύπος I:** Η απαρχή της ρωγμής πραγματοποιείται στην περιοχή που βρίσκεται πλησίον της σύνδεσης της δοκού με το υποστύλωμα. Συγκεκριμένα στις περιπτώσεις των εξωραφών η ρηγμάτωση παρατηρήθηκε στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη και συγκεκριμένα στη διεπιφάνεια συγκόλλησης-μητρικού υλικού. Ρωγμές δημιουργήθηκαν τόσο στην άνω όσο και στην κάτω επιφάνεια των πελμάτων των δοκών. Ειδικά στην περίπτωση των εσωραφών, η ρηγμάτωση ξεκίνησε στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη στο σημείο που τελειώνει η συγκόλληση στην κάτω επιφάνεια του πέλματος της δοκού. Υπενθυμίζεται ότι στο σημείο αυτό προκειμένου να προφυλαχθεί η ρίζα της συγκόλλησης είχε προστεθεί εξωραφή κατά τη διαμόρφωση του κόμβου στο εργοστάσιο. Στο Σχήμα 5.21 φαίνεται σχηματικά το σημείο που δημιουργούνται αυτές οι ρωγμές. Τα Σχήματα 5.22 και 5.23 δείχνουν παραδείγματα ρηγμάτωσης όπως αποτυπώθηκαν κατά τις εργαστηριακές δοκιμές.



Σχήμα 5.21: Τυπικές τοποθεσίες δημιουργίας ρωγμών τύπου I. (αριστερά: λεπτομέρεια εξωραφής, δεξιά : λεπτομέρεια εσωραφής)



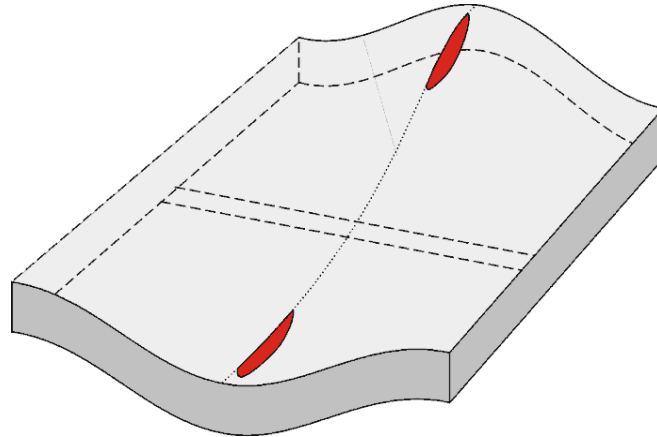
Σχήμα 5.22: Ρηγμάτωση στο σημείο της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης στην κάτω επιφάνεια του άνω πέλματος της δοκού για δοκίμιο με εσωραφή



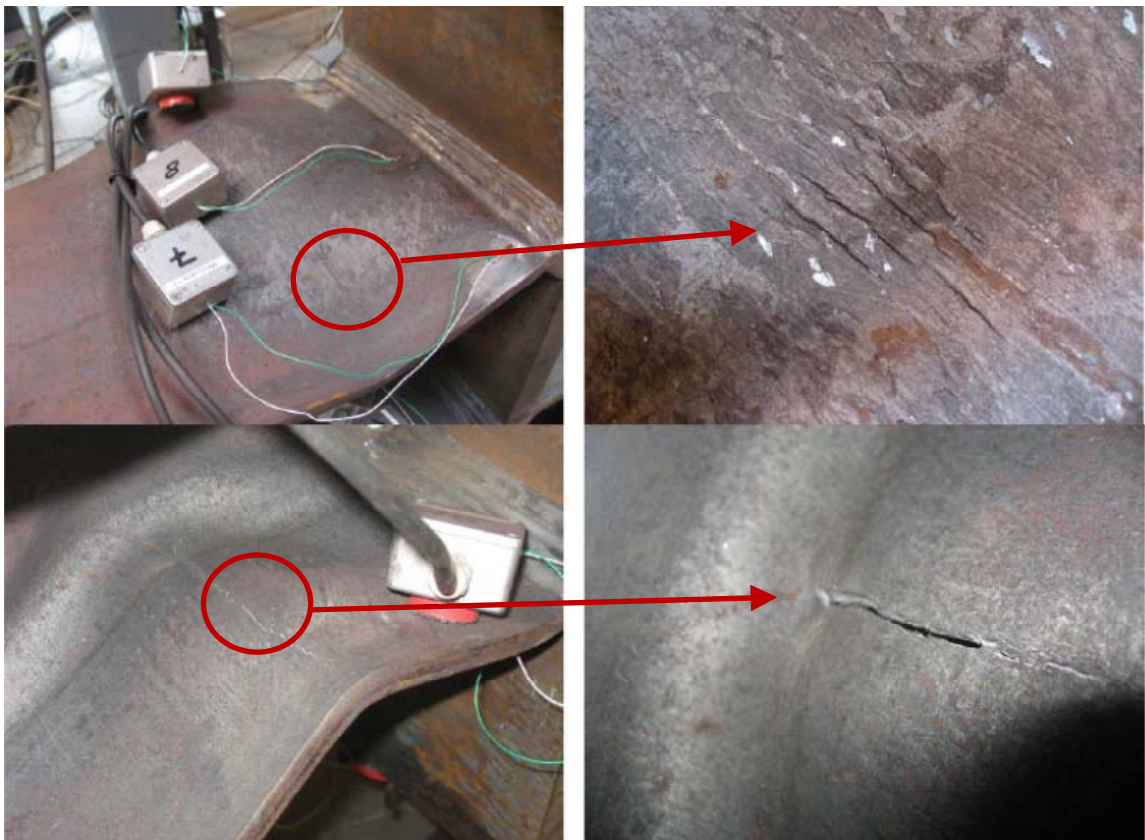
Σχήμα 5.23: Ρηγμάτωση στο σημείο της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης στην άνω επιφάνεια του άνω πέλματος της δοκού για δοκίμιο με εξωραφή

- ii. **Τύπος II:** Εμφάνιση ρωγμών παρατηρείται επίσης στις ζώνες μεγάλων πλαστικών παραμορφώσεων. Οι ρωγμές σχηματίζονται στο σημείο της εντονότερης καμπύλωσης του

πέλματος στην περιοχή της πλαστικής άρθρωσης. Εξαιτίας της ανακυκλιζόμενης φόρτισης οι ρωγμές σχηματίζονται τόσο στην εσωτερική όσο και στην εξωτερική επιφάνεια του άνω και κάτω πέλματος της δοκού. Στο Σχήμα 5.24 φαίνονται σχηματικά τα σημεία σχηματισμού ρωγμών στην περιοχή της πλαστικής άρθρωσης ενώ στο Σχήμα 5.25 παρουσιάζονται εικόνες από πειραματικά αποτελέσματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η απαρχή ρωγμών αυτού του τύπου παρατηρήθηκε στα δοκίμια με φόρτιση σταθερού και μεγάλου εύρους μετατοπίσεων ($\pm 70\text{mm}$).



Σχήμα 5.24: Τοποθεσία δημιουργίας ρωγμών τύπου II στο σημείο τοπικού λυγισμού του πέλματος της δοκού



Σχήμα 5.25: Ρωγμές στο σημείο σχηματισμού της πλαστικής άρθρωσης

5.5 Συμπεράσματα- Παρατηρήσεις

Από τη σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων μπορούν να γίνουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Αν και η γεωμετρία της πειραματικής διάταξης ήταν συμμετρική, αυτή τελικά δεν συμπεριφέρθηκε με συμμετρικό τρόπο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το τμήμα του υποστυλώματος είχε μικρό μήκος με αποτέλεσμα κατά την έναρξη τοπικού λυγισμού σε μία από τις δύο δοκούς, αυτό να παίρνει κλίση ξεφεύγοντας από την κατακόρυφη διεύθυνση όπως φαίνεται από τις εικόνες (Σχήμα 5.19) των πειραμάτων.
- Οι διαφορές στον τρόπο αστοχίας της σύνδεσης ανάλογα με τον τρόπο συγκόλλησης που είχε χρησιμοποιηθεί (εξωραφές ή εσωραφές) δεν ήταν μεγάλες. Παρόλα αυτά, παρατηρήθηκε ότι οι κόμβοι των οποίων οι συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο των εσωραφών υπόκεινται σε τοπικό λυγισμό με την πάροδο περισσότερων κύκλων φόρτισης σε σχέση με τα αντίστοιχα δοκίμια με εξωραφές.
- Τα δοκίμια των οποίων οι συγκολλήσεις πραγματοποιήθηκαν με εσωραφές, εμφάνισαν ρηγμάτωση με την πάροδο περισσότερων κύκλων φόρτισης σε σύγκριση με τους κόμβους των οποίων οι δοκοί συγκολλήθηκαν με τη μέθοδο των εξωραφών. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο φαινόμενο του τοπικού λυγισμού, ο οποίος αναγκάζει τις ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις στην κρίσιμη περιοχή της συγκόλλησης να αυξάνονται με μεγαλύτερο ρυθμό συγκριτικά με την περίπτωση που δεν έχει σχηματιστεί πλαστική άρθρωση. Επομένως καθώς ο τοπικός λυγισμός των διατομών των δοκών οι οποίες φέρουν εσωραφές ως μέσο σύνδεσης με το υποστυλώμα, εμφανίστηκε μετέπειτα του αντίστοιχου των δοκών με εξωραφές, η απαρχή της ρηγμάτωσης εμφανίζεται ομοίως με καθυστέρηση.
- Η διαφοροποίηση των πειραματικών αποτελεσμάτων μεταξύ εξωραφών και εσωραφών ως προς τον αριθμό των κύκλων φόρτισης εμφάνισης ρωγμών είναι μικρή εξαιτίας του γεγονότος ότι ακόμα και στις περιπτώσεις των εσωραφών, η κάτω επιφάνεια του πέλματος των δοκών φέρει εξωραφή, με αποτέλεσμα η απαρχή της ρηγμάτωσης να πραγματοποιείται στο σημείο που αυτή τελειώνει και συγκεκριμένα στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη. Σκοπός ύπαρξης αυτής της εξωραφής ήταν η προστασία της ρίζας της συγκόλλησης μετά την απομάκρυνση των βοηθητικών υποθεμάτων συγκόλλησης.

6 Αριθμητική διερεύνηση της συμπεριφοράς των συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος

6.1 Γενικά

Παράλληλα με τα πειράματα που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 5, αλλά και πριν τη διεξαγωγή αυτών, πραγματοποιήθηκε στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο εκτεταμένη αριθμητική διερεύνηση των συγκολλητών κόμβων δοκού-υποστυλώματος των πειραμάτων μέσω προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων με κύριους στόχους:

- Την αρχική διερεύνηση της συμπεριφοράς των συνδέσεων σύμφωνα με την πειραματική διάταξη που υιοθετήθηκε και την επιλογή δοκιμίων κατάλληλων διαστάσεων ώστε η αντοχή τους να μην υπερβαίνει τις δυνατότητες των μηχανημάτων που χρησιμοποιήθηκαν στο εργαστήριο του Πολυτεχνείου του Aachen.
- Τη βελτίωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων των προσομοιωμάτων, μέσω της σύγκρισης και προσαρμογής τους με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων, τόσο για τις μονοτονικές όσο και για ανακυκλιζόμενες φορτίσεις.
- Τη διερεύνηση της επίδρασης διαφορετικών γεωμετρικών λεπτομερειών στη συμπεριφορά της σύνδεσης, όπως οι διαφορετικοί τύποι συγκόλλησης, η ύπαρξη οπών στον κορμό της δοκού για την πραγματοποίηση της συγκόλλησης και η επιρροή του σχήματός τους στη μορφή αστοχίας του κόμβου, η παρουσία βοηθητικών υποθεμάτων στη ρίζα της συγκόλλησης τα οποία δεν έχουν αφαιρεθεί κλπ.
- Τη στοιχειοθέτηση μιας διαδικασίας μέσω της οποίας θα μπορεί να προσδιορίζεται η αντοχή μιας σύνδεσης σε όρους ρηγμάτωσης. Για την ανάπτυξη αυτής της διαδικασίας πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις σε πλήθος προσομοιωμάτων. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αποτυπώνονται τελικά σε διαγράμματα μέσω των οποίων είναι δυνατός ο υπολογισμός της απαρχής ρηγμάτωσης σε μια σύνδεση ανάλογα με τη χρονοϊστορία φόρτισής της.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων με χρήση μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων και η σύγκρισή τους με τα πειραματικά αποτελέσματα που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 5.

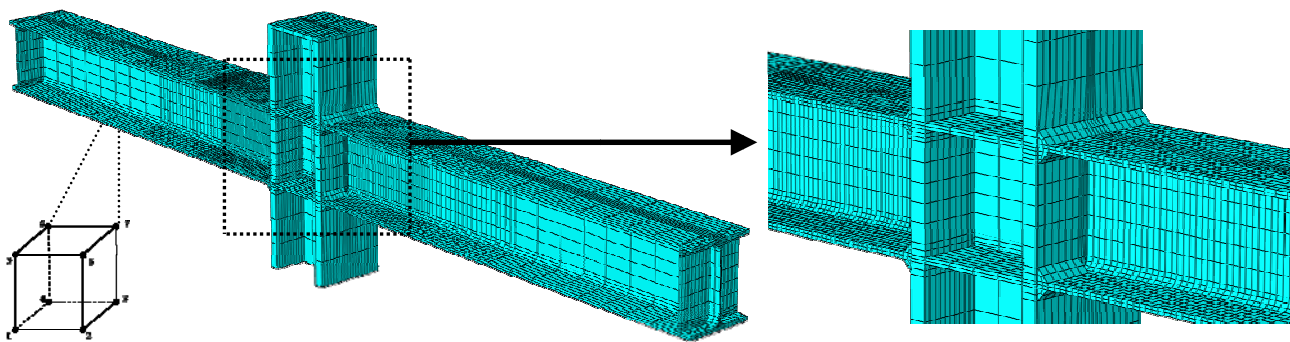
6.2 Διερεύνηση της συμπεριφοράς συγκολλητών συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

6.2.1 Γενικές πληροφορίες και χαρακτηριστικά των προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων

Η συμπεριφορά των συγκολλητών συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος εξετάστηκε εκτεταμένα μέσω αναλύσεων με τη βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων, τα αποτελέσματα των οποίων παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για τη μονοτονική και την ανακυκλιζόμενη απόκριση των κόμβων υπό διαφορετικές χρονοϊστορίες φόρτισης.

Οι αναλύσεις που παρουσιάζονται στη συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιήθηκαν με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS (έκδοση 6.7). Αρχικά το προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε περιελάμβανε τη μία από τις δύο δοκούς και τη μισή διατομή του

υποστυλώματος καθώς η πειραματική διάταξη είναι συμμετρική. Στη συνέχεια και μετά το πρώτο πείραμα έγινε αντιληπτό πως εξαιτίας του τοπικού λυγισμού που λαμβάνει χώρα στα πέλματα των δοκών κατά την πλαστικοποίηση των διατομών, το υποστύλωμα ξεφεύγει από την κατακόρυφη διεύθυνση και υπόκειται σε κλίση με αποτέλεσμα η απόκριση της διάταξης να μην είναι συμμετρική. Ο τοπικός λυγισμός της δοκού δεν εμφανίστηκε ταυτόχρονα με τη διαρροή της σύνδεσης αλλά μετά την πάροδο διαφορετικού κάθε φορά κύκλων φόρτισης. Ωστόσο, μετά τη μετατόπιση διαρροής, η έντονη κλίση της διατομής του υποστυλώματος ($>1^\circ$) είχε ως αποτέλεσμα ο τοπικός λυγισμός να επέρχεται νωρίτερα από το αναμενόμενο καθώς η στροφή του κόμβου ήταν συνάρτηση τόσο του φορτίου, όσο και της απόκλισης του υποστυλώματος από την κατακόρυφη διεύθυνση. Τελικά επιλέχθηκε να προσομοιωθεί ολόκληρη η πειραματική διάταξη προκειμένου να ληφθεί υπόψη η γωνία κλίσης που σχηματίζεται μεταξύ του υποστυλώματος και της κατακόρυφου. Τα πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τρισδιάστατα εξαεδρικά 8 κόμβων, τύπου “C3D8R” προκειμένου να μπορούν να προσομοιωθούν τα φαινόμενα του τοπικού λυγισμού με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια. Στο Σχήμα 6.1 φαίνεται ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε κατά την ανάλυση των συνδέσεων.



Σχήμα 6.1: Δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων για τους κόμβους δοκού-υποστυλώματος

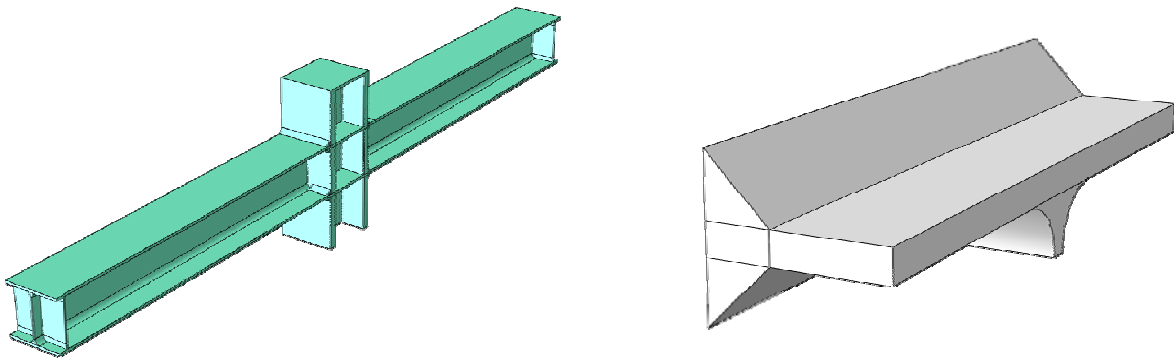
Οι φορτίσεις επιβάλλονται με τη μορφή κατακόρυφης μετατόπισης στο άνω τμήμα της διατομής του υποστυλώματος στο σημείο που επιδρά το έμβολο. Το υποστύλωμα δεσμεύεται κατά την εγκάρσια διεύθυνση ώστε να προσομοιωθούν οι αντίστοιχες δεσμεύσεις που έχουν προβλεφθεί στα εργαστηριακά πειράματα. Στο δοκίμιο του Σχήματος 6.1 υπάρχει επίσης δέσμευση της εγκάρσιας και κατακόρυφης μετακίνησης των άκρων των δοκών στα σημεία που αυτή υποστηρίζεται, ενώ έχουν ληφθεί υπόψη τα φαινόμενα δευτέρας τάξεως ώστε να αναπαραχθούν με ακρίβεια οι περιπτώσεις τοπικού λυγισμού που έχουν παρατηρηθεί σε όλα σχεδόν τα πειράματα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1 η διακριτοποίηση είναι πυκνότερη κοντά στη συγκόλληση δοκού-υποστυλώματος ώστε να προσομοιωθεί με τον ακριβέστερο δυνατό τρόπο το σημείο και το σχήμα της πλαστικής άρθρωσης που δημιουργείται.

Η περιοχή που βρίσκεται περιμετρικά της συγκόλλησης δοκού-υποστυλώματος και στην οποία εμφανίζεται αρχικά η ρηγμάτωση του δοκιμίου αναλύθηκε με μεγαλύτερη ακρίβεια. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε η τεχνική των υποφορέων που υπάρχει ως επιλογή στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Σύμφωνα με την τεχνική αυτή η κρίσιμη περιοχή, που στις περισσότερες περιπτώσεις βρίσκεται πλησίον της διεπιφάνειας δοκού-υποστυλώματος, απομονώνεται από το ολικό μοντέλο και υποβάλλεται σε νέα ανάλυση. Οι υποφορείς χρησιμοποιούνται για την ακριβέστερη μελέτη λεπτομερειών του συνολικού μοντέλου με τη βοήθεια πυκνότερης διακριτοποίησης. Τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει κατά την αρχική ανάλυση του ολικού μοντέλου, το οποίο χαρακτηρίζεται από πιο αραιή διακριτοποίηση, χρησιμοποιούνται ως δεδομένα της νέας ανάλυσης. Η σύνδεση μεταξύ του υποφορέα και του ολικού μοντέλου, γίνεται μέσω μεταφοράς των μεταβλητών των μετακινήσεων και των στροφών που εξαρτώνται από το χρόνο και

οι οποίες προέκυψαν κατά την αρχική ανάλυση, στους αντίστοιχους συνοριακούς κόμβους του υποφορέα.

Επομένως, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, μετά την ανάλυση του καθολικού μοντέλου κατασκευαζόταν κάθε φορά ένα νέο το οποίο περιελάμβανε μόνο την περιοχή της συγκόλλησης. Κατά την ανάλυση του καθολικού μοντέλου της σύνδεσης καταγράφονταν οι μετατοπίσεις των κόμβων στα όρια της περιοχής η οποία θα αποτελούσε στη συνέχεια τον υποφορέα. Οι μετατοπίσεις αυτές χρησιμοποιούνταν ως συνοριακές συνθήκες για την απόκριση των κόμβων στην εξωτερική περίμετρο του υποφορέα. Οι μετακινήσεις δηλαδή των κόμβων στα άκρα του υποφορέα καθορίζονται από τις μετακινήσεις των αντίστοιχων κόμβων στο μοντέλο ολόκληρης της σύνδεσης το οποίο αναλύεται πρώτο. Το σύνολο των καθοδηγούμενων αυτών κόμβων μαζί με πιθανά νέα φορτία που θα ασκηθούν στην περιοχή του υποφορέα καθορίζουν και την επίλυση του προβλήματος. Το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιούνται στην κρίσιμη περιοχή, η οποία στην περίπτωση της παρούσας εργασίας είναι είτε η περιοχή της συγκόλλησης δοκού-υποστυλώματος είτε η περιοχή του τοπικού λυγισμού στο πέλμα της δοκού, είναι $0,1 \times 0,1 \times 0,1 \text{ mm}$, το οποίο είναι όμοιο με το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων επιφανείας που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εξαγωγή της καμπύλης βλάβης. Το μέγεθος αυτό αντικατοπτρίζει το χαρακτηριστικό μήκος που προσδιορίστηκε για τον υπό εξέταση χάλυβα. Η χρήση της τεχνικής αυτής επιτρέπει τη λεπτομερέστερη ανάλυση της κρίσιμης περιοχής χωρίς το υπολογιστικό κόστος που θα είχαμε με χρήση πυκνού δικτύου πεπερασμένων στοιχείων στο αρχικό μοντέλο.

Στο Σχήμα 6.2 φαίνεται το αριθμητικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την περίπτωση ενός κόμβου δοκού-υποστυλώματος με χρήση δοκών διατομής HEA300 οι οποίες έχουν συγκολληθεί με τη βοήθεια εξωραφών στο υποστυλώμα καθώς και ο αντίστοιχος υποφορέας της κρίσιμης περιοχής της συγκόλλησης. Ανάλογα μοντέλα δημιουργήθηκαν για όλες τις πειραματικές διατάξεις που αναλύθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 6.2: Αναλυτικά μοντέλα για ολόκληρη τη σύνδεση (αριστερά) και την κρίσιμη περιοχή της συγκόλλησης (δεξιά)

Σε πρώτη φάση, δημιουργήθηκαν τα προσομοιώματα των κόμβων που εξετάστηκαν πειραματικά στο Πολυτεχνείο του Aachen, έτσι ώστε να προσδιοριστούν οι παράμετροι των αριθμητικών μοντέλων για τις οποίες υπάρχει σύγκλιση μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων και να αποκτήσουν οι αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων την απαραίτητη αξιοπιστία. Κατά συνέπεια εξετάστηκαν οι δύο διατάξεις συγκολλητών κόμβων δοκού-υποστυλώματος με διαφορετικές διατομές δοκών HEA300 και IPE500, καθώς και οι δύο διαφορετικές μορφές συγκόλλησης που χρησιμοποιήθηκαν, δηλαδή εξωραφές και εσωραφές. Οι τύποι των πειραματικών διατάξεων που χρησιμοποιήθηκαν έχουν ήδη περιγραφεί και παρατίθενται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 5.2.

Στη συνέχεια και αφού είχε πιστοποιηθεί η αξιοπιστία των αριθμητικών προσομοιωμάτων, χρησιμοποιήθηκαν ιστορικά φορτίσεως τα οποία δεν αποτελούσαν προϊόν ανάλογων πειραμάτων.

Επιπλέον, μελετήθηκαν γεωμετρικές λεπτομέρειες της σύνδεσης οι οποίες επηρεάζουν τη συμπεριφορά της, όπως η ύπαρξη βοηθητικών οπών στον κορμό της δοκού για τη συγκόλληση των πελμάτων της δοκού στο πέλαμα του υποστυλώματος καθώς και της παρουσίας μεταλλικών υποθεμάτων συγκόλλησης στις κάτω επιφάνειες των πελμάτων των δοκών. Μέσω των αναλύσεων προκύπτουν κατάλληλες γεωμετρικές διατάξεις οι οποίες ελαχιστοποιούν την επίδραση των λεπτομερειών αυτών στη συμπεριφορά των κόμβων δοκού-υποστυλώματος.

Σημειώνεται ότι οι χρονοϊστορίες φόρτισης που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων δεν περιείχαν τους κύκλους φόρτισης με πλάτος μικρότερο από την μετατόπιση διαρροής, αλλά μόνο εκείνους οι οποίοι μπορούσαν να προκαλέσουν πλαστικοποίηση της σύνδεσης. Ο βασικός σκοπός αυτής της απλούστευσης, η οποία θα περιγραφεί αναλυτικότερα στη συνέχεια, ήταν η μείωση των υπολογιστικών απαιτήσεων, αφού πρώτα εξακριβώθηκε η μικρή επίδραση που είχε η παράλειψη των ελαστικών κύκλων φόρτισης στην τελική αστοχία της σύνδεσης.

6.2.2 Σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων – Μονοτονική φόρτιση

Οι μονοτονικές φορτίσεις ήταν αυτές που προηγήθηκαν χρονικά και για το λόγο αυτό ήταν οι πρώτες στις οποίες πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων. Με βάση αυτή τη σύγκριση έγινε δυνατή η επιβεβαίωση της αξιοπιστίας του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων καθώς και η κατάλληλη πύκνωση του δικτύου που θα οδηγούσε σε ορθή απεικόνιση της συμπεριφοράς του κόμβου. Ως αποτέλεσμα, για τον προσδιορισμό των βασικών ιδιοτήτων της σύνδεσης, όπως η αντοχή στη διαρροή, η αντοχή στην αστοχία και η δυσκαμψία της, αποδείχθηκε ότι η μονοτονική φόρτιση δίνει επαρκή αποτελέσματα.

Επομένως, με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα των μονοτονικών φορτίσεων αναπτύχθηκαν τα αντίστοιχα προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων, με χρήση των οποίων έγινε δυνατή η αναπαραγωγή των πειραμάτων αριθμητικά. Συνοπτικά οι βασικές ιδιότητες των προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων είναι οι εξής:

- Χρήση του προσομοιώματος ολόκληρης της σύνδεσης χωρίς να γίνεται εκμετάλλευση της διπλής συμμετρίας του κόμβου στις δύο του διευθύνσεις.
- Νόμος τάσεων-παραμόρφωσης του χάλυβα για τη σύνδεση σύμφωνα με τις τιμές του Πίνακα 6.1. Οι τιμές αυτές προέκυψαν από πειράματα εφελκυσμού σε δοκίμια που παρήχθησαν από αντίστοιχες διατομές της σύνδεσης. Οι τιμές του Πίνακα 6.1 αφορούν μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία $+20^{\circ}\text{C}$, καθώς αυτή ήταν και η θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα των κόμβων. Μετρήσεις του νόμου τάσεων-παραμορφώσεων σε διαφορετικές θερμοκρασίες έχουν ήδη περιγραφεί στον Πίνακα 3.1.
- Πλευρικές στηρίξεις στη διατομή του υποστυλώματος, κατ' αντιστοιχία με τα δοκίμια των πειραμάτων, ώστε να αποφευχθεί η πλευρική μετακίνηση του κόμβου εκτός του επιπέδου του.
- Δέσμευση των κατακόρυφων και πλευρικών βαθμών ελευθερίας στα άκρα των δοκών στο σημείο στήριξής τους.
- Φόρτιση του κόμβου δοκού-υποστυλώματος μέσω επιβολής κατακόρυφων μετατοπίσεων στην κορυφή του υποστυλώματος, στο σημείο δράσης του εμβόλου.

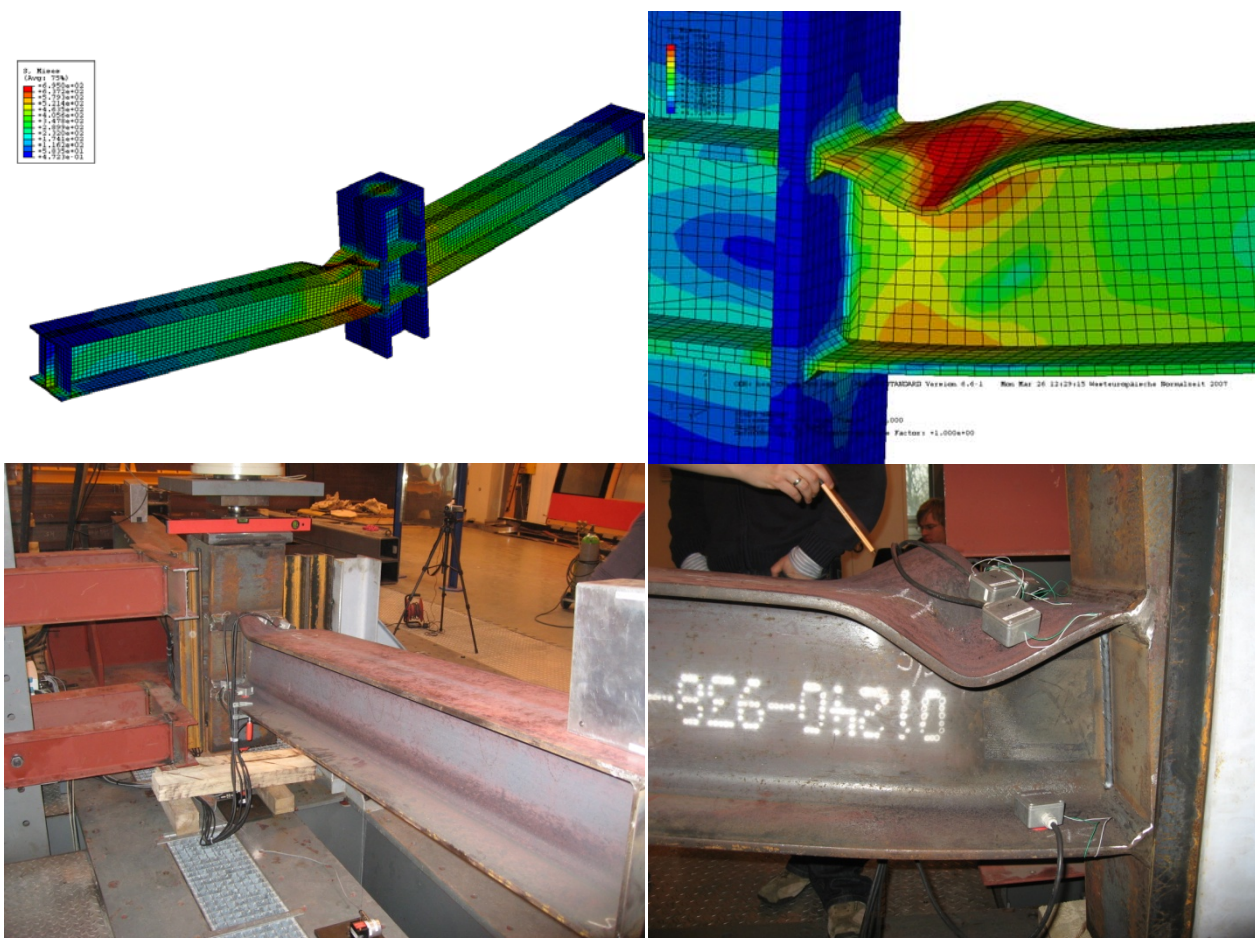
- Χρήση εξαεδρικών, οκτακομβικών πεπερασμένων στοιχείων με πύκνωση της διακριτοποίησης στα κρίσιμα σημεία που αναμένεται τοπικός λυγισμός της δοκού.
- Χρήση υποφορέων με σκοπό τη λεπτομερέστερη ανάλυση της περιοχής συγκόλλησης της διατομής της δοκού στο υποστύλωμα και της περιοχής του τοπικού λυγισμού του πέλματος της δοκού, που παρατηρείται η απαρχή ρηγμάτωσης του κόμβου.

Πίνακας 6.1: Ιδιότητες χάλυβα για τις πειραματικές και αριθμητικές διερευνήσεις σε θερμοκρασία +20°C

Χάλυβας	Τάση Διαρροής [MPa]	Τάση Αστοχίας [MPa]	Ανηγγμένη Παραμόρφωση Αστοχίας [%]	Μέτρο Ελαστικότητας [MPa]
HEA300 (S355J2)	447,0	520,0	33,0	201205
IPE500 (S355J2)	410,0	513,8	35,3	203471
HEA300 (S460M)	536,6	604,3	28,8	199402
IPE500 (S460M)	441,3	533,8	35,5	204653
Λόγος Poisson: $\nu=0,3$				

Στο Σχήμα 6.3 φαίνεται η σύνδεση δοκού-υποστυλώματος στην παραμορφωμένη της κατάσταση τόσο κατά την εκτέλεση του πειράματος όσο και κατά τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων με απεικόνιση των τάσεων von Mises. Στο Σχήμα 6.3 διακρίνεται επίσης ο μηχανισμός αστοχίας του κόμβου ο οποίος περιγράφεται στη συνέχεια.

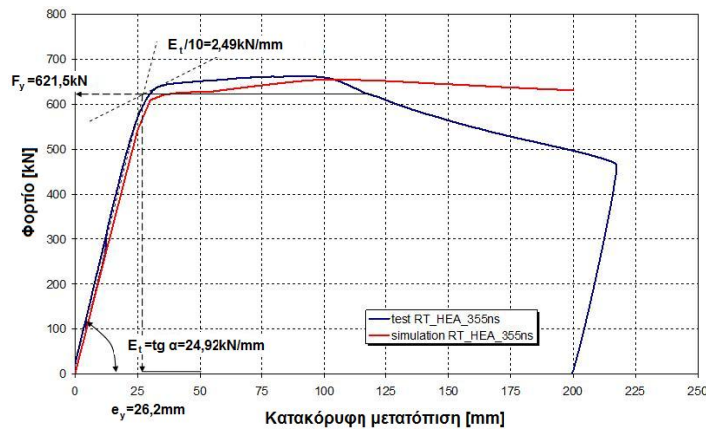
- α) Σχηματισμός πρώτης πλαστικής άρθρωσης στη μία από τις δύο δοκούς, κατάσταση που αντιστοιχεί στο σημείο μετά τη διαρροή της καμπύλης φορτίου-παραμόρφωσης (Σχήμα 6.4).
- β) Τοπικός λυγισμός των πέλματων της δοκού που διέρρευσε πρώτη σε απόσταση 25-35cm από την επιφάνεια του πέλματος του υποστυλώματος.
- γ) Πλαστικοποίηση και της δεύτερης δοκού χωρίς τη δημιουργία τοπικού λυγισμού στο πέλαμα της.
- δ) Εκτροπή της διατομής του υποστυλώματος από την κατακόρυφη διεύθυνση εξαιτίας του τοπικού λυγισμού της δοκού. Η κλίση της διατομής του υποστυλώματος μεγαλώνει καθώς αυξάνεται το φορτίο.
- ε) Επέκταση των πλαστικών ζωνών με σημαντικές παραμορφώσεις της μιας εκ των δύο δοκών εξαιτίας του τοπικού λυγισμού, κατάσταση που αντιστοιχεί στο σχεδόν οριζόντιο τμήμα της καμπύλης φορτίου-παραμόρφωσης του κόμβου (Σχήμα 6.4).



Σχήμα 6.3: Αποτέλεσμα παραμόρφωσης και εντατικής κατάστασης (τάσεις von Mises) του κόμβου δοκού-υποστυλώματος RT-HEA-355ns υπό μονοτονική φόρτιση.

Στο Σχήμα 6.4 παρατίθεται η πειραματική καμπύλη φορτίου-κατακόρυφης μετατόπισης για τη μονοτονική φόρτιση του δοκιμίου RT-HEA-355ns. Επίσης παρουσιάζεται η καμπύλη που προκύπτει από την ανάλυση με τη βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων του ολικού φορέα της σύνδεσης δοκού-υποστυλώματος. Όπως διαπιστώνεται η προσέγγιση της πειραματικής συμπεριφοράς από το προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων είναι ικανοποιητική καθώς το φορτίο αυξάνεται γραμμικά έως ότου πραγματοποιηθεί διαρροή της διατομής της δοκού. Πιο συγκεκριμένα, η αρχική δυσκαμψία του κόμβου είναι σχεδόν πανομοιότυπη τόσο στα πειράματα όσο και στις αναλυτικές προσεγγίσεις, ενώ στη συνέχεια το φορτίο αυξάνεται με μικρότερο ρυθμό. Μετά τα 100mm κατακόρυφης μετατόπισης το θλιβόμενο πέλμα της δοκού υπόκειται σε τοπικό λυγισμό. Μια μικρή απόκλιση των αποτελεσμάτων προκύπτει μετά την πλαστικοποίηση και της δεύτερης δοκού καθώς το φορτίο των πειραματικών διερευνήσεων μειώνεται με γρηγορότερο ρυθμό σε σχέση με την ανάλυση. Το πείραμα τερματίστηκε στα 200mm κατακόρυφης μετατόπισης εξαιτίας της έντονης κλίσης που είχε υποστεί το δοκίμιο του υποστυλώματος.

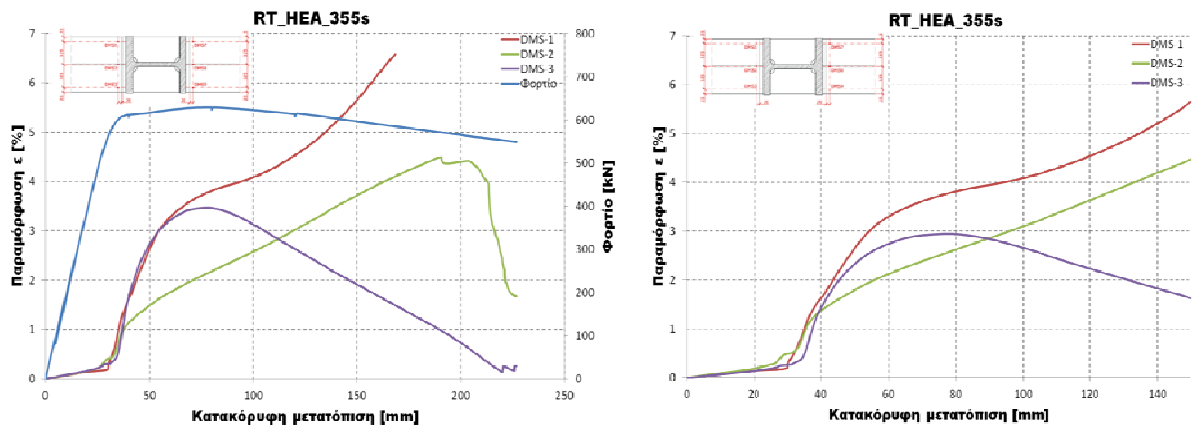
Το φορτίο διαρροής υπολογίστηκε στα $F_y=621,5\text{kN}$ ενώ η παραμόρφωση διαρροής στα $e_y=26,2\text{mm}$ σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ορίζονται από την ECCS [83]. Το μέγιστο φορτίο αντοχής του κόμβου δοκού-υποστυλώματος διαμορφώνεται στα 662,0kN για κατακόρυφη παραμόρφωση 91,0mm. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.4 η καμπύλη που προκύπτει με χρήση των πεπερασμένων στοιχείων από το ολικό μοντέλο της σύνδεσης, συμβαδίζει επαρκώς με τα πειραματικά αποτελέσματα μέχρι τα 100,0mm κατακόρυφης μετατόπισης.



Σχήμα 6.4: Σύγκριση πειραματικής και αναλυτικής καμπύλης αξονικής δύναμης-παραμόρφωσης του δοκιμίου RT-HEA-355ns υπό μονοτονική φόρτιση.

Παρόμοια ήταν τα αποτελέσματα σε όλες τις υπόλοιπες συγκρίσεις μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών προσομοιωμάτων για τις μονοτονικές φορτίσεις των κόμβων. Η θέση σχηματισμού της πλαστικής άρθρωσης ήταν όμοια ανάμεσα στα πειράματα και την ανάλυση, ενώ η γεωμετρία του τοπικού λυγισμού των πέλματων της δοκού ήταν σύμφωνη με τη μορφή παραμόρφωσης που παρατηρήθηκε στα πειράματα. Το ιστορικό φόρτισης των ανακυκλιζόμενων φορτίσεων, τα οποία θα παρουσιαστούν στη συνέχεια δεν ξεπερνά τα 100mm κατακόρυφης μετατόπισης, σημείου που έχουμε σύγκλιση μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων στην περίπτωση των μονοτονικών φορτίσεων.

Στο Σχήμα 6.5 φαίνονται οι τιμές των ανηγμένων παραμορφώσεων όπως αυτές καταγράφονται από τα ηλεκτρονικά μηκυνσιόμετρα που υπάρχουν στις αντίστοιχες θέσεις των πειραματικών διατάξεων. Ταυτόχρονα καταγράφονται οι ανηγμένες παραμορφώσεις από το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων στις αντίστοιχες θέσεις. Από τη σύγκριση αυτών των αποτελεσμάτων φαίνεται ότι τα αριθμητικά προσομοιώματα καταγράφουν με επαρκή ακρίβεια τις τιμές των ανηγμένων παραμορφώσεων σε σχέση με τις πραγματικές τιμές των πειραματικών μετρήσεων. Από το σχήμα των καμπυλών προκύπτει το συμπέρασμα ότι αρχικά και ενώ η διατομή της δοκού βρίσκεται στην ελαστική περιοχή, οι τιμές των παραμορφώσεων αυξάνονται γραμμικά και με αργό ρυθμό, ενώ μετά την πλαστικοποίηση της διατομής οι τιμές αυξάνονται γρηγορότερα και στις τρεις περιοχές που παρουσιάζονται στο διάγραμμα. Η αύξηση μάλιστα είναι εντονότερη στα άκρα του πέλματος της δοκού, όπου εξαιτίας του τοπικού λυγισμού οι τιμές των παραμορφώσεων είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες στο μέσο του πέλματος.



Σχήμα 6.5: Σύγκριση των ανηγμένων παραμορφώσεων της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία (δεξιά) με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα (αριστερά) για την περίπτωση του RT-HEA-355ns

Παρόμοιες αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για τις υπόλοιπες διατάξεις με χρήση δοκών διατομής IPE500 οι οποίες συνδέονται με το υποστύλωμα με τη βοήθεια είτε εξωραφών είτε εσωραφών καθώς και για την περίπτωση των συνδέσεων στις οποίες ο χάλυβας είναι ποιότητας S460M. Για την ανάγκη των ανακυκλιζόμενων φορτίσεων που θα αναλυθούν στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά ποιότητα χάλυβα S355J2. Όλα τα αποτελέσματα των αριθμητικών διερευνήσεων προσομοίωσαν σε ικανοποιητικό βαθμό την πραγματική συμπεριφορά των συνδέσεων όπως αυτή καταγράφηκε στις πειραματικές δοκιμές, τόσο σε ότι αφορά τα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης όσο και στο σχήμα και τη θέση του τοπικού λυγισμού των πελμάτων των δοκών της σύνδεσης.

6.2.3 Σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων-Ανακυκλιζόμενες φορτίσεις

6.2.3.1 Χρονοϊστορίες φόρτισης

Τις μονοτονικές φορτίσεις και την αριθμητική επεξεργασία αυτών, ακολούθησαν φορτίσεις ανακυκλιζόμενης φύσεως στους συγκολλητούς κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων. Οι χρονοϊστορίες φόρτισης που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα έχουν ήδη περιγραφεί στους Πίνακες 5.6 και 5.7 για τις δοκούς διατομής HEA300 και IPE500 αντίστοιχα. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ των πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων ενός κόμβου με δοκούς διατομής HEA300 οι οποίοι συνδέονται με το υποστύλωμα μέσω εξωραφών και ο οποίος υπόκειται σε φόρτιση σύμφωνα με το ποσοστημόριο 95% των αποτελεσμάτων των αναλύσεων που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 4. Τα αποτελέσματα των υπόλοιπων αναλύσεων περιέχονται στο Παράρτημα Δ.

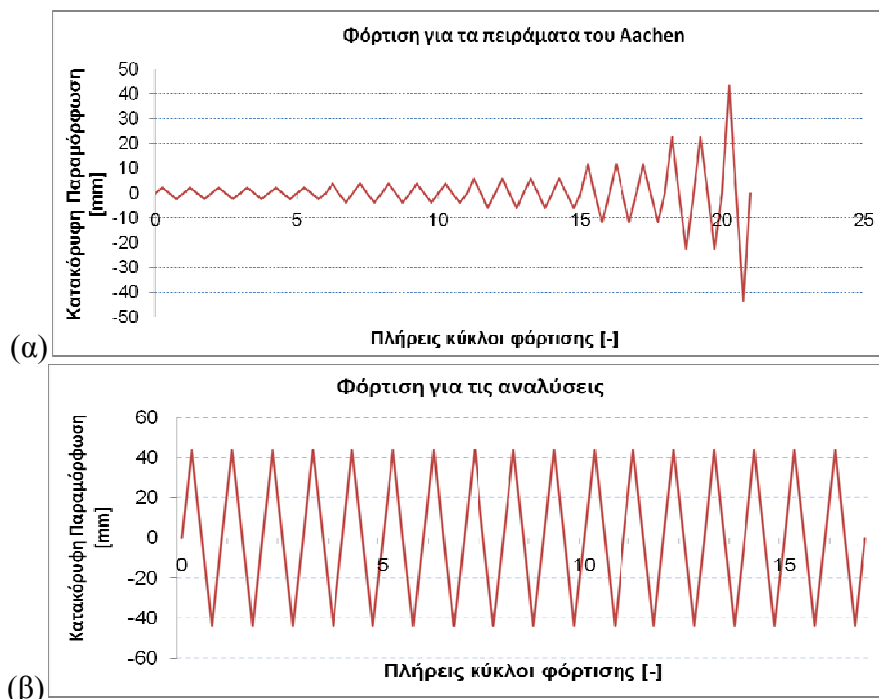
Το πρώτο ανακυκλιζόμενο πείραμα το οποίο πραγματοποιήθηκε ακολουθούσε τη χρονοϊστορία φόρτισης σύμφωνα με τις προδιαγραφές της ECCS [83] ωστόσο στη συνέχεια περιγράφονται τα αποτελέσματα του δεύτερου πειράματος το οποίο είχε ως χρονοϊστορία φόρτισης το ποσοστημόριο 95% όλων των αναλύσεων των κτιρίων που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 4, καθώς είναι αντιπροσωπευτικό των φαινομένων που παρατηρήθηκαν σε όλα σχεδόν τα πειράματα και τις αναλύσεις τους. Στον Πίνακα 6.2 φαίνεται η χρονοϊστορία φόρτισης που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα και τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων.

Πίνακας 6.2: Χρονοϊστορία φόρτισης για το RT-HEA-355ns 03

Αριθμός κύκλων φόρτισης	Κατακόρυφη μετατόπιση		Σχετική μετατόπιση ορόφων (%)
	Σύμφωνα με το δy	mm	
6	0.09 δy	2.3	0.115
5	0.15 δy	3.8	0.19
4	0.23 δy	5.9	0.295
3	0.44 δy	11.5	0.575
2	δy	22.6	1.13
1	1.93 δy	43.6	2.18

Στο Σχήμα 6.6 παρουσιάζονται οι φορτίσεις που εφαρμόστηκαν στην πειραματική και την αριθμητική διάταξη αντίστοιχα. Η διαφορά των φορτίσεων της ανάλυσης και του πειράματος έγκειται στο γεγονός ότι κατά την αριθμητική διαδικασία αμελούνται οι πρώτοι κύκλοι με μετατοπίσεις μικρότερες από την παραμόρφωση διαρροής $\delta_y=26,2\text{mm}$. Στο Σχήμα 6.6(α) παρουσιάζεται ένα ιστορικό κύκλων φόρτισης που εφαρμόστηκε στην πειραματική διάταξη. Η συγκεκριμένη χρονοϊστορία φόρτισης επαναλήφθηκε δεκαεπτά φορές, μέχρις ότου να παρατηρηθεί ρηγμάτωση στη σύνδεση. Αντίθετα, στο Σχήμα 6,6(β) αποτυπώνονται οι κύκλοι φόρτισης που εισήχθησαν στην ανάλυση και οι οποίοι αποτελούνται μόνο από τους κύκλους με τη μέγιστη μετατόπιση των 43,6mm που είναι και οι μοναδικοί με εύρος μεγαλύτερο από την παραμόρφωση διαρροής. Η παραδοχή αυτή πραγματοποιήθηκε καθώς μετά από αναλύσεις έγινε αντιληπτό ότι οι μετατοπίσεις με εύρος μικρότερο της μετατόπισης διαρροής επηρεάζουν σε πολύ μικρό βαθμό τη διαδικασία της ρηγμάτωσης στο χάλυβα υπό συνθήκες υπέρ-ολιγοκυκλικής κόπωσης. Επιπλέον, με την παραδοχή αυτή απλοποιείται το προσομοίωμα και εξοικονομείται υπολογιστικός χρόνος. Ειδικά κατά την εξέταση των υποφορέων οι επιπρόσθετοι κύκλοι φόρτισης έχουν μεγάλο αντίκτυπο στον υπολογιστικό χρόνο καθώς ο μεγάλος αριθμός πεπερασμένων στοιχείων καθιστά την ανάλυση εξαιρετικά χρονοβόρα. Δεδομένου και του αριθμού των αναλύσεων για τις διαφορετικές γεωμετρίες που έπρεπε να πραγματοποιηθούν, κάτι τέτοιο κρίθηκε ασύμφορο και έτσι αφού εξακριβώθηκε ότι η εισαγωγή κύκλων φόρτισης με πλάτος μικρότερο του πλάτους διαρροής δεν διαφοροποιούσε σημαντικά τα αποτελέσματα, επιλέχθηκε η τροποποιημένη φόρτιση για όλες τις αναλύσεις.

Η επαλήθευση της μικρής επίδρασης που έχουν οι κύκλοι φόρτισης με εύρος μετατόπισης μικρότερο του αντίστοιχου της διαρροής φαίνεται από τις τιμές των πλαστικών παραμορφώσεων που καταγράφονται κατά τις αναλύσεις. Συγκεκριμένα, οι ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις στους κύκλους με εύρος μικρότερο της μετατόπισης διαρροής παραμένουν σχεδόν σταθερές και ίσες προς την τιμή που έχουν αποκτήσει κατά τον πλαστικό κύκλο μετατόπισης που έχει προηγηθεί, ο οποίος για το παράδειγμα που περιγράφεται είναι ο μέγιστος κύκλος των 43,6mm κατακόρυφης μετατόπισης.

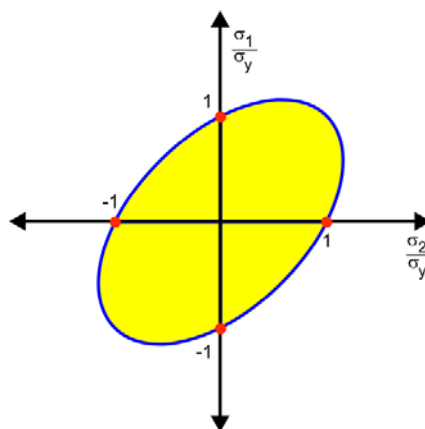


Σχήμα 6.6: Ανακυκλιζόμενο ιστορικό φόρτισης (α) για τις πειραματικές διερευνήσεις και (β) για τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων

6.2.3.2 Νόμος υλικού

Προκειμένου να μελετηθούν οι επιδράσεις της ανακυκλιζόμενης φόρτισης στην απαρχή της ρηγμάτωσης σε συγκολλητούς κόμβους δοκού-υποστυλώματος, ο νόμος του υλικού που χρησιμοποιήθηκε δεν βασιζόταν σε ένα απλό διγραμμικό μοντέλο τάσεων-παραμορφώσεων. Η ανάγκη λεπτομερούς καταγραφής της συμπεριφοράς του υλικού οδήγησε στη χρησιμοποίηση του κριτηρίου διαρροής von Mises σε συνεργασία με κριτήρια που λαμβάνουν υπόψη τους την κράτυνση του υλικού εξαιτίας των ανακυκλίσεων.

Σύμφωνα με το κριτήριο von Mises η έναρξη πλαστικοποίησης σε ένα σημείο του υλικού πραγματοποιείται όταν η αποθηκευμένη ενέργεια διατμητικής παραμόρφωσης στο σημείο αυτό λάβει μια συγκεκριμένη τιμή. Στο Σχήμα 6.7 φαίνεται το όριο διαρροής του κριτηρίου για την περίπτωση της μονοαξονικής καταπόνησης το οποίο αποτελείται από μια κυλινδρική επιφάνεια στην περιφέρεια της οποίας πραγματοποιείται η διαρροή του υλικού.



Σχήμα 6.7: Προβολή του κριτηρίου διαρροής von Mises στο επίπεδο του σ_1 και σ_2 .

Έχει παρατηρηθεί ότι κατά τη διάρκεια εναλλαγών της κατεύθυνσης φόρτισης το σχήμα της επιφάνειας διαρροής διαφοροποιείται, γεγονός που περιγράφεται με χρήση των νόμων κράτυνσης του υλικού. Ένα από τα προβλήματα που πρέπει να επιλύσει η κράτυνση του υλικού είναι η εύρεση του τρόπου εναλλαγής του σχήματος της επιφάνειας διαρροής. Ανάλογα με το νόμο κράτυνσης που χρησιμοποιείται, αλλάζει και η απόκριση του υλικού μετά την διαρροή. Οι πιο συνήθεις νόμοι κράτυνσης που χρησιμοποιούνται για το χάλυβα είναι η ισότροπη και η κινηματική κράτυνση καθώς και ο συνδυασμός τους.

Σύμφωνα με την ισότροπη κράτυνση, η επιφάνεια διαρροής διαστέλλεται (ή συρρικνώνεται) αλλά δεν εκτελεί μεταφορική κίνηση κατά την πλαστική παραμόρφωση του υλικού. Το φαινόμενο αυτό φαίνεται γραφικά στο Σχήμα 6.8 καθώς ενώ το μέγεθος της επιφάνειας διαρροής αυξάνεται ομοιόμορφα, το κέντρο της παραμένει σταθερό κατά τη διάρκεια της πλαστικοποίησης του υλικού.

Η ισότροπη κράτυνση $\bar{\sigma}$ περιγράφεται ως συνάρτηση της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\bar{\sigma} = \sigma_o + H_{iso} \cdot \bar{\epsilon}^p = \sigma_o + M_H \cdot H \cdot \bar{\epsilon}^p \quad (6.1)$$

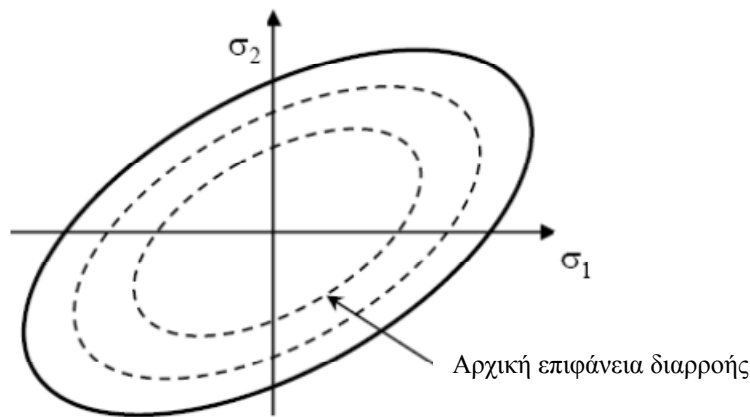
όπου σ_o είναι η αρχική τάση διαρροής του υλικού και

$\bar{\epsilon}^p$ είναι η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση.

Το μέγεθος της κυλινδρικής επιφάνειας του Σχήματος 6.8 εξαρτάται από την παράμετρο H , η οποία στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θεωρήθηκε σταθερά. Η παράμετρος M_H αποτελεί σταθερά του υλικού και επηρεάζει το ποσοστό της ιστροπικής κράτνσης. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας για την ιστροπική κράτνση χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση:

$$\bar{\sigma} = \sigma_o + Q(1 - e^{-be^p}) \quad (6.2)$$

όπου Q , b είναι σταθερές του υλικού που προσδιορίστηκαν μέσω πειραματικών και αριθμητικών διερευνήσεων που θα περιγραφούν στη συνέχεια και $\bar{\varepsilon}^p$ είναι η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση.



Σχήμα 6.8: Διαστολή επιφάνειας διαρροής για συνθήκες απλής έντασης σύμφωνα με την ισότροπη σκλήρυνση

Ο μηχανισμός της κινηματικής κράτνσης, είτε μόνος είτε σε συνδυασμό με την ισότροπη κράτνση, αποτελεί ένα επιπρόσθετο μέσο για τη βελτίωση της περιγραφής της συμπεριφοράς μεταλλικών υλικών υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Ο όρος της κινηματικής κράτνσης χρησιμοποιήθηκε πρώτος από τον Prager [86] προκειμένου να περιγράψει ένα μοντέλο υλικού το οποίο προϋποθέτει ότι κατά τη διάρκεια του πλαστικού κλάδου μιας φόρτισης η επιφάνεια διαρροής μετακινείται στο χώρο χωρίς να μεταβάλλονται το σχήμα και το μέγεθός της, φαινόμενο το οποίο είναι γνωστό και ως φαινόμενο Bauschinger [87]. Σύμφωνα με το φαινόμενο Bauschinger μετά τη διαρροή ενός μεταλλικού υλικού το οποίο υποβάλλεται σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση, η τάση διαρροής του υλικού κατά τον εφελευσμό ή τη θλίψη θα είναι μικρότερη από την τάση διαρροής κατά τη θλίψη ή τον εφελευσμό αντίστοιχα μετά την αντιστροφή της διεύθυνσης του φορτίου. Η λογική που διέπει τη συγκεκριμένη θεώρηση μπορεί να αναζητηθεί στο μηχανισμό με τον οποίο συσσωρεύεται η βλάβη στο υλικό. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, οι κόκκοι του υλικού εκτοπίζονται από την αρχική τους θέση κατά το πρώτο στάδιο φόρτισης με αποτέλεσμα να είναι πιο εύκολη η μετακίνηση τους κατά την αντιστροφή της κατεύθυνσης του φορτίου [88] με τελικό αποτέλεσμα τη μείωση του ορίου διαρροής.

Μπορούμε να θεωρήσουμε ως $f(\sigma)$ μία μεταβλητή η οποία αναπαριστά το φορτίο που ασκείται στο υλικό, ενώ ως k μια σταθερά του υλικού η οποία αναπαριστά το μέγεθος της επιφάνειας διαρροής και η οποία εξαρτάται από το ιστορικό των τάσεων και παραμορφώσεων του υλικού. Αν λάβουμε υπόψη ότι διαρροή του υλικού λαμβάνει χώρα όταν η f γίνει ίση με τη σταθερά k , τότε το σημείο διαρροής μπορεί να οριστεί σύμφωνα με την εξίσωση:

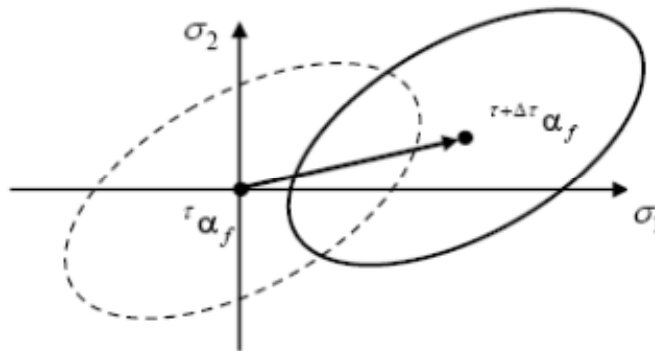
$$f(\sigma) = k \quad (6.3)$$

Όταν εξαιτίας της φόρτισης έχουμε υπέρβαση του ορίου διαρροής και άρα πλαστική παραμόρφωση, σύμφωνα με τις αρχές της κινηματικής κράτυνσης η επιφάνεια διαρροής κινείται στο χώρο σύμφωνα με την εξίσωση:

$$f(\sigma - \alpha_f) - k = 0 \quad (6.4)$$

όπου α_f είναι μια παράμετρος τάσεων, η οποία αποκαλείται τάση αναφοράς (back stress) και η οποία απεικονίζει το κέντρο της επιφάνειας διαρροής στο χώρο.

Στο Σχήμα 6.9 φαίνεται η μετακίνηση της επιφάνειας διαρροής κατά τη διάρκεια του πλαστικού κλάδου μιας φόρτισης ενώ το μέγεθός της παραμένει σταθερό.



Σχήμα 6.9: Μετακίνηση της επιφάνειας διαρροής για συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης

Η παράμετρος α_f , η οποία απεικονίζει το κέντρο της επιφάνειας διαρροής αναπροσαρμόζεται εξαιτίας αυτής της μετακίνησης σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\tau+\Delta\tau \alpha_f = \tau \alpha_f + d\alpha_f \quad (6.5)$$

Από πειραματικές διερευνήσεις της μεταβολής της κινηματικής κράτυνσης, ο Prager [86] πρότεινε την ακόλουθη γραμμική σχέση αναφορικά με την back stress α_f .

$$d\alpha_f = c d\bar{\epsilon}^p \quad (6.6)$$

όπου c είναι σταθερά του υλικού.

Κατά τον Ziegler [89], το γραμμικό κινηματικό μοντέλο του Prager αδυνατεί να δώσει ακριβή αποτελέσματα στην περίπτωση τρισδιάστατων συνθηκών. Για το λόγο αυτό πρότεινε την ακόλουθη μετατροπή στο μοντέλο του Prager.

$$d\alpha_f = (\sigma - \alpha_f) d\mu \quad (6.7)$$

όπου $d\mu$ είναι μία βαθμωτή σταθερά η οποία καθορίζεται από το κριτήριο διαρροής.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ως νόμος υλικού το κριτήριο von Mises [90], οπότε για την περίπτωση της κινηματικής κράτυνσης, εφόσον αμεληθούν οι θερμοκρασιακές επιρροές, χρησιμοποιείται η εξίσωση (6.8) η οποία αποτελεί έκφραση του νόμου που προτάθηκε από τον Ziegler.

$$da_f = C \frac{1}{\sigma_o} (\sigma - \alpha_f) d\bar{e}^p \quad (6.8)$$

όπου C είναι το κινηματικό μέτρο κράτνσης,
 σ_o το αρχικό μέγεθος της επιφάνειας διαρροής και
 \bar{e}^p η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση.

Για τις αναλύσεις των πεπερασμένων στοιχείων που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιήθηκε ένα μη γραμμικό ισοτροπικό-κινηματικό μοντέλο κράτνσης, προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη σύγκλιση με τα πειραματικά αποτελέσματα σε σχέση με αυτή που επιτυγχάνεται με το γραμμικό κινηματικό μοντέλο. Ο χρησιμοποιούμενος νόμος υλικού έχει επομένως δύο συστατικά: ένα μη γραμμικό κινηματικό στοιχείο κράτνσης το οποίο προσομοιώνει την κίνηση της επιφάνειας διαρροής στο χώρο χρησιμοποιώντας την back stress α_f , καθώς και ένα ισοτροπικό στοιχείο κράτνσης το οποίο περιγράφει τη μεταβολή του μεγέθους της επιφάνειας διαρροής, συναρτήσει της πλαστικής παραμόρφωσης. Το κινηματικό μέρος της κράτνσης του νόμου του υλικού ορίζεται ως ένας συνδυασμός του γραμμικού νόμου του Ziegler και ενός όρου απόσβεσης ο οποίος εισάγει τη μη γραμμικότητα στο μοντέλο. Ο νόμος της κινηματικής κράτνσης στην περίπτωση αυτή δίνεται από την εξίσωση:

$$da_f = C \frac{1}{\sigma_o} (\sigma - \alpha_f) d\bar{e}^p - \gamma \alpha_f d\bar{e}^p \quad (6.9)$$

όπου C και γ είναι παράμετροι του υλικού, οι οποίες βαθμονομήθηκαν μέσω κατάλληλων ανακυκλιζόμενων πειραμάτων.

Η σταθερά C είναι το αρχικό κινηματικό μέτρο κράτνσης, ενώ η σταθερά γ καθορίζει το ρυθμό μείωσης του κινηματικού μέτρου κράτνσης το οποίο μειώνεται καθώς η πλαστική παραμόρφωση αυξάνεται.

Για τη χρήση του μοντέλου ενεργού βλάβης που χρησιμοποιείται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας είναι σημαντικός ο ακριβής υπολογισμός των παραπάνω παραμέτρων του υλικού, ώστε να μπορούν να προσδιοριστούν επακριβώς οι τάσεις και παραμορφώσεις σε μια οποιαδήποτε φάση φόρτισης του δοκιμίου. Επομένως, γίνεται αντιληπτή η σημασία της βαθμονόμησης του νόμου του υλικού σύμφωνα με το οποίο πραγματοποιείται πλαστικοποίηση των δοκιμίων, έτσι ώστε να γίνεται διαχωρισμός της επίδρασης της κινηματικής και ισότροπης κράτνσης στο πεδίο των τάσεων και παραμορφώσεων του υλικού.

Η εξίσωση (6.10) αποτυπώνει το κριτήριο διαρροής (f) για την περίπτωση της διαρροής von Mises με ταυτόχρονη χρήση ισοτροπικής και κινηματικής κράτνσης ώστε η επιφάνεια φόρτισης να διογκώνεται (ή να συρρικνώνεται) και ταυτόχρονα να μετακινείται στο χώρο. Στην εξίσωση (6.10) συνυπάρχουν τόσο η τάση αναφοράς (back stress) της εξίσωσης (6.4), όσο και οι σταθερές της ισοτροπικής κράτνσης της εξίσωσης (6.2).

$$f(\sigma - \alpha_f) - Q(1 - e^{-be^p}) - \sigma_o = 0 \quad (6.10)$$

Σύμφωνα με την πρόταση των ερευνητών που διατύπωσαν την αρχή της ενεργού βλάβης [57] η διαδικασία βαθμονόμησης του υλικού της έρευνας πρέπει να πραγματοποιηθεί με βάση πειραματικές φορτίσεις τεσσάρων δοκιμίων χωρίς εγκοπή, όπως αυτό του Σχήματος 6.12 με βάση τις χρονοϊστορίες του Πίνακα 6.3.

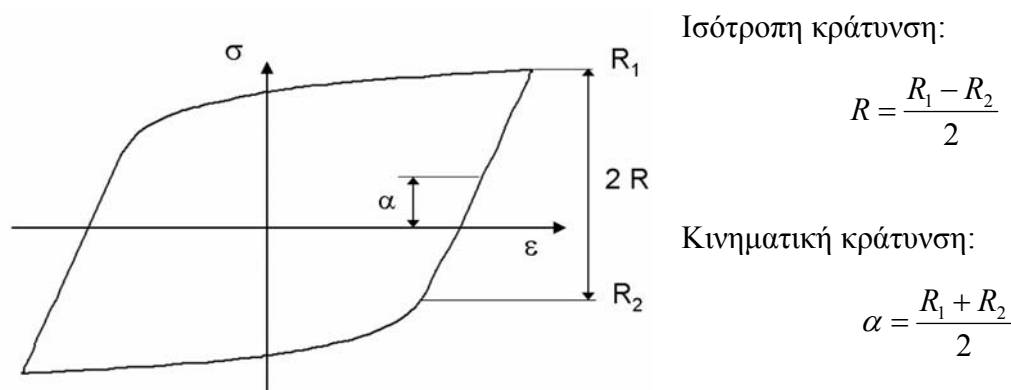
Πίνακας 6.3: Χρονοϊστορίες φόρτισης για τον προσδιορισμό των παραμέτρων κράτυνσης

	Εφελκυσμός	Θλίψη
	Ανηγγμένη Παραμόρφωση ε [%]	
1 ^ο δοκίμιο	Μέχρι διαρροής	-
2 ^ο δοκίμιο	1,00	Μέχρι διαρροής
3 ^ο δοκίμιο	2,00	Μέχρι διαρροής
4 ^ο δοκίμιο	3,00	Μέχρι διαρροής

Είναι σημαντικό κατά την διενέργεια αυτών των πειραμάτων να μη δημιουργηθεί λαιμός ή τοπικός λυγισμός στο υπό εξέταση δοκίμιο. Ο λόγος έγκειται στο γεγονός ότι οι συνθήκες φόρτισης πρέπει να παραμένουν μονοαξονικές ώστε να διατηρείται η αναλογία μεταξύ των αναπτυσσόμενων τάσεων και των ανηγμένων παραμορφώσεων και επομένως των ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων. Για συνθήκες μη μονοαξονικής φόρτισης η αναλογία χάνεται και καθίσταται εξαιρετικά δύσκολο να μετρηθούν οι παράμετροι του υλικού πειραματικά.

Η διατήρηση των μονοαξονικών συνθηκών φόρτισης, επιτρέπει οι τιμές των ισοδύναμων τάσεων και παραμορφώσεων να υπολογίζονται απευθείας από τα πειράματα. Οι ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις δηλαδή προκύπτουν από την άθροιση του συνόλου των απολύτων τιμών των παραμορφώσεων που προκύπτουν κατά τον εφελκυσμό και τη θλίψη των δοκιμίων. Η μοναδική απαίτηση είναι η απομείωση των τιμών των ολικών παραμορφώσεων με αφαίρεση του ελαστικού μέρους αυτών, το οποίο προκύπτει μέσω της μονοτονικής φόρτισης του πρώτου δοκιμίου.

Η κινηματική κράτυνση του υλικού περιγράφεται, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, ως η μετατόπιση του κέντρου της επιφάνειας διαρροής στο χώρο, ενώ η ισότροπη κράτυνση ως η μεταβολή του μεγέθους της. Στην περίπτωση της ανακυκλιζόμενης φόρτισης, η ισότροπη κράτυνση μπορεί να περιγραφεί ως το μισό του ελαστικού μέρους του διαγράμματος του Σχήματος 6.10, ενώ το κέντρο της επιφάνειας διαρροής (back stress) ως το μέσο των σημείων R1 και R2. Καθώς το σχήμα των πρώτων κύκλων φόρτισης διαφέρει από αυτό των επόμενων κύκλων, για τη βαθμονόμηση των παραμέτρων κράτυνσης χρησιμοποιείται ένας αντιπροσωπευτικός κύκλος φόρτισης και αφού η αστοχία αναμένεται μετά την πάροδο αρκετών κύκλων φόρτισης, χρησιμοποιείται ο κύκλος τάσεων-παραμορφώσεων του δοκιμίου στον οποίο οι τιμές έχουν σταθεροποιηθεί.



Σχήμα 6.10: Εύρεση παραμέτρων κράτυνσης του υλικού [91]

Με τον τρόπο αυτό καταλήγουμε στις τιμές του κινηματικού συστατικού κράτυνσης α_f και των ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων για διάφορες τιμές φόρτισης. Στη συνέχεια αυτές οι τιμές τοποθετούνται σε διάγραμμα και μέσω ολοκλήρωσης της εξίσωσης (6.9) προκύπτουν οι τιμές των

παραμέτρων C και γ για τις οποίες υπολογίζεται η ιδανική καμπύλη προσαρμογής μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και της εξίσωσης.

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι τιμές των ισοτροπικών παραμέτρων κράτνσης Q_∞ και b μέσω της εξίσωσης (6.2) και των τιμών των τάσεων που έχουν προκύψει από τα πειράματα. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τη θεώρηση ότι η τάση ενός υλικού αποτελείται από ένα ισοτροπικό και ένα κινηματικό μέρος, ισχύει η εξίσωση (6.11) από την οποία υπολογίζεται το ισοτροπικό συστατικό της κράτνσης.

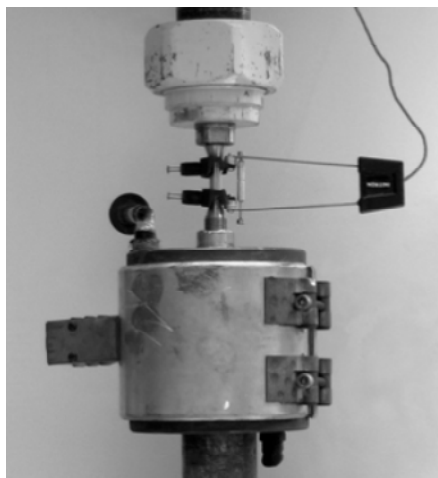
$$\bar{\sigma} = \sigma - \alpha_f \quad (6.11)$$

όπου $\bar{\sigma}$ είναι το ισοτροπικό συστατικό της κράτνσης,
 σ είναι η μετρούμενη ολική τάση από τα πειραματικά δεδομένα και
 α_f είναι το κινηματικό συστατικό της κράτνσης.

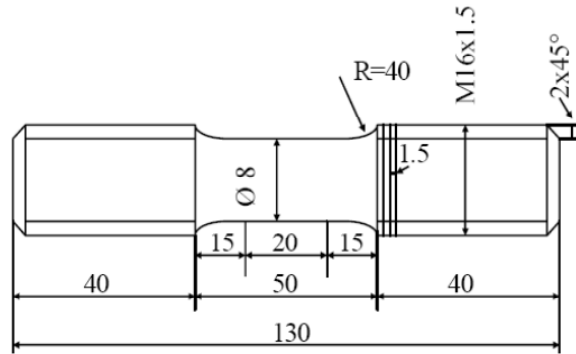
Οι τιμές των ισοτροπικών παραμέτρων κράτνσης μπορούν να εξαχθούν μέσω ταύτισης της καμπύλης της εξίσωσης (6.2) με τα αποτελέσματα της εξίσωσης (6.11) με χρήση της μεθόδου ελαχιστοποίησης του σφάλματος μέσω των ελαχίστων τετραγώνων.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως για τη βαθμονόμηση των παραμέτρων κράτνσης προτείνεται η χρήση τεσσάρων δοκιμών χωρίς εγκοπή υπό εφελκυστική φόρτιση, οι τιμές των οποίων προκύπτουν για μικρές σχετικά ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν δύο μόνο δοκίμια, από τα οποία το πρώτο υποβλήθηκε σε μονοτονική εφελκυστική φόρτιση ενώ το δεύτερο σε ανακυκλιζόμενες συμμετρικές φορτίσεις σταθερού εύρους όπως θα περιγραφεί στη συνέχεια. Με τον τρόπο αυτό γίνεται οικονομία σε δοκίμια, ενώ η χρήση περισσότερων ανακυκλιζόμενων κύκλων φόρτισης μας επιτρέπει τη διεξαγωγή των παραμέτρων κράτνσης σε μεγαλύτερες τιμές ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων, όπως αυτές που αναμένονται στα πειράματα υπέρ-ολιγοκυκλικής κόπωσης συγκολλητών κόμβων δοκού-υποστυλώματος που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 4.

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση σύμφωνα με την πειραματική διάταξη που φαίνεται στο Σχήμα 6.11, ενώ στο Σχήμα 6.12 παρουσιάζονται οι διαστάσεις των δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν.

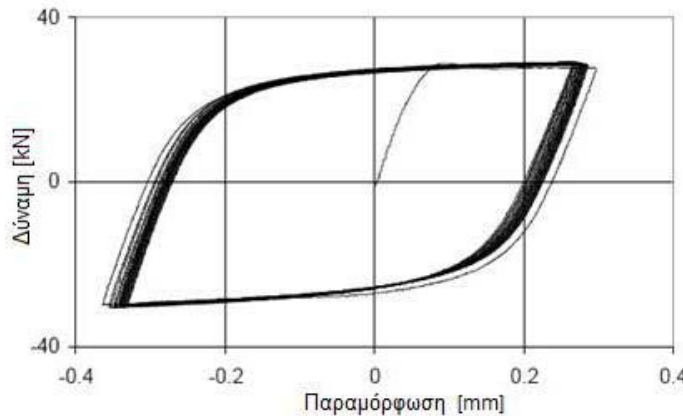


Σχήμα 6.11: Πειραματική διάταξη για ανακυκλιζόμενες φορτίσεις



Σχήμα 6.12: Πειραματικό δοκίμιο για τις ανακυκλιζόμενες φορτίσεις προσδιορισμού παραμέτρων κράτynσης του υλικού

Στο Σχήμα 6.13 φαίνεται ένα από τα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης που προέκυψαν κατά τις πειραματικές διερευνήσεις ανακυκλιζόμενων φορτίσεων υπό σταθερό εύρος μετατόπισης.



Σχήμα 6.13: Διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης για τον προσδιορισμό των παραμέτρων κράτynσης

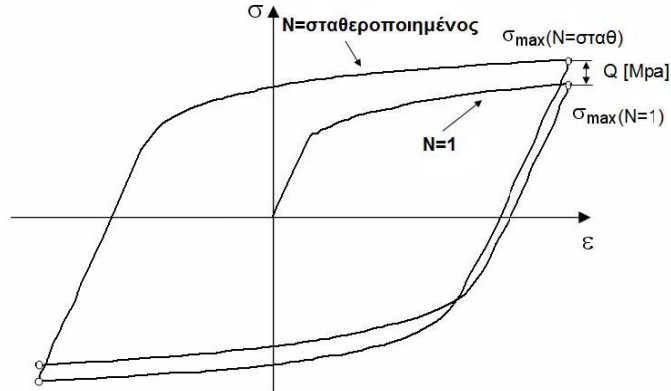
Ο προσδιορισμός των ιστροπικών παραμέτρων κράτynσης προσδιορίζεται με βάση την εξίσωση (6.12) η οποία βασίζεται στο γεγονός ότι μετά την πάροδο ορισμένων ανακυκλίσεων υπό φόρτιση σταθερού εύρους μετατοπίσεων, η υστερητική απόκριση σταθεροποιείται. Η εξίσωση (6.12) προέρχεται από την εξίσωση (6.2).

$$\frac{\sigma_{\max}(N) - \sigma_{\max}(N=1)}{\sigma_{\max}(N = stab.) - \sigma_{\max}(N=1)} = \frac{R}{Q} = 1 - e^{-bp} \quad (6.12)$$

όπου p είναι το άθροισμα των ανελαστικών παραμορφώσεων όπως φαίνεται και στην εξίσωση:

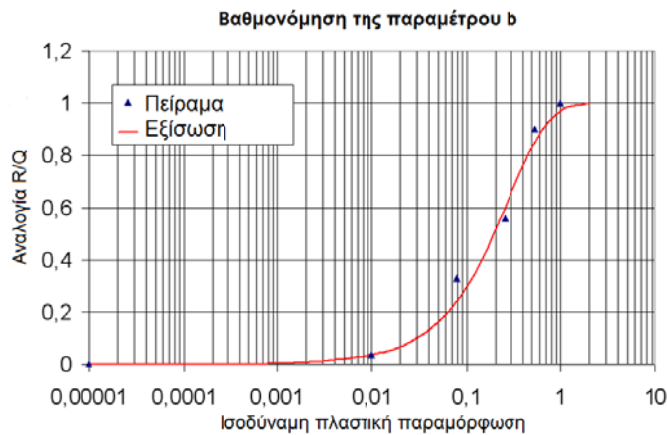
$$p = 2N\Delta\bar{\epsilon}^p \quad (6.13)$$

Η παράμετρος Q υπολογίζεται ως η διαφορά των τάσεων ανάμεσα στον πρώτο κύκλο της χρονοϊστορίας φόρτισης και στον τελευταίο, ο οποίος θεωρείται ως ο κύκλος στον οποίο έχουν σταθεροποιηθεί οι τάσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.14.



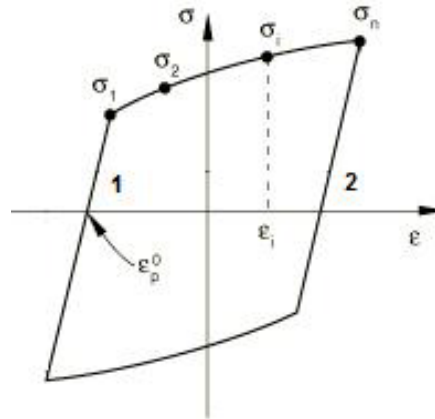
Σχήμα 6.14: Διαδικασία εύρεσης της ισότροπης κράτνσης

Από το συνδυασμό των εξισώσεων (6.12) και (6.13) προκύπτει το λογαριθμικό διάγραμμα του Σχήματος 6.15 με από το οποίο υπολογίζεται η τιμή της παραμέτρου b , μέσω ταύτισης της καμπύλης της εξίσωσης (6.12) και των πειραματικών αποτελεσμάτων.



Σχήμα 6.15: Βαθμονόμηση της ισότροπης παραμέτρου κράτνσης b μέσω λογαριθμικού διαγράμματος παραμορφώσεων

Η βαθμονόμηση των κινηματικών παραμέτρων κράτνσης (C , γ) γίνεται με βάση τον κύκλο φόρτισης στον οποίο έχει σταθεροποιηθεί η υστερητική απόκριση, όπως έγινε και κατά τον προσδιορισμό των ισότροπικών παραμέτρων κράτνσης. Για τον υπολογισμό των παραμέτρων, στον κύκλο αυτό η αρχή των αξόνων τοποθετείται με τέτοιο τρόπο ώστε να συμπίπτει με την παραμόρφωση που έχει το σημείο διαρροής του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων. Αυτό γίνεται προκειμένου κατά τη βαθμονόμηση των παραμέτρων η πλαστική παραμόρφωση του σημείου διαρροής να είναι μηδενική. Ένα απλοποιημένο διάγραμμα ανακυκλιζόμενης φόρτισης εμφανίζεται στο Σχήμα 6.16, στο οποίο οι άξονες του διαγράμματος θα πρέπει να μεταφερθούν στο σημείο 1, το οποίο δείχνει την παραμόρφωση στο σημείο διαρροής σ_I . Δηλαδή θα ισχύει $\varepsilon_p^o = 0$.

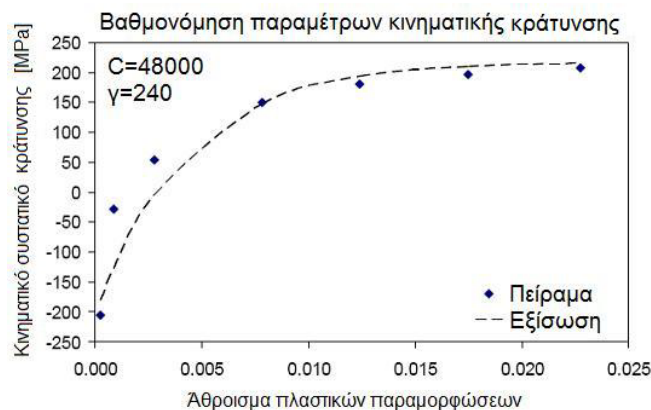


Σχήμα 6.16: Διαδικασία υπολογισμού κινηματικών παραμέτρων κράτυνσης [91]

Για κάθε ζεύγος τιμών τάσης-παραμόρφωσης του κύκλου αυτού μπορεί να εξαχθεί το κινηματικό μέρος του νόμου διαρροής του υλικού με χρήση της εξίσωσης (6.14) σύμφωνα με την οποία η ολική τάση σε κάθε σημείο αποτελείται από ένα κινηματικό και ένα ιστροπικό μέρος.

$$\sigma = \alpha_f + \bar{\sigma} \quad (6.14)$$

Το ιστροπικό συστατικό της εξίσωσης (6.14) μπορεί να εξαχθεί είτε μέσω της σχέσης του Σχήματος 6.10 είτε μέσω της εξίσωσης (6.2) εφόσον έχει ήδη προηγηθεί η διαδικασία υπολογισμού των ιστροπικών παραμέτρων κράτυνσης Q και b όπως περιγράφηκε στο Σχήμα 6.15. Στη συνέχεια οι τιμές του κινηματικού συστατικού κράτυνσης α_f εισάγονται σε διάγραμμα συναρτήσεως των πλαστικών παραμορφώσεων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.17. Το Σχήμα αυτό έχει προκύψει από τις πειραματικές μετρήσεις της παρούσας εργασίας και στη συνέχεια με τη βοήθεια της εξίσωσης (6.9) καταλήγουμε στις τιμές των μεταβλητών C και γ που αναζητούμε, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του ελαχίστου σφάλματος μεταξύ των πειραματικών τιμών και αυτών της εξίσωσης. Βασική προϋπόθεση είναι η διατήρηση κατά τη διάρκεια του πειράματος των μονοαξονικών συνθηκών φόρτισης χωρίς την παρουσία τοπικών λυγισμών κατά το στάδιο της θλίψης ή δημιουργίας λαιμού κατά το στάδιο του εφελκυσμού. Το γεγονός αυτό μας επιτρέπει να εξάγουμε τις τιμές των τάσεων, του μεγέθους και της θέσης της επιφάνειας διαρροής από τη συγκεκριμένη χρονοϊστορία φόρτισης και επομένως οι τιμές των παραμέτρων κράτυνσης που υπολογίζονται να έχουν ισχύ για οποιοδήποτε παρόμοιο ιστορικό φόρτισης.



Σχήμα 6.17: Προσδιορισμός κινηματικών παραμέτρων κράτυνσης

Η εύρεση των παραμέτρων κινηματικής (C , γ) και ιστροπικής κράτνσης (Q , b) είναι μια διαδικασία κοπιαστική και συνήθως δεν είναι εφικτή η απόλυτη σύγκλιση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αναλύσεων. Στη συνέχεια περιγράφεται συνοπτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε στα πλαίσια της συγκεκριμένης διατριβής και η οποία αποτελεί συνδυασμό πειραματικών δοκιμών και αριθμητικών αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία.

- i. Από το πειραματικό διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης του δοκιμίου το οποίο υποβλήθηκε σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση καταστρώνουμε το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων. Από το διάγραμμα αυτό καθορίζουμε την τιμή του Q με βάση τον κύκλο φόρτισης στον οποίο η μέγιστη τάση σταθεροποιείται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.14.
- ii. Μέσω της εξίσωσης (6.12) αντιστοιχούμε το λόγο R/Q σε κάθε τιμή ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης. Η τιμή του R είναι η διαφορά μεταξύ των τάσεων του πρώτου και του κύκλου φόρτισης στον οποίο αντιστοιχεί η τιμή της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης. Οι τιμές του λόγου R/Q σε σχέση με την ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση εισάγονται σε διάγραμμα, όπως αυτό του Σχήματος 6.15, από το οποίο γίνεται προσαρμογή του b με βάση την εξίσωση (6.12).
- iii. Με χρήση του μισού κύκλου φόρτισης στον οποίο έχει σταθεροποιηθεί η υστερητική απόκριση υπολογίζουμε τις τιμές του κινηματικού συστατικού κράτνσης α_f για κάθε τιμή πλαστικής παραμόρφωσης μέσω της εξίσωσης (6.14) και αφού πρώτα έχουμε καθορίσει το ιστροπικό συστατικό κράτνσης με βάση τα παραπάνω βήματα.
- iv. Οι τιμές του κινηματικού συστατικού κράτνσης α_f εισάγονται σε διάγραμμα συναρτήσεων των ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων του δοκιμίου. Σε αυτό το διάγραμμα εισάγεται και η εξίσωση (6.9) στην οποία βαθμονομούνται οι κινηματικές παράμετροι C και γ ώστε να υπάρχει σύγκλιση με τις τιμές του α_f που έχουν ήδη εισαχθεί στο διάγραμμα από την πειραματική διαδικασία.

Με την εφαρμογή των ανωτέρω διαδικασιών προέκυψε ο Πίνακας 6.4 στον οποίο συνοψίζονται οι τιμές των παραμέτρων κράτνσης του χάλυβα S355J2 ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των μελών που εξετάστηκαν πειραματικά υπό ανακυκλιζόμενες χρονοϊστορίες φόρτισης και οι οποίες εισήχθησαν στις αναλύσεις των συγκολλητών κόμβων δοκού-υποστυλώματος.

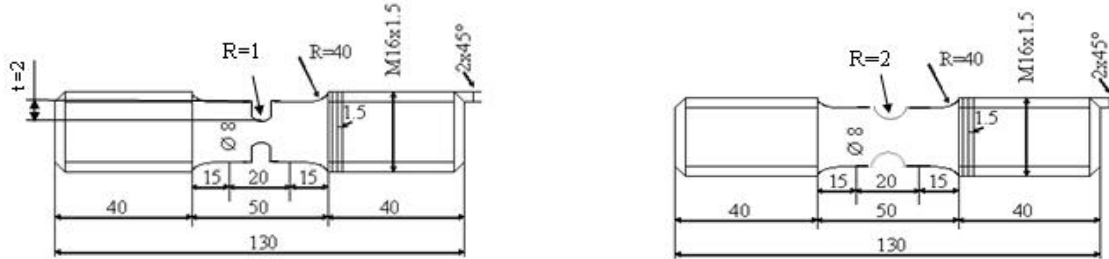
Πίνακας 6.4: Παράμετροι κράτνσης για χάλυβα ποιότητας S355J2

Ποιότητα χάλυβα	Q [MPa]	b	C [MPa]	γ
S355J2	10,0	1,5	48000	240,0

6.2.3.3 Έλεγχος παραμέτρων υλικού

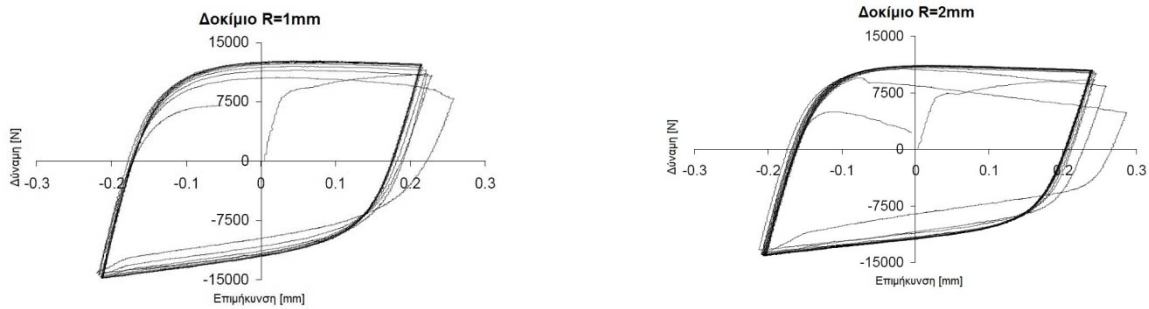
Οι τιμές των κινηματικών και ιστροπικών παραμέτρων κράτνσης, η εύρεση των οποίων περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, ελέγχθησαν επιπρόσθετα μέσω σύγκρισης πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν δύο εφελκυστικά δοκίμια στα οποία είχαν γίνει εγχοπές διαφορετικής διαμέτρου. Η παρουσία εγχοπών στα δοκίμια επέτρεψε τη σύγκριση μεταξύ πειραματικών αποτελεσμάτων και αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι κράτνσης που είχαν ήδη υπολογιστεί, σε συνθήκες διαφορετικών τιμών τριαξονικότητας και τάσεων από αυτές στις οποίες υποβλήθηκε το λείο δοκίμιο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη βαθμονόμηση των τιμών του

Πίνακα 6.4. Στο Σχήμα 6.18 φαίνεται η γεωμετρία των δοκιμίων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν και στα οποία εφαρμόστηκε χρονοϊστορία μετατοπίσεων σταθερού εύρους. Τα δοκίμια είναι κυλινδρικά, διαμέτρου 8mm και είναι πανομοιότυπα με τα λεία δοκίμια με μόνη διαφορά ότι φέρουν εγκοπή στο μέσο τους ακτίνας 1mm το πρώτο και 2mm το δεύτερο.



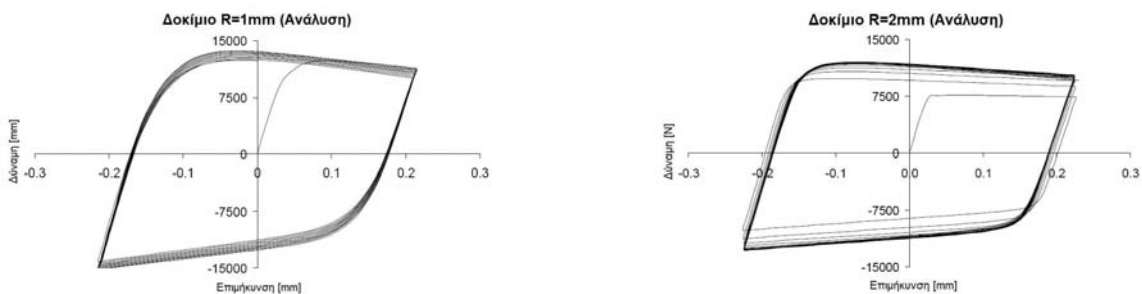
Σχήμα 6.18: Δοκίμια με εγκοπή ακτίνας R=1mm (αριστερά) και R=2mm (δεξιά)

Οι κύκλοι φόρτισης των δοκιμίων ήταν συμμετρικοί και είχαν σταθερό εύρος μετατόπισης. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων καταγράφονταν η εφαρμοζόμενη δύναμη, οι μετατοπίσεις και οι παραμορφώσεις μέσω ενός ηλεκτρικού μηκυσιόμετρου τοποθετημένου στο μέσο του δοκιμίου. Η αστοχία του δοκιμίου με την εγκοπή ακτίνας 1mm επήλθε με την παρέλευση 8 κύκλων φόρτισης, ενώ για το δοκίμιο με την εγκοπή ακτίνας 2mm η αστοχία έλαβε χώρα μετά από 15 κύκλους φόρτισης. Στο Σχήμα 6.19 φαίνονται τα πειραματικά διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης των δύο δοκιμίων.



Σχήμα 6.19: Πειραματικά διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης για δοκίμια με ακτίνα εγκοπής R=1mm (αριστερά) και R=2mm (δεξιά)

Στη συνέχεια τα παραπάνω πειράματα προσομοιώθηκαν σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων με χρήση αξονοσυμμετρικών μοντέλων και χρήση τετρακομβικών στοιχείων επιφανείας. Ο νόμος του υλικού που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από κινηματικό και ιστροπικό συστατικό κράτυνσης ενώ οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν αυτές του Πίνακα 6.4. Στο Σχήμα 6.20 φαίνονται τα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης που προέκυψαν από τις αναλύσεις.

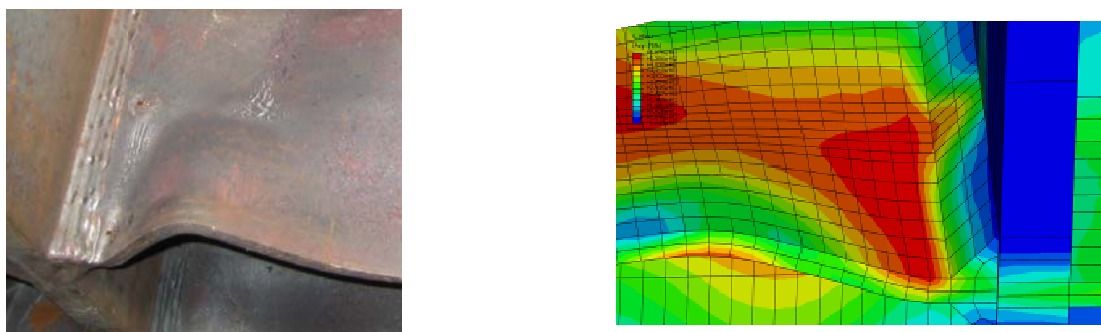


Σχήμα 6.20: Αναλυτικά διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης για δοκίμια με ακτίνα εγκοπής R=1mm (αριστερά) και R=2mm (δεξιά)

Κατά τη σύγκριση των διαγραμμάτων φορτίου-μετατόπισης που προκύπτουν από τις πειραματικές δοκιμές και τις αντίστοιχες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι οι παράμετροι κινηματικής και ισοτροπικής κράτυνσης που βρέθηκαν με τη διαδικασία που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο προσομοιώνουν σε ικανοποιητικό βαθμό τα πειραματικά αποτελέσματα. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην πρόβλεψη των μέγιστων τιμών δύναμης που παρατηρούνται σε κάθε κύκλο φόρτισης, γεγονός που απέδειξε τη σύγκλιση μεταξύ πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων. Διαφοροποίηση στο σχήμα της καμπύλης φορτίου-μετατόπισης μεταξύ του πειράματος και της αναλυτικής διαδικασίας παρουσιάζεται μόνο στο δοκίμιο με την εγκοπή ακτίνας 1mm, χωρίς αυτό ωστόσο να επηρεάζει τη σύγκλιση των τιμών του φορτίου στο τέλος κάθε κύκλου φόρτισης μεταξύ πειράματος και ανάλυσης.

6.2.3.4 Σύγκριση αναλύσεων συγκολλητών κόμβων δοκού-υποστυλώματος

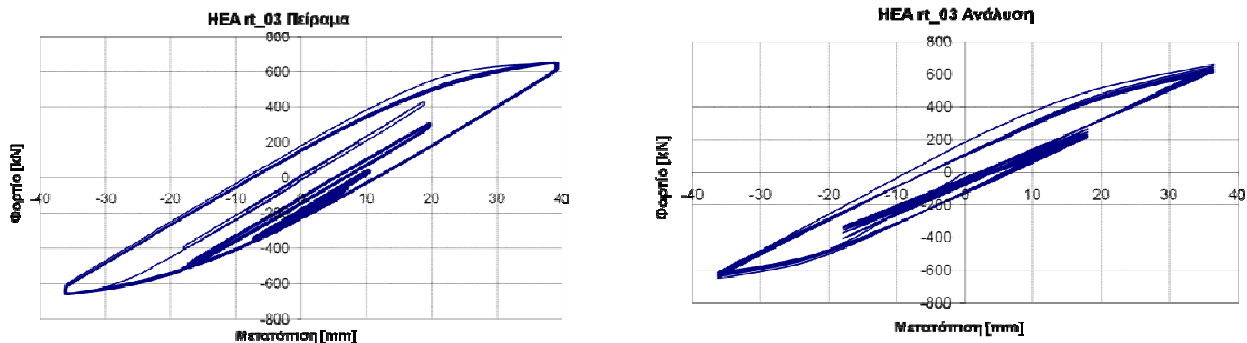
Κατά το πρώτο στάδιο αντιπαραβολής των αποτελεσμάτων μεταξύ πειραματικών μετρήσεων και αριθμητικών επεξεργασιών, συγκρίνεται η συνολική συμπεριφορά της σύνδεσης κατά τη διάρκεια των ανακυκλιζόμενων φορτίσεων. Σημαντικό στοιχείο κατά τη διαδικασία αυτή είναι η καταγραφή τυχόν τοπικών λυγισμών που θα σχηματιστούν στη μία ή και στις δύο δοκούς. Το αναλυτικό μοντέλο ολόκληρης της σύνδεσης αποτελείται από περίπου 25000 στοιχεία 8 κόμβων όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1. Μετά την επιβολή της χρονοϊστορίας φόρτισης του παραδείγματος στο δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων ελέγχεται κατά πόσον τα αποτελέσματα της φόρτισης στη διαφοροποίηση της γεωμετρίας του κόμβου συμπίπτουν με αυτά του πειράματος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση που εξετάζεται, όντως λαμβάνει χώρα τοπικός λυγισμός της δοκού μετά την παρέλευση 19 κύκλων φόρτισης τόσο στην πειραματική όσο και στην αναλυτική διαδικασία. Ο τοπικός λυγισμός σχηματίζεται αρχικά στο άνω και στη συνέχεια και στο κάτω πέλμα της μίας μόνο δοκού και σε απόσταση 200mm από το πέλμα της διατομής του υποστυλώματος. Στο Σχήμα 6.21 φαίνεται η δημιουργία του τοπικού λυγισμού τόσο στο πείραμα όσο και στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Η μικρή απόσταση του λυγισμού από το σημείο συγκόλλησης έχει ως αποτέλεσμα την τοπική αύξηση των πλαστικών παραμορφώσεων στην περιοχή της εξωραφής σε σχέση με την αντίστοιχη περιοχή της συμμετρικής δοκού στην οποία δεν σχηματίστηκε πλαστική άρθρωση.



Σχήμα 6.21: Τοπικός λυγισμός του άνω πέλματος της δοκού στο πείραμα (αριστερά) και στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (δεξιά)

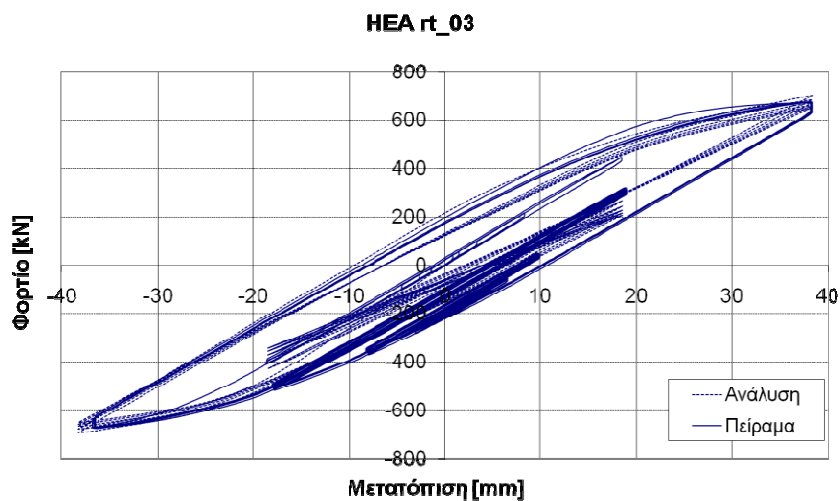
Στο Σχήμα 6.22 παρατίθενται τα διαγράμματα φορτίου-παραμόρφωσης από την πειραματική και αναλυτική διαδικασία. Στα διαγράμματα παρατίθενται μόνο οι πρώτοι έξι κύκλοι ώστε η σύγκριση να είναι ευδιάκριτη. Οι μετακινήσεις στη σύνδεση επιβλήθηκαν στο πάνω μέρος της διατομής του υποστυλώματος. Το μοντέλο της σύνδεσης όπως έχει ήδη αναφερθεί, ενώ είναι συμμετρικής γεωμετρίας, τελικά δεν συμπεριφέρθηκε με συμμετρικό τρόπο καθώς εξαιτίας του

τοπικού λυγισμού, το υποστυλώμα υπόκειται σε μια μικρή απόκλιση από την κατακόρυφη διεύθυνση στην οποία είχε τοποθετηθεί αρχικά.



Σχήμα 6.22: Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης για το πείραμα (αριστερά) και την ανάλυση (δεξιά)

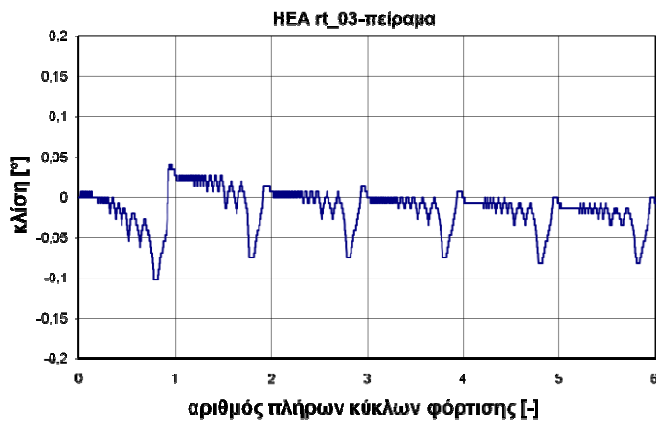
Οι μετατοπίσεις που εφαρμόστηκαν στην ανάλυση ήταν αυτές που μετρήθηκαν από τους μετρητές μετατόπισης οι οποίοι ήταν τοποθετημένοι στην κάτω επιφάνεια της διατομής του υποστυλώματος. Αυτό πραγματοποιήθηκε προκειμένου να αποφευχθούν απώλειες που παρατηρήθηκαν στα εξαρτήματα και τους κοχλίες οι οποίοι παρεμβάλλονται μεταξύ του εμβόλου και του δοκιμίου του υποστυλώματος. Στο Σχήμα 6.23 φαίνεται η σύγκριση ανάμεσα στο διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης που προέκυψε από το πείραμα και αυτού που προέκυψε από την ανάλυση με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Από το διάγραμμα είναι εμφανής η σύγκλιση η οποία χαρακτηρίζει τα δύο αποτελέσματα.



Σχήμα 6.23: Σύγκριση διαγραμμάτων φορτίου-μετατόπισης του HEA_355ns_03

Η σύγκλιση ανάμεσα στα πειραματικά και αναλυτικά αποτελέσματα εξακριβώθηκε και συγκρίνοντας την κλίση που υπόκειται η διατομή του υποστυλώματος. Κατά την εφαρμογή του φορτίου στο άνω μέρος του υποστυλώματος και μετά την πλαστικοποίηση της διατομής της δοκού, αυτό υπόκειται σε παρέκκλιση από την κατακόρυφο η οποία γίνεται εντονότερη καθώς το φορτίο αυξάνεται και εμφανίζεται τοπικός λυγισμός σε κάποια από τις δοκούς που βρίσκονται συγκολλημένες σε αυτό. Η μέτρηση της κλίσης αυτής τόσο κατά την πειραματική διαδικασία όσο και κατά την ανάλυση οδηγεί σε συμπεράσματα σχετικά με την αξιοπιστία της συμπεριφοράς του κόμβου με χρήση της προσομοίωσης των πεπερασμένων στοιχείων. Στο Σχήμα 6.24 φαίνεται το διάγραμμα κλίσης της διατομής του υποστυλώματος προερχόμενο από τις μετρήσεις των πειραμάτων. Οι τιμές του διαγράμματος αυτού συγκρίνονται με αυτές της αναλυτικής διαδικασίας

έτσι ώστε να επιβεβαιωθεί ότι η απόκριση των πεπερασμένων στοιχείων αναπαριστά με ευκρίνεια την πραγματική απόκριση του κόμβου κατά τη φόρτισή του.



Σχήμα 6.24: Κλίση του υποστυλώματος κατά τη διάρκεια του πειράματος

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων και η σύγκρισή τους με τις πειραματικές μετρήσεις για το σύνολο των συγκολλητών κόμβων στους οποίους εφαρμόστηκαν ανακυκλιζόμενοι κύκλοι φόρτισης περιέχονται στο Παράρτημα Δ.

6.3 Συμπεράσματα συγκρίσεων

Από την σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά των αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η συμπεριφορά των συγκολλητών κόμβων δοκού-υποστυλώματος προσομοιώνεται με ικανοποιητική ακρίβεια.

- Οι καμπύλες μονοτονικής φόρτισης καθώς και οι καταγραφές των ηλεκτρονικών μηκυνσιόμετρων των πειραματικών διατάξεων είναι όμοιες με αυτές που προκύπτουν από την ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων.
- Τα φαινόμενα του τοπικού λυγισμού των δοκών και της κλίσης στην οποία υπόκειται το υποστυλώμα προσομοιώνονται με επιτυχία μέσω του δικτύου πεπερασμένων στοιχείων.
- Οι καμπύλες φορτίου-παραμόρφωσης των ανακυκλιζόμενων πειραμάτων συγκλίνουν ως προς τις τιμές και το σχήμα με αυτές των αναλύσεων, αποδεικνύοντας την ορθότητα του αριθμητικού μοντέλου του υλικού που χρησιμοποιήθηκε.
- Οι όποιες αποκλίσεις παρατηρήθηκαν μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων είναι μικρές και δεν επηρεάζουν σημαντικά την καθολική συμπεριφορά της σύνδεσης.

Μεγαλύτερες αποκλίσεις εμφανίζονται στην προσομοίωση των πειραμάτων συγκολλητών κόμβων με χρήση δοκών διατομής IPE500, καθώς κατά την εκτέλεση των πειραμάτων παρατηρήθηκαν εκτός επιπέδου μετακινήσεις της σύνδεσης παρά τα μέτρα που είχαν ληφθεί για την αποφυγή αυτού του φαινομένου. Το γεγονός αυτό έκανε δύσκολη την προσομοίωση αυτών των συνδέσεων με αποτέλεσμα οι αποκλίσεις σε ορισμένα από τα μοντέλα να είναι εντονότερες. Για το λόγο αυτό στην παρούσα εργασία έχει δοθεί μεγαλύτερη έμφαση στα αποτελέσματα των συνδέσεων με δοκούς διατομής HEA300, καθώς εκτός από το μεγαλύτερο αριθμό διαθέσιμων πειραματικών δοκιμών, δεν υπήρξαν προβλήματα κατά τη διάρκεια των δοκιμών, όπως εκτός επιπέδου μετατοπίσεις, ολισθήσεις, προβλήματα στα μετρητικά όργανα κλπ. Επομένως, η

πειραματική συμπεριφορά των κόμβων σε μακροσκοπικό επίπεδο έγινε εφικτό να προσομοιωθεί με αξιοπιστία με τη χρήση κατάλληλου προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, έτσι ώστε να γίνει στη συνέχεια και προσομοίωση της συμπεριφοράς της σύνδεσης σε επίπεδο απαρχής ρηγμάτωσης.

7 Ανάλυση συνδέσεων με τις αρχές της μηχανικής της βλάβης

7.1 Εισαγωγή

Η μηχανική της βλάβης επιτρέπει τον προσδιορισμό του σημείου απαρχής ρηγμάτωσης σε ένα υλικό, χωρίς την εκ των προτέρων θεώρηση ύπαρξης ρωγμής σε κάποιο σημείο του σώματός του, όπως θα επέβαλλε η χρήση των αρχών της θραυστομηχανικής. Οι αρχές που διέπουν τη μηχανική της βλάβης έχουν το πλεονέκτημα της εύκολης εισαγωγής των εξισώσεών τους στα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων. Τα μοντέλα μηχανικής της βλάβης, όπως οι καμπύλες βλάβης και το μοντέλο GTN (Gurson-Tvergaard-Needleman), είναι ικανά να προβλέπουν τη συμπεριφορά του υλικού τόσο σε επίπεδο κόκκων όσο και σε επίπεδο δοκιμίου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούν χαρακτηριστικά της μικροδομής του υλικού, ενώ τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μπορούν να μεταφερθούν από το δοκίμιο στην κατασκευή, καθώς οι παράμετροι των μοντέλων είναι ανεξάρτητες της γεωμετρίας που εξετάζεται κάθε φορά.

Στα μειονεκτήματα των μοντέλων της μηχανικής της βλάβης μπορεί να συμπεριληφθεί η αδυναμία που επιδεικνύουν στην προσομοίωση της διάδοσης μιας ρωγμής διαμέσου του σώματος του υλικού, καθώς κατά τη διακριτοποίηση δεν προεπιλέγεται από το χρήστη πιθανή διαδρομή διάδοσής της. Οι αρχές της θραυστομηχανικής, αντίθετα μπορούν να προβλέψουν την κατεύθυνση και το ρυθμό διάδοσης μιας ρωγμής, καθώς κατά το στάδιο της διακριτοποίησης εμπεριέχεται ήδη η ρωγμή στο υλικό. Ωστόσο, στα μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής εμπεριέχεται το γεγονός ότι υπάρχουν παράμετροι που απαιτούν διεξοδική βαθμονόμηση, ενώ επιπλέον το σχήμα διάδοσης της ρωγμής δεν λαμβάνει υπόψη του τις τοπικές παραμορφώσεις του υλικού καθώς έχει ήδη προεπιλεγεί. Επιπρόσθετα, τα αποτελέσματα είναι ευαίσθητα στην πυκνότητα της διακριτοποίησης που χρησιμοποιείται κάθε φορά, ενώ η προαποφασισμένη θέση της ρωγμής αποτελεί δεσμευτικό παράγοντα ως προς την αξιολόγηση του φυσικού μηχανισμού αστοχίας.

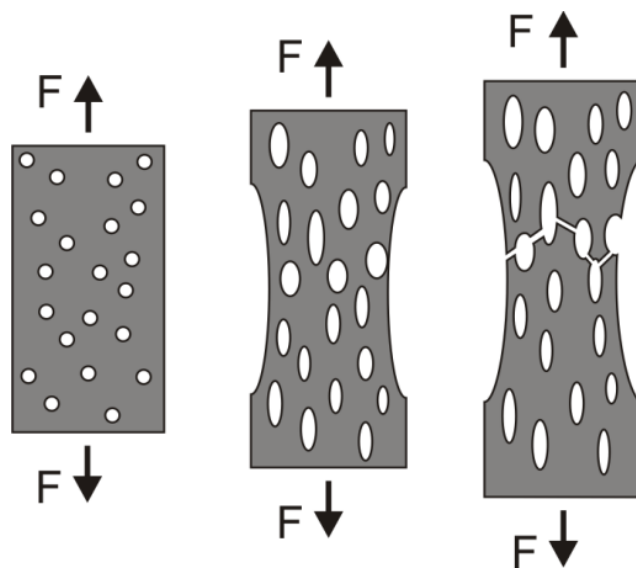
Η παρούσα διατριβή επικεντρώνεται στην όγκιμη δημιουργία ρωγμών υπό ανακυκλιζόμενες φορτίσεις και όχι στη διαδικασία διάδοσής τους στο σώμα του χάλυβα. Για το λόγο αυτό η πρόβλεψη της δημιουργίας των ρωγμών πραγματοποιείται με βάση τις αρχές της μηχανικής της βλάβης, οι οποίες παρέχουν ευκολία χρήσης δεδομένου ότι υιοθετούνται άμεσα από το πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Στη συνέχεια περιγράφονται γνωστά μοντέλα ολιγοκυκλικής κόπωσης του χάλυβα με βάση τη μηχανική της βλάβης, ενώ γίνεται αναφορά σε μοντέλα τα οποία έχουν ως βάση τις αρχές της θραυστομηχανικής.

7.2 Μοντέλα όγκιμης αστοχίας του χάλυβα

7.2.1 Μοντέλο Gurson-Tvergaard-Needleman

Στους δομικούς χάλυβες, μετά την έναρξη πλαστικοποίησης, παρατηρείται προοδευτική βλάβη του υλικού με τη μορφή της δημιουργίας και συνένωσης μικροκενών. Τα μικροκενά αυτά δημιουργούνται αρχικά εξαιτίας της επίδρασης του εξωτερικού φορτίου, ενώ η βαθμιαία αύξηση του όγκου τους στο σώμα του υλικού λόγω μεγάλων πλαστικών παραμορφώσεων, οδηγεί στη συνένωσή τους και τελικά στη θραύση του υλικού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.1. Η δημιουργία και η διάγνωση αυτών των κενών σε ένα μεταλλικό υλικό μπορεί να προσομοιωθεί με επιτυχία από το μοντέλο υλικού του Gurson [92]. Σε σχέση με άλλα μοντέλα που θα αναλυθούν στη συνέχεια, το μοντέλο υλικού του Gurson έχει απλούστερη μορφή και περιέχει λιγότερες σταθερές που πρέπει να βαθμονομηθούν. Το μοντέλο αυτό εμπεριέχει το κριτήριο διαρροής von Misses [90] και είναι ικανό

να αναπαράγει με ακρίβεια τη συμπεριφορά μεταλλικών υλικών μετά την διαρροή τους. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, το σώμα του υλικού αποτελείται από άθικτο υλικό, το οποίο χαρακτηρίζεται από τάσεις εξαιτίας της φόρτισης, καθώς και κενά όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.1.



Σχήμα 7.1: Σχηματισμός, διόγκωση, συνένωση μικροκενών και τελική ρηγμάτωση [37]

Στο μοντέλο αυτό έγιναν πολλές αλλαγές και βελτιώσεις οι οποίες αφορούν το μηχανισμό διαρροής και την εξέλιξη της βλάβης. Οι πιο σημαντικοί από τους ερευνητές που εξέλιξαν το μοντέλο του Gurson ήταν οι Tveergaard και Needleman [93]-[96] έτσι ώστε συχνά να αναφέρεται πλέον ως μοντέλο Gurson-Tveergaard- Needleman (GTN). Στο μοντέλο GTN η επίδραση της βλάβης λαμβάνεται υπόψη μέσω της προσθήκης ενός όρου ο οποίος απομειώνει την τιμή της αντοχής του υλικού και ο οποίος σχετίζεται με τον όγκο των κενών στο σώμα του υλικού. Ο όρος αυτός επιφέρει μια προοδευτική συρρίκνωση της επιφάνειας διαρροής μέχρι την τελική αστοχία λόγω απώλειας της φέρουσας ικανότητας του υλικού.

Ο μηχανισμός διαρροής και η πιθανή πλαστικοποίηση εκφράζονται από το μοντέλο του Gurson σύμφωνα με την εξίσωση:

$$f(\sigma) = \frac{q^2}{\bar{\sigma}^2} + \left[2q_1 f^* \cosh\left(\frac{3q_2 p}{2\bar{\sigma}}\right) - q_3 f^{*2} \right] - 1, \quad (7.1)$$

όπου $f(\sigma)$ είναι η εξίσωση διαρροής του υλικού,

q είναι η τάση von Mises,

p είναι η υδροστατική τάση,

$\bar{\sigma}$ είναι η εφελκυστική τάση που απαιτείται για την περαιτέρω παραμόρφωση του υλικού σε επίπεδο μικροδομής και η οποία είναι συνάρτηση της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης,

f^* είναι το τρέχον ποσοστό των κενών στο σώμα του υλικού η μεταβολή του οποίου κατά τη διάρκεια μιας φόρτισης γίνεται εν μέρει λόγω της δημιουργίας νέων κενών καθώς και λόγω της αύξησης του όγκου των υπάρχοντων κενών. Καθώς το f^* αυξάνεται, το μέγεθος της επιφάνειας διαρροής μειώνεται. Αν το f^* γίνει μηδέν η εξίσωση (7.1) αντιπροσωπεύει το κριτήριο διαρροής von Mises.

q_1 , q_2 και q_3 είναι παράμετροι του υλικού, οι οποίες εισήχθησαν από τον Tveergaard [93]-[94] μέσω σύγκρισης ανάμεσα στο μοντέλο του Gurson και ενός αριθμητικού μοντέλου το οποίο

λαμβάνει υπόψη την ανομοιομορφία των τάσεων στην περίμετρο των κενών και τη μεταξύ τους αλληλεπίδραση.

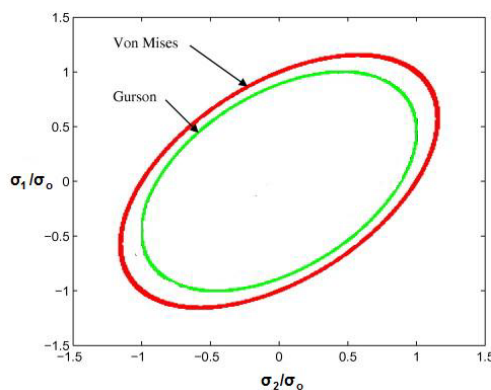
Το ποσοστό των κενών f^* στο σώμα του υλικού ορίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$f^* = \begin{cases} f, & \text{για } f \leq f_{crit} \\ f_{crit} + \frac{f_u - f_{crit}}{f_f - f_{crit}} (\kappa - f_{crit}), & \text{για } f > f_{crit} \end{cases} \quad (7.2)$$

$$\text{με } \kappa = \frac{f_u - f_{crit}}{f_f - f_{crit}} \quad (7.3)$$

Από την εξίσωση (7.2) φαίνεται ότι όταν η τιμή του ποσοστού του όγκου των κενών φτάσει σε μια κρίσιμη τιμή τότε ο ρυθμός αύξησής του επιταχύνεται εξαιτίας της αλληλεπίδρασης των γειτονικών κενών. Όταν το κλάσμα πάρει τη μέγιστη τιμή του, το υλικό έχει πλέον χάσει τη φέρουσα ικανότητά του και η μεταβλητή f^* παίρνει την τιμή f_u η οποία είναι ίση με $1/q_1$ σύμφωνα με τους Tvergaard και Needleman [95].

Στην αφόρτιστη κατάσταση η τιμή του f^* είναι ίση με την αρχική τιμή του κλάσματος όγκου των κενών f_o η οποία μπορεί να υπολογιστεί από μικροσκοπική ανάλυση. Το συγκεκριμένο μοντέλο κατά την εισαγωγή του σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων απαιτεί τον προσδιορισμό του μεγέθους των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν κατά τη διακριτοποίηση, ιδιαίτερα της διάστασης του στοιχείου η οποία είναι κάθετη προς την κατεύθυνση επέκτασης της ρωγμής. Η κατεύθυνση επέκτασης της ρωγμής προκύπτει με εφαρμογή της εξίσωσης (7.1) και εξαρτάται από τη μορφή και την κατεύθυνση της εξωτερικής φόρτισης στο δοκίμιο. Στο Σχήμα 7.2 φαίνεται η σχέση μεταξύ του μοντέλου του Gurson και της επιφάνειας διαρροής von Mises. Από το Σχήμα φαίνεται ότι το όταν το κλάσμα των κενών f^* που περιέχεται στην εξίσωση (7.1) γίνει μηδέν, η επιφάνεια του Gurson ενσωματώνεται με το κριτήριο διαρροής von Mises.

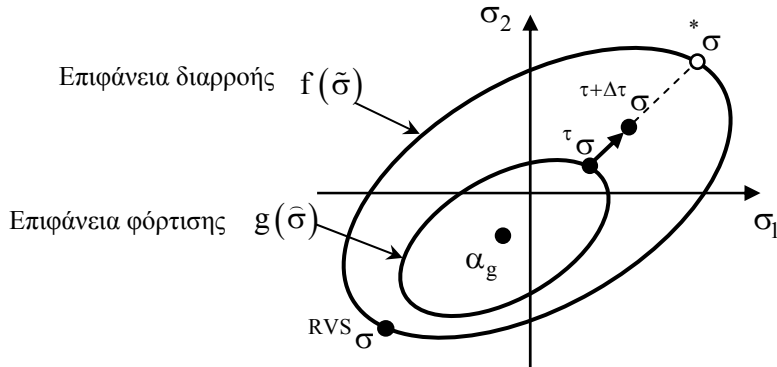


Σχήμα 7.2: Απεικόνιση κριτηρίου διαρροής von Mises και μοντέλου του Gurson

Στα προτερήματα του μοντέλου του Gurson συγκαταλέγεται η καταλληλότητά του στη διερεύνηση της επέκτασης μιας ρωγμής σε ένα υλικό. Είναι δυνατή δηλαδή η χρήση είτε εξαεδρικών πεπερασμένων στοιχείων είτε στοιχείων επιφανείας, τα οποία όταν η τιμή του κλάσματος των κενών φτάσει σε μια κρίσιμη τιμή που θα έχει οριστεί από τον ερευνητή, θα μπορούν να διαγράφονται από το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων. Με τον τρόπο αυτό μπορεί

να προσομοιωθεί η διαδοχική επέκταση μιας ρωγμής μέσω της προοδευτικής αύξησης της βλάβης του υλικού που βρίσκεται περιμετρικά της ακμής της.

Περαιτέρω βελτίωση της ακρίβειας του μοντέλου Gurson επιχειρήθηκε με χρήση ενός μοντέλου διαρροής του υλικού που προτάθηκε από τους Scarpas et al. [97]. Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει μια πιο ομαλή μετάβαση της δυσκαμψίας από την ελαστική στην ελαστοπλαστική περιοχή μέσω της χρήσης διπλής περιοχής διαρροής όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.3. Το μοντέλο αυτό αποτελείται από μία επιφάνεια διαρροής $f(\bar{\sigma})$ (Gurson) η οποία δρα ως το όριο μιας μικρότερης επιφάνειας, η οποία αναφέρεται ως επιφάνεια φόρτισης.



Σχήμα 7.3: Μοντέλο δύο περιοχών για συνθήκες απλής έντασης

Η επιφάνεια φόρτισης $g(\hat{\sigma})$ έχει το ίδιο σχήμα με την επιφάνεια διαρροής. Όταν το διάνυσμα της τάσης βρίσκεται στο εσωτερικό της επιφάνειας φόρτισης η συμπεριφορά του υλικού είναι ελαστική. Η επιφάνεια φόρτισης μπορεί να μεταβάλλεται σε μέγεθος και να κινείται μέσω του κινηματικού συστατικού της κράτνωσης στο εσωτερικό της επιφάνειας διαρροής. Αν το μέγεθος της επιφάνειας φόρτισης παραμένει αμετάβλητο, η μετατόπιση του αρχικού της σημείου α_g είναι πανομοιότυπη με τη μεταβολή της τάσης σύμφωνα με την εξίσωση:

$$d\alpha_g = d\sigma \tag{7.4}$$

Με βάση τις μεταλλογραφικές αναλύσεις οι οποίες παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3, προκύπτει το αρχικό πορώδες (αρχικό ποσοστό όγκου των κενών) f_0 , το οποίο αποτελεί παράμετρο του μοντέλου βλάβης GTN. Στη συνέχεια με πειραματικές εφελκυστικές δοκιμές σε δοκίμια με εγκοπή προσδιορίστηκαν οι επιπλέον παράμετροι του υλικού, όπως η κρίσιμη τιμή του λόγου των κενών και η τιμή του ρυθμού αύξησης κ στο κλάσμα των κενών της εξίσωσης (7.3). Οι τιμές των παραμέτρων q_1 , q_2 και q_3 προκύπτουν με βάση τις συστάσεις του Tveergard [93] οι οποίες για μεταλλικά υλικά έχουν την τιμή: $q_1=1,5$ και $q_2=1,0$ ενώ $q_3=q_1^2$. Ο Πίνακας 7.1 περιέχει τις τιμές των παραμέτρων του υλικού για την παρούσα μελέτη.

Πίνακας 7.1: Παράμετροι υλικού για το μοντέλο βλάβης GTN

Υλικό	q_1	q_2	q_3	f_0 [%]	f_{crit} [%]	κ
S355 J2	1,5	1,0	2,25	0,05	2,0	6
S460 M	1,5	1,0	2,25	0,04	1,5	6

Παρά τις αρχικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου, για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας επιλέχθηκε η χρήση των καμπυλών βλάβης που θα περιγραφούν στη συνέχεια. Η χρήση των καμπυλών βλάβης είχε το πλεονέκτημα του

προσδιορισμού μικρότερου αριθμού παραμέτρων σε σχέση με το μοντέλο GTN και το μοντέλο διαρροής των Scarpas et al. ενώ η χρήση τους στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που επιλέχθηκε δεν απαιτούσε πολύπλοκες διαδικασίες που στοιχίζουν σε υπολογιστικό χρόνο.

7.2.2 Μοντέλο Leblond

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε από τον Leblond [98] είναι μια επέκταση του μοντέλου των Gurson-Tveergaard- Needleman (GTN) η οποία βασίζεται στο γεγονός ότι το μοντέλο GTN, ενώ είναι έγκυρο για μονοτονικές συνθήκες φόρτισης, εντούτοις δεν ενδείκνυται για ανακυκλιζόμενες φορτίσεις, καθώς όπως φαίνεται από την εξίσωση (7.1) λαμβάνει υπόψη του μόνο το ιστροπικό συστατικό της κράτνσης του υλικού. Είναι γνωστό όμως ότι η συμπεριφορά του χάλυβα υπό ανακυκλιζόμενες φορτίσεις περιγράφεται και από το κινηματικό συστατικό της κράτνσης, το οποίο λαμβάνει υπόψη του το φαινόμενο Bauschinger [87]. Ο Leblond για το λόγο αυτό πρότεινε την αντικατάσταση του τανυστή τάσεων του Cauchy (δηλαδή τους όρους q , p και $\bar{\sigma}$ της εξίσωσης (7.1)) με την διαφορά της τάσης Cauchy με τον τανυστή του κινηματικού συστατικού της κράτνσης (backstress). Όπως και στο μοντέλο GTN η αστοχία επέρχεται όταν το κλάσμα των κενών f στο σώμα του υλικού ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή.

7.2.3 Μοντέλο Lemaitre

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα μοντέλα που βασίζονται στη μηχανική της συνεχούς βλάβης (continuum damage mechanics) προκειμένου να προβλέψουν την αστοχία όλκιμων μετάλλων. Ο Lemaitre [99] βασίστηκε στη θεώρηση ότι η παραμόρφωση που σχετίζεται με ένα ποσοστό βλάβης του υλικού το οποίο βρίσκεται υπό κάποια τάση, είναι ισοδύναμη με την παραμόρφωση του υλικού απουσία βλάβης υπό μία ενεργή τάση. Δηλαδή, υπό ελαστικές συνθήκες παραμόρφωσης ισχύει η εξίσωση (7.5) για την ενεργό τάση.

$$\sigma = \bar{E}\varepsilon \quad (7.5)$$

όπου

$$\bar{E} = (1-D)E \quad (7.6)$$

είναι το μέτρο ελαστικότητας υπό συνθήκες βλάβης του υλικού και το οποίο απομειώνεται με το συντελεστή βλάβης D , ο οποίος ορίζεται στην εξίσωση:

$$D = \frac{E - \bar{E}}{E} \quad (7.7)$$

Με τον τρόπο αυτό γίνεται εφικτός ο ορισμός της βλάβης όχι μέσω χρήσης της καθαρής επιφάνειας (χωρίς τα κενά) του υλικού και η οποία είναι εκείνη που φέρει το φορτίο, αλλά μέσω απομείωσης της τιμής του μέτρου ελαστικότητας.

Το μοντέλο του Lemaitre βασίζεται στις αρχές της θερμοδυναμικής και το θερμοδυναμικό δυναμικό ψ , το οποίο εξαρτάται από μια σειρά παραμέτρων όπως φαίνεται στην εξίσωση:

$$\psi = \psi(\varepsilon, T, \varepsilon_{el}, \varepsilon_{pl}, R, \alpha, D) \quad (7.8)$$

όπου ε είναι ο τανυστής της παραμόρφωσης,

T είναι η θερμοκρασία,

$\varepsilon_{el}, \varepsilon_{pl}$ είναι οι ελαστικές και πλαστικές παραμορφώσεις αντίστοιχα,

R είναι μέγεθος που εξαρτάται από την ισότροπη κράτυνση,

a είναι το διάνυσμα του κινηματικού συστατικού κράτυνσης και

D είναι μέγεθος το οποίο εξαρτάται από το βαθμό της βλάβης του υλικού.

Για συνθήκες γραμμικής ελαστικότητας, το θερμοδυναμικό δυναμικό μπορεί να γραφεί σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\rho\psi = \frac{1}{2} a : \varepsilon_{el} : (1-D)\varepsilon_{el} \quad (7.9)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του υλικού.

Από την εξίσωση (7.9) προκύπτει ο νόμος για συνθήκες ελαστικότητας στον οποίο συμπεριλαμβάνεται και το ποσοστό βλάβης του υλικού, όπως φαίνεται στην εξίσωση:

$$\sigma = \rho \frac{\theta\psi}{\theta\varepsilon_{el}} = a : (1-D)\varepsilon_{el} \quad (7.10)$$

Λαμβάνοντας υπόψη συνθήκες ισότροπης ελαστικότητας και με βάση την εξίσωση (7.11) που περιγράφει το συστατικό της δύναμης που σχετίζεται με τη βλάβη, ο Lemaitre [100] καταλήγει σε μια ισοδύναμη τάση όπως περιγράφεται στην εξίσωση (7.12):

$$Y = \rho \frac{\partial\psi}{\partial D} \quad (7.11)$$

$$\sigma^* = \sigma_{eq} R_V^{1/2} \quad (7.12)$$

όπου

$$R_V = \frac{2}{3} (1+\nu) + 3(1-2\nu) \left(\frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}} \right)^2 \quad (7.13)$$

σ_H είναι η υδροστατική τάση,

σ_{eq} είναι η τάση von Mises και

n είναι ο λόγος Poisson.

Το μοντέλο βλάβης που ανέπτυξε ο Lemaitre έχει τύχει ευρείας εφαρμογής εξαιτίας της ευκολίας χρήσης της μηχανικής συνεχούς βλάβης στα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων. Ωστόσο, έχει φανεί από αναλύσεις [101] ότι στις περιπτώσεις ανισότροπης βλάβης ο υπολογισμός γίνεται εξαιρετικά δύσκολος. Η χρήση του μοντέλου βλάβης του Lemaitre απαιτεί ιδιαίτερα κοπιαστικούς υπολογισμούς για την εύρεση των παραμέτρων της βλάβης οι οποίοι πραγματοποιούνται μέσω πειραμάτων. Επιπλέον, στον ορισμό του κανόνα της βλάβης δεν γίνεται διάκριση μεταξύ θλίψης ή εφελκυσμού. Η βλάβη δηλαδή, θεωρείται ότι αναπτύσσεται με τον ίδιο τρόπο υπό συνθήκες θλίψης και υπό συνθήκες εφελκυσμού, με αποτέλεσμα σε περιπτώσεις ανακυκλιζόμενης φόρτισης να χρειάζεται είτε η συγκέντρωση της βλάβης να απενεργοποιείται

κατά τα θλιπτικά διαστήματα φόρτισης, είτε να απαιτείται ο μετασχηματισμός του μοντέλου με τέτοιο τρόπο ώστε η συνδρομή της βλάβης κατά τη θλίψη να είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με τον εφελκυσμό.

7.2.4 Μοντέλο Bonora

Ένα άλλο μοντέλο που βασίζεται στη μηχανική της συνεχούς βλάβης (continuum damage mechanics) αναπτύχθηκε από τον Bonora [102], ο οποίος βασισμένος στο μοντέλο του Lemaitre [99], διατύπωσε ένα μοντέλο βλάβης για την όλκιμη θραύση ενός υλικού.

Αρχικά ο Bonora [103] είχε αναπτύξει ένα μη γραμμικό μοντέλο βλάβης το οποίο αφορούσε αποκλειστικά μονοτονικές συνθήκες φόρτισης. Σύμφωνα με τα δεδομένα που διέπουν το μοντέλο αυτό, η βλάβη είναι μη γραμμική συνάρτηση μιας ενεργού ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης του υλικού. Επίσης δεν γίνεται διαφοροποίηση της συμπεριφοράς του υλικού κατά την αύξηση της παραμόρφωσης και της βλάβης του. Στο νόμο διαρροής του υλικού δηλαδή, δεν γίνεται διαχωρισμός μεταξύ ισότροπης και κινηματικής κράτυνσης εξαιτίας της πλαστικής παραμόρφωσης καθώς και της υποβάθμισης του υλικού εξαιτίας της επέκτασης της βλάβης. Η πειραματική καμπύλη συμπεριφοράς του υλικού θεωρείται ότι περιλαμβάνει και τα δύο αυτά φαινόμενα.

Στις παραδοχές του νέου μοντέλου [102], το οποίο εξετάζει φορτίσεις με ταυτόχρονη παρουσία εφελκυστικών και θλιπτικών συστατικών, περιλαμβάνεται η αύξηση της βλάβης μόνο κατά τη διάρκεια της εφελκυστικής φόρτισης. Αυτό σημαίνει ότι όταν η συνιστώσα της υδροστατικής πίεσης είναι αρνητική, δηλαδή όταν έχουμε θλίψη του υλικού, η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση δεν συνεισφέρει στη βλάβη του υλικού. Με τον τρόπο αυτό εισάγεται στο μοντέλο η υπόθεση της διαφορετικής συγκέντρωσης βλάβης όταν αυτό βρίσκεται υπό θλίψη ή υπό εφελκυσμό. Δηλαδή, η ενεργός τιμή των ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων υπολογίζεται μόνο υπό εφελκυστικές συνθήκες φόρτισης. Ταυτόχρονα, η τιμή του μέτρου ελαστικότητας του υλικού ελαττώνεται όσο το ποσοστό της βλάβης αυξάνεται, αλλά μόνο υπό συνθήκες θετικών τιμών τριαξονικότητας όπως φαίνεται στην εξίσωση (7.14). Σε περίπτωση αρνητικής τριαξονικότητας, δηλαδή υπό συνθήκες θλίψης, το μέτρο ελαστικότητας παραμένει σταθερό.

$$E = E_0(1 - D) \quad \text{εφόσον } T \geq 0 \quad (7.14)$$

όπου D είναι η βλάβη του υλικού

E είναι το μέτρο ελαστικότητας του υλικού και

E_0 είναι το αρχικό μέτρο ελαστικότητας του υλικού.

Η τελική σχέση στην οποία κατέληξε ο Bonora είναι η ακόλουθη:

$$D = D_0 + (D_{cr} - D_0) \left\{ 1 - \left[1 - \frac{\ln\left(\frac{p}{p_{th}}\right)}{\ln\left(\frac{\epsilon_f}{\epsilon_{th}}\right)} \cdot f\left(\frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}}\right) \right]^\alpha \right\} \quad (7.15)$$

όπου D_0 είναι η αρχική βλάβη του υλικού,

D_{cr} είναι η κρίσιμη τιμή βλάβης κατά την αστοχία,

ϵ_{th} είναι το ελάχιστο όριο πλαστικής παραμόρφωσης για δημιουργία κενών,

ϵ_{cr} είναι η τιμή της πλαστικής παραμόρφωσης κατά την αστοχία,

p_{th} είναι το ελάχιστο όριο της συσσωρευμένης πλαστικής παραμόρφωσης,

p_{cr} είναι η τιμή της συσσωρευμένης πλαστικής παραμόρφωσης κατά την αστοχία,
 σ_{eq} είναι η τάση von Mises και
 σ_H είναι η υδροστατική τάση.

Οι παράμετροι οι οποίες εξαρτώνται από το υλικό ($\varepsilon_{th}, \varepsilon_{cr}, D_0, D_{cr}, a$) και οι οποίες είναι απαραίτητες για τη βαθμονόμηση του μοντέλου, προκύπτουν μέσω μιας σειράς πειραμάτων υπό εφελκυστικό φορτίο. Οι παράμετροι αυτές είναι ικανές να περιγράψουν ικανοποιητικά τη διαδικασία όλκιμου σχηματισμού ρωγμών μέσω της δημιουργίας και συνένωσης των κενών στο σώμα του υλικού.

Η ιδιαιτερότητα του μοντέλου του Bonora έγκειται στο γεγονός ότι κατά τον υπολογισμό της βλάβης του υλικού αμελείται η επίδραση των θλιπτικών κύκλων φόρτισης. Γίνεται δηλαδή η παραδοχή ότι η επίδραση της θλίψης του υλικού στη διαδικασία δημιουργίας και συνένωσης των κενών δεν είναι σημαντική. Το γεγονός αυτό έρχεται σε αντίθεση με άλλα μοντέλα πρόβλεψης της βλάβης ενός υλικού, όπως είναι το μοντέλο της ανακυκλιζόμενης διόγκωσης των κενών και της αρχής της ενεργού βλάβης, τα οποία θα περιγραφούν στη συνέχεια.

7.2.5 Μοντέλο ανακυκλιζόμενης διόγκωσης των κενών

Οι Kanvinde [104] και Deierlein [105] διατύπωσαν ένα μοντέλο βλάβης λαμβάνοντας υπόψη τον τρόπο με τον οποίο επιδρά η ολιγοκυκλική κόπωση στη δομή του υλικού, δηλαδή τον τρόπο με τον οποίο είτε σχηματίζονται νέα είτε συνενώνονται υπάρχοντα κενά υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Το μοντέλο αυτό αποτελεί επέκταση του μοντέλου διόγκωσης των κενών από τους Rice και Tracey [106] και του αντίστοιχου του McClintock [107]. Τα δύο προηγούμενα μοντέλα αναπτύχθηκαν λαμβάνοντας υπόψη μονοτονικές συνθήκες φόρτισης, ενώ το μοντέλο των Kanvinde και Deierlein λαμβάνει υπόψη την επίδραση των ανακυκλίσεων στη βλάβη του υλικού.

Το μοντέλο των Rice και Tracey [106] καθώς και αυτό του McClintock [107] κατέληξαν σε εξισώσεις οι οποίες εξετάζουν τη διόγκωση ενός κυλινδρικού ή σφαιρικού κενού σε ένα ελαστοπλαστικό υλικό υπό πλαστική παραμόρφωση σε συνθήκες έντονης τριαξονικότητας. Τα ευρήματα των παραπάνω ερευνητών έδειξαν ότι ο ρυθμός διόγκωσης του κενού είναι εκθετική συνάρτηση της τριαξονικότητας. Η εξίσωση (7.16) αποτυπώνει το μοντέλο που αναπτύχθηκε από τους Rice και Tracey.

$$\frac{dR}{R} = 0,238 \exp\left(\frac{1,5\sigma_m}{\sigma_Y}\right) d\varepsilon_p \quad (7.16)$$

όπου R είναι η ακτίνα του κενού

σ_Y είναι η τάση διαρροής

σ_m είναι η υδροστατική τάση

ε_p είναι η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση και η οποία προκύπτει από την εξίσωση:

$$\varepsilon_p = \sqrt{\frac{2}{3} \varepsilon_p^{ij} \varepsilon_p^{ij}} \quad (7.17)$$

Με ολοκλήρωση της εξίσωσης (7.16) προκύπτει η συνολική αύξηση του όγκου ενός κενού κατά την διάρκεια μιας φόρτισης, όπως φαίνεται στην εξίσωση:

$$\ln\left(\frac{dR}{R}\right) = 0,238 \int_0^{\varepsilon_p} \exp\left(\frac{1,5\sigma_m}{\sigma_y}\right) d\varepsilon_p \quad (7.18)$$

Στην εξίσωση αυτή μπορεί να αντικατασταθεί η τριαξονικότητα η οποία ορίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (7.19).

$$T = \frac{\sigma_m}{\sigma_y} \quad (7.19)$$

Ταυτόχρονα η σταθερά 0,238 της εξίσωσης (7.18) προκύπτει από προσαρμογή της καμπύλης των πειραματικών δεδομένων των Rice και Tracey και η οποία μπορεί να αντικατασταθεί με τη σταθερά του υλικού C , οπότε η τελική μορφή της εξίσωσης (7.18) φαίνεται στην εξίσωση (7.20).

$$\ln\left(\frac{R}{R_0}\right) = C \int_0^{\varepsilon_p} \exp(1,5T) d\varepsilon_p \quad (7.20)$$

όπου R_0 είναι η αρχική ακτίνα του κενού.

Όταν η εξίσωση (7.20) φτάσει σε μια κρίσιμη τιμή, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι έχουμε αστοχία του υλικού. Ο υπολογισμός ανά πάσα στιγμή της τιμής της εξίσωσης (7.20) σε ένα υλικό μπορεί να πραγματοποιηθεί εύκολα με χρήση κατάλληλων προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων τα οποία υπολογίζουν την τιμή της τριαξονικότητας και της πλαστικής παραμόρφωσης σε κάθε στάδιο φόρτισης. Επομένως, εφόσον έχουμε ορίσει προηγουμένως μια κρίσιμη τιμή όγκου των κενών, μπορούμε να ξέρουμε αυτόματα πότε έχουμε υπέρβαση της τιμής αυτής και άρα αστοχία του υλικού. Επομένως η κρίσιμη τιμή n προκύπτει με βάση την εξίσωση:

$$n = \frac{\ln\left(\frac{R}{R_0}\right)_{cr}}{C} = \int_0^{\varepsilon_p} \exp(1,5T) d\varepsilon_p \quad (7.21)$$

Αν και η εξίσωση (7.21) αφορά τη συμπεριφορά ενός και μόνο κενού, κατά τον πειραματικό υπολογισμό της κρίσιμης τιμής του όγκου του κενού ουσιαστικά συμπεριλαμβάνεται και η επιρροή των γειτονικών κενών. Επιπλέον, υπό συνήθεις συνθήκες φόρτισης, η τριαξονικότητα του υλικού, η οποία εξαρτάται από τη γεωμετρία του δοκιμίου, δεν μεταβάλλεται σε σημαντικό βαθμό κατά την αύξηση των παραμορφώσεων. Για τις περιπτώσεις αυτές η εξίσωση (7.21) μπορεί να μετασχηματιστεί σε μια απλούστερη μορφή καθώς ο όρος της τριαξονικότητας στο εσωτερικό του ολοκληρώματος παραμένει σταθερός, οπότε και προκύπτει η εξίσωση (7.22).

$$\ln\left(\frac{R}{R_0}\right)_{cr} = C \exp(1,5T) \varepsilon_p^{cr} \quad (7.22)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (7.21) και (7.22) προκύπτει ότι η κρίσιμη τιμή της πλαστικής παραμόρφωσης προκύπτει με βάση την εξίσωση:

$$\varepsilon_p^{cr} = \frac{\ln\left(\frac{R}{R_0}\right)_{cr}}{C \exp(1,5T)} = \frac{\ln\left(\frac{R}{R_0}\right)_{cr}}{C} \exp(-1,5T) \quad (7.23)$$

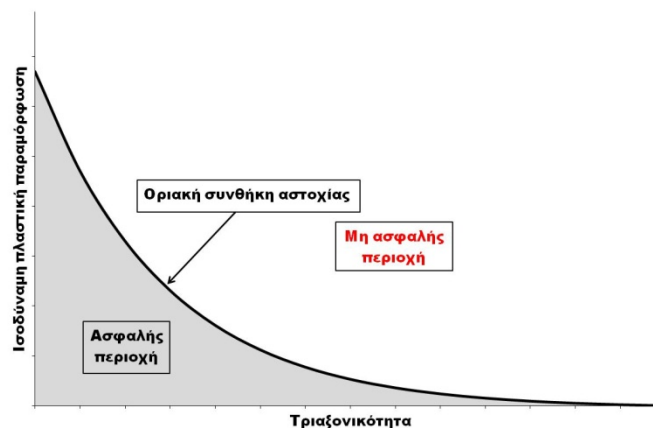
Όμως οι βασικές παράμετροι του υλικού μπορούν να συνενωθούν σε μία με βάση την εξίσωση:

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{R}{R_0}\right)_{cr}}{C} \quad (7.24)$$

Τελικά συνδυάζοντας τις εξισώσεις (7.23) και (7.24) προκύπτει η τελική μορφή της εξίσωσης όπως διατυπώθηκε από τον Hancock [79], ο οποίος κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η όλκιμη αστοχία ενός υλικού εξαρτάται από την τιμή της τριαξονικότητας και της πλαστικής παραμόρφωσης. Δηλαδή καθώς η τριαξονικότητα αυξάνεται, η κρίσιμη τιμή της πλαστικής παραμόρφωσης μειώνεται, όπως φαίνεται και στην εξίσωση (7.25).

$$\varepsilon_p^{cr} = a \exp(-1,5T) \quad (7.25)$$

Καθώς η κρίσιμη αυτή τιμή αφορά ένα μόνο σημείο του υλικού, ανάλογα με τον ορισμό της αστοχίας, επιβάλλουμε τη συνθήκη της εξίσωσης (7.25) σε περισσότερα του ενός πεπερασμένων στοιχείων. Αυτό σημαίνει ότι για να δημιουργηθεί μια ρωγή ενός συγκεκριμένου μεγέθους, θα πρέπει να έχει υπάρξει αστοχία σε τόσα στοιχεία όσα και το μήκος της ρωγμής. Για το λόγο αυτό δεν αρκεί να ικανοποιείται η εξίσωση (7.25) σε ένα μόνο σημείο, αλλά σε ένα μήκος υλικού το οποίο εξαρτάται από την μικροδομή του και από το πλήθος των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιούνται κατά την ανάλυση. Η αποτύπωση της εξίσωσης (7.25) σε μορφή διαγράμματος μας δίνει ένα απλό κριτήριο αστοχίας όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.4. Από το Σχήμα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι οποιοσδήποτε συνδυασμός τριαξονικότητας και ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης βρίσκεται κάτω από την οριακή τιμή της εξίσωσης (7.25), το υλικό θεωρείται ότι δεν έχει υποστεί βλάβη. Αντίθετα, όταν ο συνδυασμός τους ξεπεράσει την οριακή συνθήκη έχουμε συνένωση των κενών και σχηματισμό ρωγμής στο υλικό. Η χρήση αυτού του τύπου των διαγραμμάτων θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια στα πλαίσια των καμπύλων βλάβης, εξαιτίας της ευκολίας που προσφέρουν στη θεώρηση της αστοχίας ενός υλικού, καθώς και του εποπτικού τρόπου που μπορεί να έχει ο ερευνητής ως προς το ποσοστό της βλάβης σε ένα όλκιμο μέσο.



Σχήμα 7.4: Σχηματική απεικόνιση του νόμου του Hancock

Το μοντέλο αυτό, όπως περιγράφηκε και προηγουμένως, αφορά μονοτονικές φορτίσεις και την αστοχία που προέρχεται εξ' αυτών. Η επέκταση του μοντέλου αυτού ώστε να είναι δυνατόν να περιλαμβάνει την επίδραση ανακυκλιζόμενων και σεισμικών φορτίσεων πραγματοποιήθηκε από τους Kanvinde και Deierlein, με τρόπο ώστε να ποσοτικοποιείται η συνεισφορά στη βλάβη του υλικού τόσο των θλιπτικών όσο και των εφελκυστικών συστατικών της φόρτισης. Για το λόγο αυτό η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση διαχωρίζεται σε δύο μέρη, με το πρώτο να αφορά τον

εφελκυσμό και το δεύτερο τη θλίψη του υλικού. Με τον τρόπο αυτό προτάθηκε από τους ερευνητές η "ουσιώδης" πλαστική παραμόρφωση η οποία υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_t - \varepsilon_c \quad (7.26)$$

όπου ε_t είναι η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση κατά τον εφελκυσμό και

ε_c είναι η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση κατά την θλίψη του υλικού.

Από την εξίσωση (7.26) γίνεται αντιληπτό ότι η 'ουσιώδης' πλαστική παραμόρφωση αυξάνεται κατά τα εφελκυστικά τμήματα μιας ανακυκλιζόμενης φόρτισης και μειώνεται κατά το θλιπτικό της μέρος. Αποτελεί δηλαδή ένα δείκτη ο οποίος δείχνει αν τα κενά στο σώμα του υλικού βρίσκονται σε φάση διόγκωσης ή συμπίεσης. Επομένως, η τιμή της δεν αυξάνεται συνεχώς, όπως στην περίπτωση της απλής ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης, αλλά αυξομειώνεται ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το υλικό. Στα μειονεκτήματα της 'ουσιώδους' ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης έγκειται το γεγονός ότι λόγω ορισμού δε μπορεί να πάρει αρνητικές τιμές. Επομένως, αν μετά από κάποια εφελκυστική καταπόνηση του υλικού ακολουθήσει εκτεταμένη θλίψη, η 'ουσιώδης' ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση θα μειωθεί μέχρι να πάρει τελικά μηδενική τιμή και στη συνέχεια θα ξαναγίνει θετική όταν υπάρξει κάποιο στάδιο εφελκυστικής φόρτισης, η οποία συνεπάγεται και θετική τριαξονικότητα. Αυτό σημαίνει ότι ενώ το υλικό θα έχει ήδη υποστεί ένα ποσοστό βλάβης εξαιτίας των προηγούμενων εφελκυστικών κύκλων φόρτισης, η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση θα είναι μηδέν εφόσον η καταπόνηση σε θλίψη είναι εκτεταμένη σε διάρκεια.

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε από τους Kanvinde και Deierlein συνοψίζεται στην εξίσωση (7.27). Η σχέση αυτή βασίζεται στην εξίσωση (7.22) και διαχωρίζει τη συμβολή που έχουν στη βλάβη ενός υλικού οι ανακυκλιζόμενες φορτίσεις με εφελκυστικά και θλιπτικά διαστήματα, δηλαδή με θετικές και αρνητικές τιμές τριαξονικότητας αντίστοιχα.

$$\ln\left(\frac{R}{R_0}\right) = C_1 \int \exp(|1,5T|) d\varepsilon_t - C_2 \int \exp(|1,5T|) d\varepsilon_c \quad (7.27)$$

Η εξίσωση (7.27) μπορεί να απλοποιηθεί περαιτέρω με αντικατάσταση των σταθερών του υλικού C_1 και C_2 οι οποίες αντιπροσωπεύουν το ρυθμό αύξησης ή μείωσης των κενών στο σώμα του υλικού. Οι σταθερές αυτές αντικαταστάθηκαν με μια κοινή σταθερά C με τη θεώρηση ότι ο ρυθμός διαφοροποίησης του μεγέθους των κενών είναι κοινός στον εφελκυσμό και στη θλίψη. Επιπλέον, αν θεωρήσουμε ότι η γεωμετρία του μέλους δεν αλλάζει σημαντικά κατά τη φόρτιση, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η τριαξονικότητα παραμένει σχεδόν σταθερή, οπότε τα ολοκληρώματα μπορούν να αντικατασταθούν λαμβάνοντας υπόψη ως μεταβλητή μόνο τις πλαστικές παραμορφώσεις. Με χρήση της εξίσωσης (7.26) καταλήγουμε στην εξίσωση (7.28) η οποία είναι όμοια με την εξίσωση που ισχύει για μονοτονικές συνθήκες φόρτισης με τη διαφορά ότι σε ανακυκλιζόμενες φορτίσεις χρησιμοποιείται η 'ουσιώδης' ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση που αναπτύχθηκε προηγουμένως.

$$\ln\left(\frac{R}{R_0}\right) = C \exp(|1,5T|) \varepsilon^* \quad (7.28)$$

Επομένως, εφόσον γνωρίζουμε εκ των προτέρων μια κρίσιμη τιμή ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης η οποία σε συνδυασμό με μια τιμή τριαξονικότητας οδηγεί σε αστοχία του υλικού, είναι δυνατόν μέσω της εξίσωσης (7.28) να γνωρίζουμε το ποσοστό της βλάβης που έχει υποστεί

ένα υλικό. Οι τιμές αυτές μπορούν να καθοριστούν μέσω δοκιμίων υπό εφελκυστική φόρτιση, όπως αυτά που θα περιγραφούν στη συνέχεια στα πλαίσια των καμπύλων βλάβης.

Η χρήση του παραπάνω μοντέλου έχει αποδειχθεί αξιόπιστη μέσω πειραματικών διερευνήσεων που έγιναν σε χαλύβδινους συνδέσμους δυσκαμψίας από κοίλες διατομές [108], αλλά και σε πλαίσια ροπής [105]. Ταυτόχρονα, έχει αποδειχθεί η χρησιμότητα του μοντέλου σε συγκολλητές συνδέσεις δοκού-υποστυλώματος με την παρεμβολή διαφορετικής ποιότητας συγκολλήσεων [109]. Κοινή συνισταμένη όλων των παραπάνω αναλύσεων είναι η ενσωμάτωση του μοντέλου στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ώστε να προκύπτουν απευθείας οι περιοχές που αναμένεται η αστοχία, αλλά και οι εκτεταμένες αναλύσεις που πραγματοποιούνται προηγουμένως σε εφελκυστικά δοκίμια προκειμένου να βαθμονομηθεί το μοντέλο αστοχίας.

7.2.6 Καμπύλες Βλάβης

Οι καμπύλες βλάβης αποτελούν άλλο ένα μέσο που μας επιτρέπει τον υπολογισμό της τοπικής αστοχίας του υλικού, καθώς παρέχουν μια ποσοτική σχέση ανάμεσα στην ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση και το συντελεστή τριαξονικότητας.

Η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση προκύπτει από την εξίσωση:

$$\bar{\varepsilon}_{pl} = \sqrt{\frac{2}{3} (\varepsilon_{pl,1}^2 + \varepsilon_{pl,2}^2 + \varepsilon_{pl,3}^2)} \quad (7.29)$$

όπου $\varepsilon_{pl,1}$, $\varepsilon_{pl,2}$ και $\varepsilon_{pl,3}$ είναι οι κύριες πλαστικές παραμορφώσεις του υλικού.

Ο συντελεστής τριαξονικότητας υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης:

$$h = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \quad (7.30)$$

όπου σ_m είναι η συνιστώσα της υδροστατικής τάσης η οποία οδηγεί σε αύξηση του όγκου των κενών σε ένα πορώδες υλικό σύμφωνα με την εξίσωση:

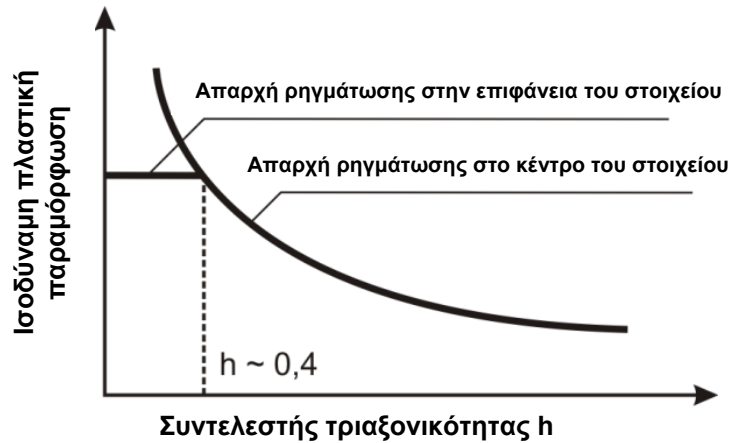
$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (7.31)$$

όπου σ_1 , σ_2 και σ_3 είναι οι κύριες τάσεις, ενώ

$\bar{\sigma}$ είναι η τάση von Mises η οποία περιγράφεται στην εξίσωση:

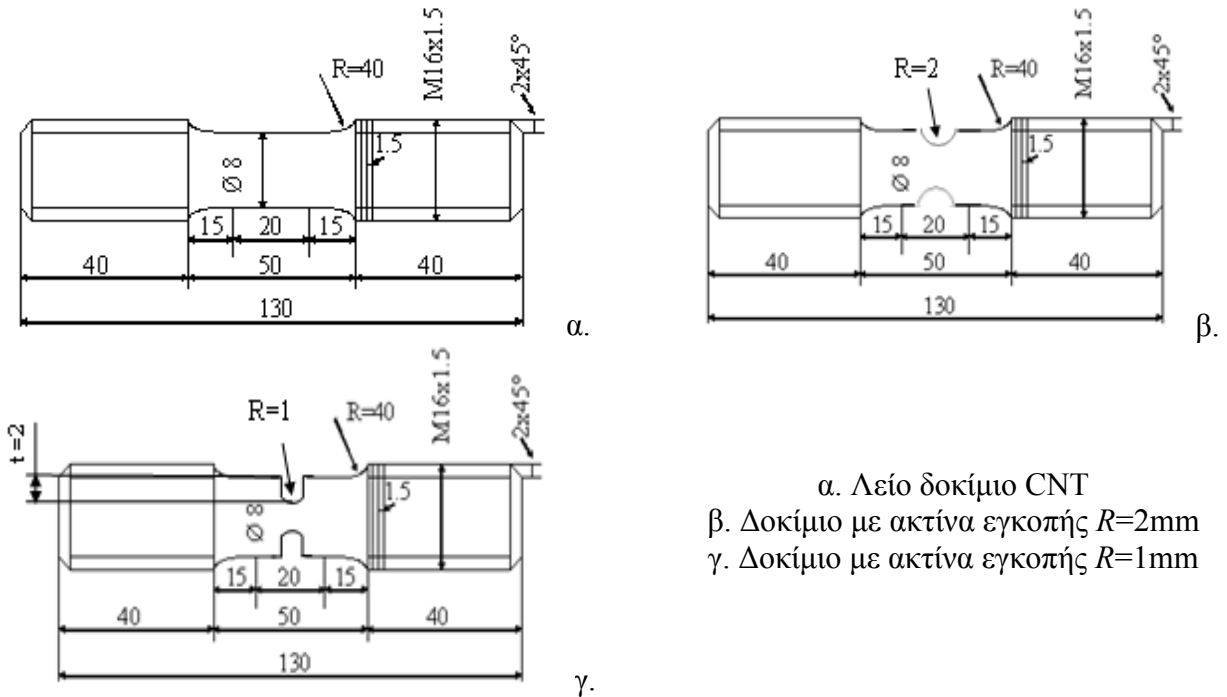
$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (7.32)$$

Στο Σχήμα 7.5 φαίνεται γραφικά η ποσοτική σχέση μεταξύ του συντελεστή τριαξονικότητας και της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης καθώς και οι αναμενόμενες θέσεις ρηγμάτωσης των πειραματικών δοκιμίων που υποβάλλονται σε εφελκυσμό από και από τα οποία προκύπτει το διάγραμμα. Στο Σχήμα 7.5 γίνεται εμφανές ότι για χαμηλές τιμές του συντελεστή τριαξονικότητας η αρχική δημιουργία ρωγμών αναμένεται στην επιφάνεια του δοκιμίου ενώ για μεγαλύτερες τιμές η ρηγμάτωση παρατηρείται στο κέντρο του.



Σχήμα 7.5: Η καμπύλη βλάβης ως κριτήριο απαρχής ρηγμάτωσης

Οι καμπύλες βλάβης εξαρτώνται αποκλειστικά από τη θερμοκρασία, την ποιότητα του χάλυβα και την ταχύτητα παραμόρφωσης. Για τον υπολογισμό τους πραγματοποιήθηκαν εφελκυστικές δοκιμές υπό μονοτονική φόρτιση σε λεία δοκίμια καθώς και σε δοκίμια με εγκοπή (CNT: Circumferentially Notched Specimens) με γεωμετρία όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.6. Οι πειραματικές αυτές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο σιδηρουργίας του Πολυτεχνείου του Aachen του τομέα Μεταλλικών Κατασκευών από τον συγγραφέα της παρούσας διατριβής. Χαρακτηριστικά μεγέθη αυτών των δοκιμών αποτελούν η διάμετρος (D_{NR}) του καθαρού τμήματος που απομένει μετά την προσθήκη της εγκοπής, η διάμετρος (D_{UN}) της αρχικής διατομής καθώς και η ακτίνα (R_N) της ίδιας της εγκοπής.

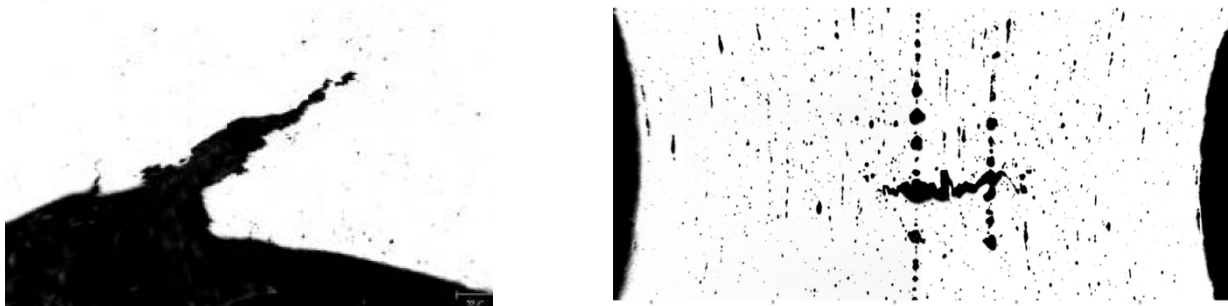


Σχήμα 7.6: Γεωμετρικά στοιχεία δοκιμών για τον προσδιορισμό των καμπύλων βλάβης

Οι δοκιμές αυτές διακόπτονται τη στιγμή απαρχής της ρηγμάτωσης. Εξαιτίας της διαφορετικής καμπυλότητας των εγκοπών που χρησιμοποιήθηκαν στα δοκίμια, δημιουργούνται διαφορετικές κατανομές τάσεων και τιμών του συντελεστή τριαξονικότητας με αποτέλεσμα η ρηγμάτωση να

πραγματοποιείται είτε στο κέντρο είτε στην περιφέρεια του δοκιμίου. Το αποτέλεσμα είναι στα δοκίμια με εγκοπή η ρηγμάτωση να ξεκινά στο κέντρο του δοκιμίου και να επεκτείνεται προς την εξωτερική του πλευρά, ενώ στα λεία δοκίμια η ρωγή αρχίζει στην επιφάνεια του δοκιμίου και επεκτείνεται προς το κέντρο όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.7.

Η απαρχή της ρηγμάτωσης κατά τη διάρκεια της εφελκυστικής δοκιμής γινόταν αντιληπτή από την απότομη πτώση του φορτίου στο διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης, ιδιαίτερα στα δοκίμια με εγκοπές όπου η ρωγή δεν ήταν δυνατό να γίνει αντιληπτή οπτικά καθώς σχηματίζεται στο μέσο του δοκιμίου. Η τιμή του φορτίου στο οποίο παρατηρείται η απαρχή ρηγμάτωσης βρίσκεται κοντά στο όριο θραύσης του δοκιμίου. Στη συνέχεια τα δοκίμια αφαιρούνται από το μηχάνημα που πραγματοποιούνται οι δοκιμές και κόβονται στο μέσο τους, παράλληλα με τον άξονα φόρτισης. Μετά από λείανση και με τη βοήθεια ηλεκτρονικού μικροσκοπίου, γίνονται παρατηρήσεις σχετικά με το ακριβές σημείο και τη στιγμή σχηματισμού της ρωγμής ενώ οι εικόνες των ρωγμών που δημιουργούνται φαίνονται στο Σχήμα 7.7. Στο σχήμα αυτό φαίνεται και η διαφορά στη θέση δημιουργίας της ρωγμής ανάλογα με το αν τα δοκίμια είχαν ή όχι εγκοπή στο μέσο τους.

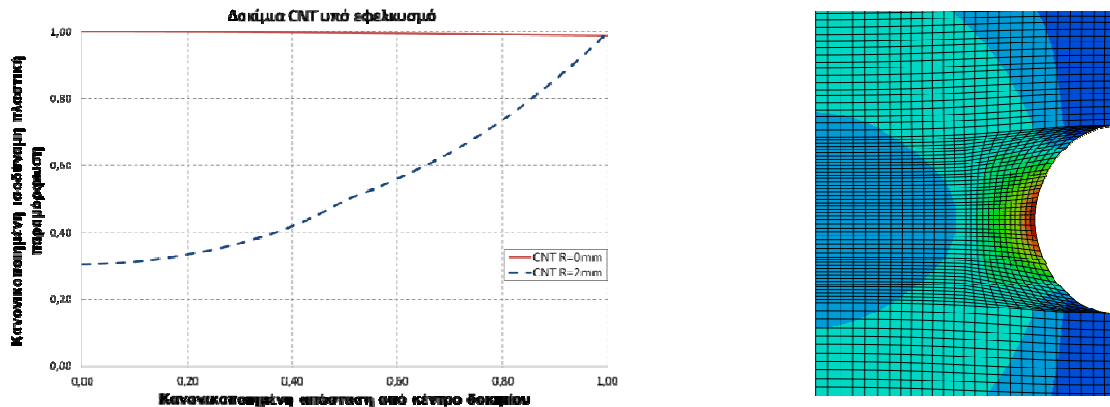


Σχήμα 7.7: Απαρχή ρηγμάτωσης σε λεία (αριστερά) και σε δοκίμια με εγκοπή (δεξιά)

Στη συνέχεια τα δοκίμια προσομοιώνονται με τη βοήθεια δισδιάστατων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων τα οποία χρησιμοποιούν τετρακομβικά στοιχεία επιφανείας για την προσομοίωση των πειραμάτων. Τα μοντέλα αυτά υπόκεινται σε ανάλυση με τη βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS υπό πανομοιότυπες συνθήκες με αυτές των πειραμάτων, ενώ προσομοιώνεται το 1/4 του δοκιμίου λόγω της διπλής συμμετρίας που το διακρίνει. Οι αναλύσεις αυτές, όπως και οι πειραματικές μετρήσεις, πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο σιδηρουργίας του Πολυτεχνείου του Aachen. Από τις αναλύσεις αυτές, με την ταυτόχρονη χρησιμοποίηση στοιχείων των πειραμάτων, προσδιορίζεται η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση και η τιμή του συντελεστή τριαξονικότητας στο σημείο που παρατηρήθηκε η απαρχή της ρηγμάτωσης, είτε αυτό ήταν στο κέντρο είτε στην περίμετρο του δοκιμίου.

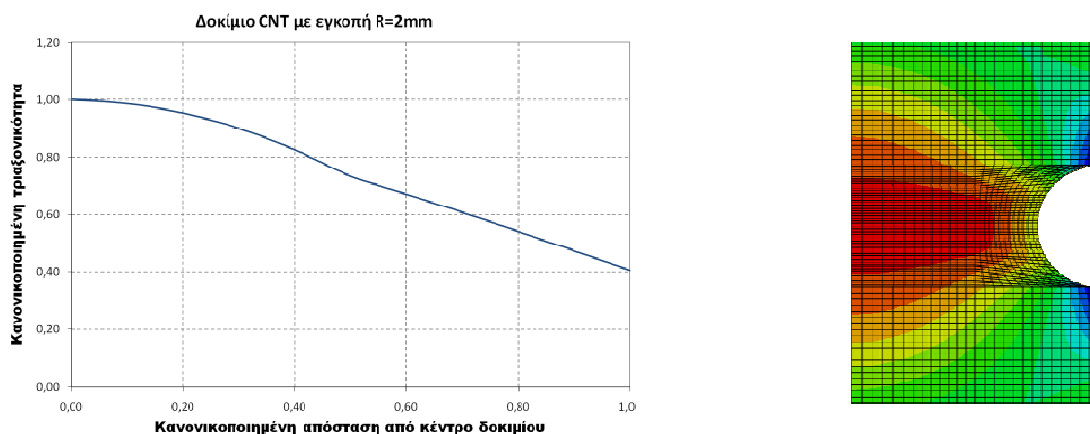
Η διαφορετική γεωμετρία των δοκιμίων CNT έχει σημαντική επίπτωση στη μορφή των διαγραμμάτων τριαξονικότητας και παραμορφώσεων όπως αυτό του Σχήματος 7.5. Ανάλογα με την ακτίνα της εγκοπής κάθε δοκιμίου, αυξάνεται ή μειώνεται η τιμή του συντελεστή τριαξονικότητας στο κέντρο ή στην περιφέρεια του δοκιμίου. Όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος της διαμέτρου καθαρής διατομής του δοκιμίου προς την ακτίνα της οπής (D_{NR}/R) τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του συντελεστή τριαξονικότητας στο κέντρο του δοκιμίου. Αντίθετα η κατανομή των ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων είναι μέγιστη στην εξωτερική επιφάνεια του δοκιμίου ανεξαρτήτως του μεγέθους της ακτίνας της εγκοπής. Ωστόσο, η τιμή της ακτίνας R της εγκοπής επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το σχήμα της κατανομής των πλαστικών παραμορφώσεων, με αποτέλεσμα μεγάλου μεγέθους εγκοπές να παρουσιάζουν μεγάλη διαφορά στις τιμές των παραμορφώσεων μεταξύ του μέσου και του ελεύθερου άκρου του δοκιμίου. Καθώς η ακτίνα της εγκοπής μικραίνει, η κατανομή των παραμορφώσεων παρουσιάζει μικρότερες διαφοροποιήσεις κατά μήκος της διαμέτρου του δοκιμίου CNT. Στο Σχήμα 7.8 φαίνεται η σύγκριση των ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων

ανάμεσα σε δοκίμιο CNT με εγκοπή ίση με $R=2\text{mm}$ και δοκίμιου χωρίς την παρουσία εγκοπής για το ίδιο επίπεδο φόρτισης. Οι τιμές του διαγράμματος είναι κανονικοποιημένες ως προς τη μέγιστη τιμή πλαστικών παραμορφώσεων και την απόσταση από το κέντρο του κάθε δοκίμιου. Είναι εμφανές ότι η παρουσία της εγκοπής επιφέρει μεγάλες διαφορές στην κατανομή των παραμορφώσεων κατά μήκος της διαμέτρου των δοκίμιων. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται και το περίγραμμα των ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων στο δοκίμιο CNT με εγκοπή ακτίνας $R=2\text{mm}$, όπως προκύπτει από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.



Σχήμα 7.8: Μεταβολή ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων συναρτήσει της απόστασης από το κέντρο του δοκίμιου (αριστερά) και αξονοσυμμετρικό σχήμα παραμορφώσεων για δοκίμιο CNT με εγκοπή $R=2\text{mm}$

Αντίστοιχα, στο Σχήμα 7.9 φαίνεται η κατανομή του συντελεστή τριαξονικότητας κατά μήκος της διαμέτρου ενός δοκίμιου CNT με ακτίνα εγκοπής $R=2\text{mm}$ κανονικοποιημένη ως προς τη μέγιστη τιμή της. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, η τιμή του συντελεστή τριαξονικότητας είναι μεγαλύτερη στο κέντρο του δοκίμιου σε σχέση με την εξωτερική του επιφάνεια. Ανάλογα συμπεράσματα προκύπτουν από το αξονοσυμμετρικό σχήμα της τριαξονικότητας όπως προκύπτει από την ανάλυση. Με μεταβολή της ακτίνας εγκοπής επιτυγχάνονται διαφορετικές τιμές του συντελεστή τριαξονικότητας στο μέσο του δοκίμιου, των οποίων η επίδραση στη δημιουργία ρωγμών μελετάται στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.



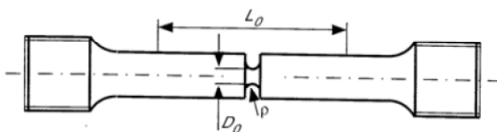
Σχήμα 7.9: Κανονικοποιημένη τριαξονικότητα ως προς την απόσταση από το κέντρο του δοκίμιου (αριστερά) και αξονοσυμμετρικό σχήμα κατανομής του συντελεστή τριαξονικότητας στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (δεξιά)

Η επιρροή της γεωμετρίας της εγκοπής και του δοκίμιου CNT στα αποτελέσματα αναδείχθηκε μέσα από μια σειρά πειραματικών διερευνήσεων σε δοκίμια ίσης διαμέτρου καθαρής διατομής, αλλά διαφορετικής ακτίνας εγκοπής. Η διαφοροποίηση αυτή στην ακτίνα της κάθε εγκοπής, έχει ως

αποτέλεσμα η απαρχή της ρηγμάτωσης να επέρχεται σε διαφορετική χρονική στιγμή καθώς στο σύνολο των πειραμάτων που περιγράφονται στη συνέχεια η ρωγή εμφανίστηκε στο κέντρο του κάθε δοκιμίου. Στο Σχήμα 7.10 και στον Πίνακα 7.2 περιγράφονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των τριών δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και η κρίσιμη εφελκυστική παραμόρφωση στην οποία παρατηρήθηκε απαρχή ρηγμάτωσης για κάθε γεωμετρία. Από τον πίνακα φαίνεται ότι η διάμετρος όλων των δοκιμίων είναι σταθερή και ίση με $D=8\text{mm}$, ενώ σταθερή παραμένει και η διάμετρος της καθαρής διατομής που απομένει μετά την εισαγωγή της οπής και η οποία είναι ίση με $D_o=4\text{mm}$. Το μόνο που αλλάζει κάθε φορά είναι η καμπυλότητα της εγκοπής, έτσι ώστε να μεταβάλλονται οι συνθήκες τριαξονικότητας στο δοκίμιο. Η ονομασία του κάθε δοκιμίου αποτελείται από δύο αριθμούς, με τον πρώτο να δείχνει την τιμή της ακτίνας της εγκοπής και το δεύτερο τη διάμετρο της καθαρής διατομής.

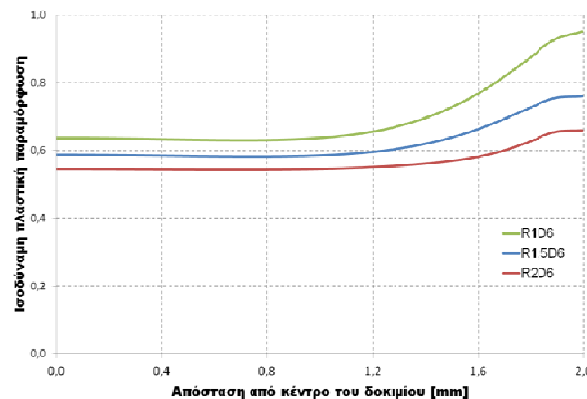
Πίνακας 7.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμίων και κατακόρυφη μετατόπιση κατά τη στιγμή της ρηγμάτωσης

Δοκίμια	D[mm]	D _o [mm]	ρ[mm]	D _o / ρ	δ _{crit} [mm]
R1D6	8,00	4,00	1,00	4,00	0,85
R1,5D6	8,00	4,00	1,50	2,66	1,12
R2D6	8,00	4,00	2,00	2,00	1,48



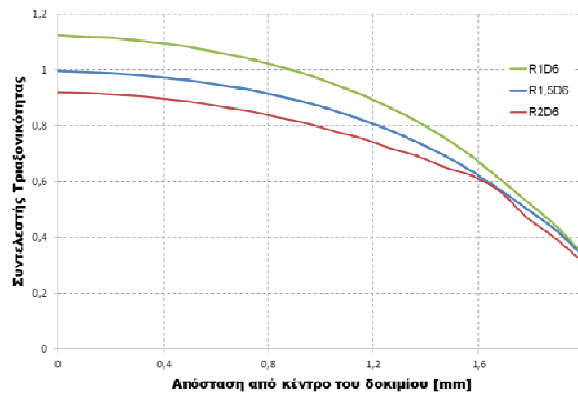
Σχήμα 7.10: Πειραματικό δοκίμιο

Στο Σχήμα 7.11 φαίνεται η τιμή των ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων των τριών δοκιμίων CNT κατά μήκος της διαμέτρου της καθαρής διατομής τους. Από το σχήμα φαίνεται ότι σε όλα τα δοκίμια η μέγιστη τιμή ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων βρίσκεται στην εξωτερική επιφάνεια των δοκιμίων, στο σημείο της εγκοπής. Όσο η ακτίνα της εγκοπής αυξάνεται, η κλίση του διαγράμματος μειώνεται, ενώ η τιμή των ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων κατά μήκος της διαμέτρου της καθαρής διατομής μειώνεται σε σχέση με τα δοκίμια που χαρακτηρίζονται από μικρότερες ακτίνες εγκοπών.



Σχήμα 7.11: Σύγκριση της επίδρασης διαφορετικής ακτίνας εγκοπής στην κατανομή των ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων στα δοκίμια CNT

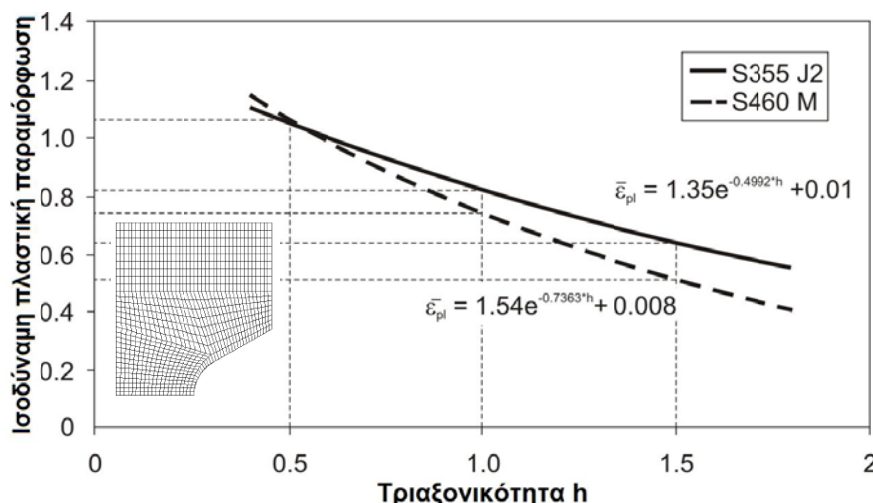
Στο Σχήμα 7.12 φαίνεται η τιμή του συντελεστή τριαξονικότητας κατά μήκος της καθαρής διαμέτρου των ίδιων τριών δοκιμίων. Παρατηρείται ότι ο συντελεστής τριαξονικότητας έχει τη μέγιστη τιμή του στο κέντρο των δοκιμίων, ενώ κατά την αύξηση της ακτίνας της εγκοπής η κλίση του διαγράμματος μειώνεται. Ταυτόχρονα, κατά την αύξηση της ακτίνας της εγκοπής, παρατηρείται μείωση των τιμών της τριαξονικότητας σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές της σε δοκίμια με μικρότερη ακτίνα εγκοπής.



Σχήμα 7.12: Σύγκριση της επίδρασης διαφορετικής ακτίνας εγκοπής στην κατανομή της τριαξονικότητας στα δοκίμια CNT

Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται η επίδραση που έχει η γεωμετρία της κάθε εγκοπής που χρησιμοποιείται στα δοκίμια CNT. Είναι εμφανές ότι η χρησιμοποίηση διαφορετικών καμπυλοτήτων στις εγκοπές, μας οδηγεί σε διαφορετικές κατανομές τιμών τριαξονικότητας και πλαστικών παραμορφώσεων μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η διερεύνηση της συμπεριφοράς του υλικού για ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών γεωμετρικών συνθηκών.

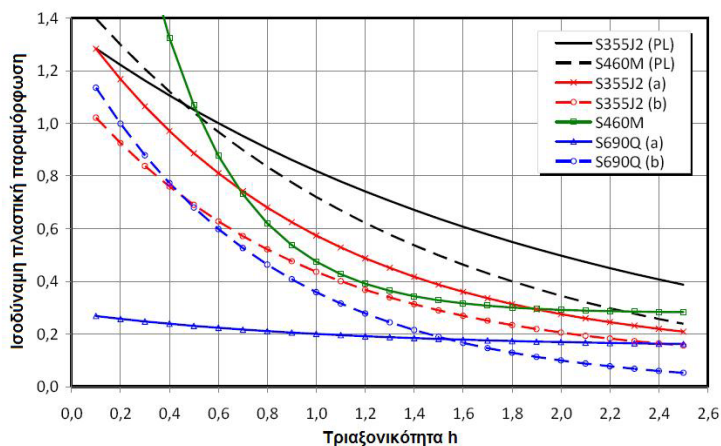
Κατά τις αναλύσεις ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος είναι το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται και ιδιαίτερα στην περιοχή που αναμένεται η δημιουργία της ρωγμής. Ο τρόπος που επιλέχθηκε το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων ανάγεται στον καθορισμό του χαρακτηριστικού μήκους το οποίο περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας τα δισδιάστατα στοιχεία στο κέντρο του δοκιμίου είχαν μέγεθος $\approx 0,1 \times 0,1 \text{mm}^2$. Στο Σχήμα 7.13 φαίνονται οι καμπύλες βλάβης που προκύπτουν για τις δύο ποιότητες χάλυβα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή. Στα πειράματα ανακυκλιζόμενων φορτίσεων που πραγματοποιούνται σε κόμβους δοκού-υποστύλωματος χρησιμοποιείται η καμπύλη του χάλυβα ποιότητας S355J2.



Σχήμα 7.13: Καμπύλες βλάβης για όλκιμη απαρχή ρηγμάτωσης

Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι καμπύλες βλάβης που υπολογίστηκαν με βάση τη διαδικασία που περιγράφηκε. Με σύγκριση όμως αποτελεσμάτων από τη χρήση καμπύλων βλάβης στη διεθνή βιβλιογραφία, γίνεται αντιληπτό ότι ανάλογα με την ποιότητα και τη δυσθραυστότητα ενός χάλυβα, οι αντοχές μιας κατασκευής μπορεί

να είναι σημαντικά μειωμένες έτσι ώστε υπό δυσμενείς συνθήκες η ρηγμάτωση να μην μπορεί να αποκλεισθεί. Αυτό μπορεί να γίνει ακόμα εντονότερο σε περιπτώσεις που οι ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις δεν προέρχονται αποκλειστικά λόγω της δράσης των εξωτερικών φορτίων, αλλά ενισχύονται από προϋπάρχουσες παραμορφώσεις κατά τη φάση της κατασκευής. Στο Σχήμα 7.14 φαίνονται καμπύλες βλάβης οι οποίες έχουν αναφερθεί στη διεθνή βιβλιογραφία, ενώ με μαύρο χρώμα αποτυπώνονται οι καμπύλες που προέκυψαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.



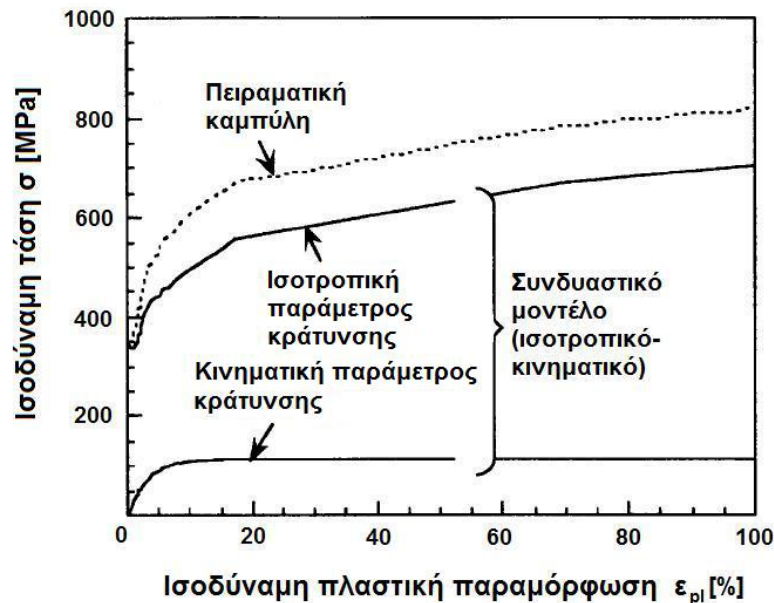
Σχήμα 7.14: Σύγκριση καμπύλων βλάβης από την παρούσα εργασία και τη διεθνή βιβλιογραφία [110], [111]

7.2.7 Αρχή ενεργού βλάβης

Οι καμπύλες βλάβης αναπτύχθηκαν για χρήση υπό μονοτονικές συνθήκες φόρτισης, όπου ο υπολογισμός του αθροίσματος των ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων και η σύγκριση του με την οριακή τιμή που καθορίζεται από την καμπύλη βλάβης είναι σχετικά απλή διαδικασία. Υπό συνθήκες ανακυκλιζόμενης φόρτισης όμως η ίδια διαδικασία οδηγεί σε εξαιρετικά συντηρητικά αποτελέσματα καθώς η τιμή των ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων αυξάνεται εξίσου τόσο κατά το θλιπτικό όσο και κατά το εφελκυστικό στάδιο της φόρτισης. Είναι λοιπόν απαραίτητη η εύρεση μιας διαδικασίας σύμφωνα με την οποία η χρήση της καμπύλης βλάβης και των πλαστικών παραμορφώσεων θα δίνει αποτελέσματα τα οποία θα συγκλίνουν με αυτά που προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα ανακυκλιζόμενων φορτίσεων. Η αρχή της ενεργού βλάβης, που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια, βασίζεται και αυτή στο μηχανισμό αύξησης του όγκου και σύνενωσης των κενών στο σώμα του υλικού υπό ανακυκλιζόμενες συνθήκες φόρτισης, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ποσοστού βλάβης στο υλικό.

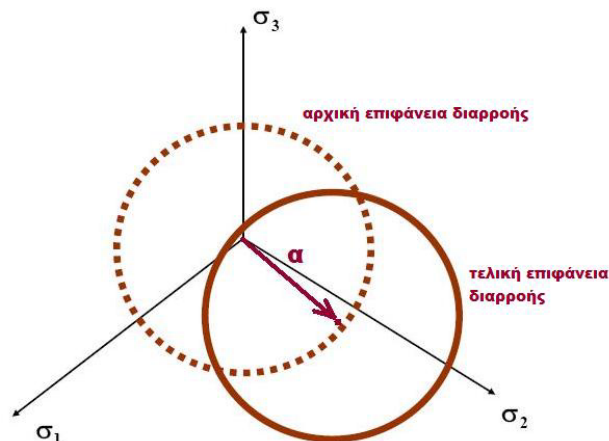
Η αρχή της ενεργού βλάβης που θα χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο της Osaka από τους Ohata και Toyoda [57]. Σύμφωνα με την αρχή αυτή το άθροισμα των πλαστικών παραμορφώσεων κατά τη φόρτιση ενός δοκιμίου ακολουθεί τις παρακάτω αρχές:

1. Το φαινόμενο Bauschinger λαμβάνεται υπόψη μέσω ενός συνδυαστικού μη γραμμικού ισοτροπικού και κινηματικού μοντέλου κράτυνσης όπως αυτό έχει ήδη περιγραφεί στο κεφάλαιο 6. Επομένως στο μοντέλο αυτό οι ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις και οι ισοδύναμες τάσεις της καμπύλης πραγματικών τάσεων-πραγματικών παραμορφώσεων αποτελούνται από δύο στοιχεία, μια ισοτροπική $\bar{\sigma}$ και μια κινηματική παράμετρο κράτυνσης α , οι οποίες φαίνονται στο Σχήμα 7.15.



Σχήμα 7.15: Μη γραμμικό ισοτροπικό και κινηματικό συστατικό σκλήρυνσης για την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία της ανακυκλιζόμενης φόρτισης [57]

Η κινηματική παράμετρος της κράτυνσης a απεικονίζει το κέντρο της επιφάνειας διαρροής στο χώρο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.15. Είναι δηλαδή ένα διάνυσμα, το οποίο μας δείχνει το μέγεθος και τη φορά κίνησης της επιφάνειας διαρροής στο χώρο κατά τη φόρτιση.



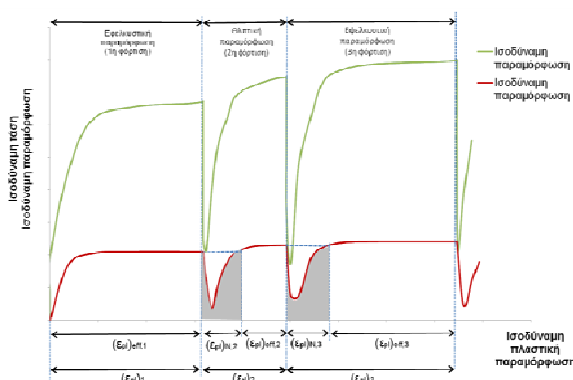
Σχήμα 7.16: Μετακίνηση της επιφάνειας διαρροής στο χώρο υπό το κινηματικό συστατικό κράτυνσης

Το μέτρο του διανύσματος της κινηματικής παραμέτρου κράτυνσης δίνεται από την εξίσωση:

$$\bar{a} = \sqrt{1/2((a_I - a_{II})^2 + (a_{II} - a_{III})^2 + (a_{III} - a_I)^2)} \quad (7.33)$$

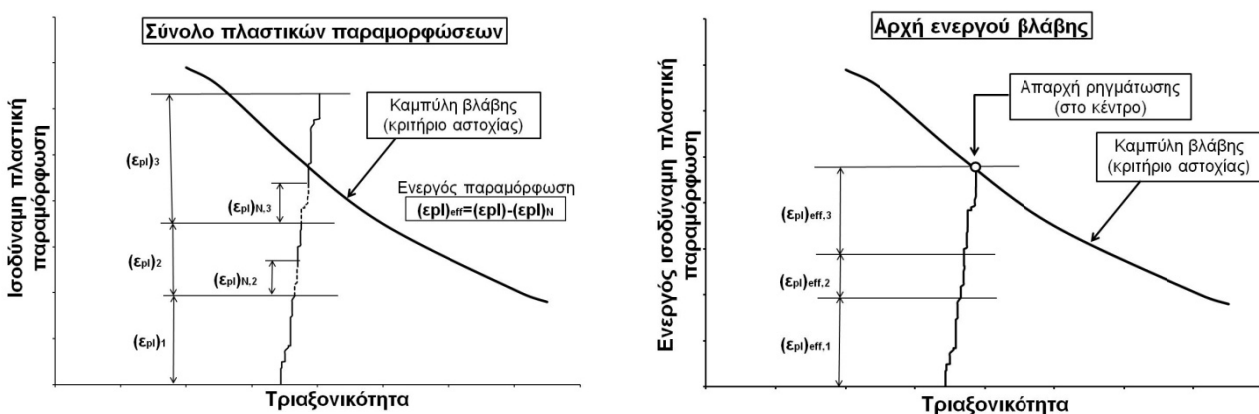
2. Για τη διαμόρφωση της τελικής τιμής των πλαστικών παραμορφώσεων στην περίπτωση ανακυκλιζόμενων φορτίσεων αθροίζονται οι τιμές των ενεργών ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων $(\bar{\epsilon}_{pl})_{eff}$ οι οποίες καθορίζονται από το διάγραμμα μεταβολής του κέντρου της επιφάνειας διαρροής (back stress \bar{a}) της κινηματικής παραμέτρου του μη γραμμικού μοντέλου κράτυνσης. Στο Σχήμα 7.16 φαίνεται η μεταβολή των τιμών της ισοδύναμης τάσης και της τιμής της κινηματικής παραμέτρου κράτυνσης συναρτήσει της πλαστικής

παραμόρφωσης. Στο σχήμα αυτό γίνεται γραφική απεικόνιση της διαδικασίας υπολογισμού των ενεργών ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων. Η βασική αρχή που διέπει τον υπολογισμό συνίσταται στην υπόθεση ότι κατά τον καθορισμό της τιμής της βλάβης του υλικού συμμετέχει μόνο εκείνο το τμήμα των πλαστικών παραμορφώσεων του διαγράμματος του Σχήματος 7.17 στο οποίο η τιμή της κινηματικής παραμέτρου κράτυνσης είναι μεγαλύτερη από την τιμή που είχε η παράμετρος αυτή στον προηγούμενο κύκλο φόρτισης. Το άθροισμα των τμημάτων αυτών της πλαστικής παραμόρφωσης χαρακτηρίζονται ως ενεργά και είναι υπεύθυνα για τη βαθμιαία βλάβη του υλικού και την τελική του ρηγμάτωση. Τα σκιαγραφημένα τμήματα του διαγράμματος αποτελούν τα διαστήματα των πλαστικών παραμορφώσεων, στα οποία η τιμή της κινηματικής παραμέτρου κράτυνσης είναι μικρότερη από τη μέγιστη τιμή της κατά το προηγούμενο βήμα φόρτισης. Αυτά δηλαδή τα τμήματα εξαιρούνται από τον υπολογισμό των ενεργών ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων.



Σχήμα 7.17: Προσδιορισμός των ενεργών ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων

Στο Σχήμα 7.18 φαίνεται η σύγκριση μεταξύ των ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων και των ενεργών ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων σε σχέση με την καμπύλη βλάβης. Όπως φαίνεται στο σχήμα, στην περίπτωση των ολικών ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων η αστοχία προκύπτει νωρίτερα από την αναμενόμενη στιγμή με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα. Η χρησιμοποίηση δηλαδή των πλαστικών παραμορφώσεων ως κριτήριο εύρεσης της βλάβης του υλικού θα οδηγούσε σε συντηρητικές σχεδιαστικές προσεγγίσεις. Αντίθετα, η απομείωση των ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων μέσω της αρχής ενεργού βλάβης που περιγράφηκε παραπάνω μας δίνει τελικά ακριβέστερα αποτελέσματα ως προς τη ρηγμάτωση του υλικού υπό ανακυκλιζόμενες φορτίσεις.



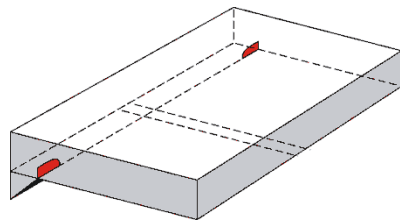
Σχήμα 7.18: Σύγκριση των ολικών ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων (αριστερά) και των ενεργών ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων (δεξιά) [57]

Η θεώρηση μόνο των ενεργών παραμορφώσεων ως χαρακτηριστικό γνώρισμα αύξησης της βλάβης οφείλεται στη μεταβολή της μικροδομής του υλικού κατά τους ανακυκλιζόμενους κύκλους φόρτισης. Συγκεκριμένα, κατά τα εφελκυστικά διαστήματα φόρτισης, τα σωματίδια του υλικού συσσωρεύονται γύρω από ορισμένα σημεία εξαιτίας των οποίων εμποδίζεται η ελεύθερη μετακίνηση τους, όπως περιμετρικά διαφόρων εγκλεισμάτων του υλικού. Εξαιτίας της συμπίκνωσης αυτής του υλικού σε συγκεκριμένες περιοχές παρατηρείται αύξηση των εσωτερικών τάσεων στα σημεία αυτά. Κατά την αντιστροφή του φορτίου, εξαιτίας της ύπαρξης αυτών των τάσεων, τα σωματίδια του υλικού μπορούν να κινούνται με μεγαλύτερη ευκολία σε σχέση με την προηγούμενη κατάστασή τους. Η θεώρηση αυτή είναι και η βασική αρχή που κρύβεται πίσω από το φαινόμενο του Bauschinger [87]. Η μεταβολή της τιμής του διανύσματος της κινηματικής παραμέτρου κράτνσης ποσοτικοποιεί κατά ένα τρόπο το φαινόμενο Bauschinger. Η τιμή της παραμέτρου αυτής δηλαδή κατά τη διάρκεια των ανακυκλίσεων μπορεί να προσδιορίσει την ευκολία μετακίνησης των σωματιδίων του υλικού μέσα στο δοκίμιο. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή δηλαδή, τόσο ευκολότερη είναι η μετακίνηση. Επομένως, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της κινηματικής παραμέτρου κράτνσης, τόσο μεγαλύτερες είναι και οι τάσεις στο εσωτερικό του υλικού και τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό βλάβης του υλικού, αυξάνοντας κατά αυτόν τον τρόπο την πιθανότητα αστοχίας. Τελικά, η μέγιστη τιμή της κινηματικής παραμέτρου κράτνσης a_f σε κάποιο στάδιο μιας ανακυκλιζόμενης φόρτισης, σχετίζεται με το μέγεθος της μετατόπισης των σωματιδίων του υλικού και επομένως με την έκταση της βλάβης στο σώμα αυτού.

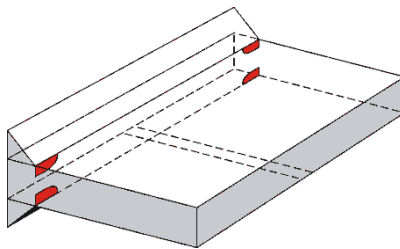
7.3 Αποτελέσματα αναλύσεων

Η αρχή της ενεργού βλάβης χρησιμοποιήθηκε ως μέσο πρόβλεψης της απαρχής ρηγμάτωσης στις αναλύσεις των πειραματικών διατάξεων δοκού-υποστυλώματος με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Κατά την εφαρμογή της αρχής αυτής, χρησιμοποιήθηκαν υποφορείς πεπερασμένων στοιχείων, όπως αυτοί περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 6. Η χρήση των υποφορέων επέτρεψε την απομόνωση των κρίσιμων περιοχών που αναμενόταν η εμφάνιση ρωγμών, δηλαδή είτε περιμετρικά της συγκόλλησης είτε στην περιοχή του τοπικού λυγισμού της διατομής της δοκού. Με τη διαδικασία αυτή ήταν δυνατό να επιτευχθεί εντονότερη διακριτοποίηση με σκοπό τον ακριβέστερο υπολογισμό των πλαστικών παραμορφώσεων και της τιμής της τριαξονικότητας σε κάθε σημείο των κρίσιμων αυτών περιοχών.

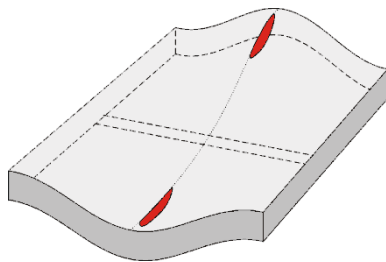
Στο Σχήμα 7.19 περιγράφονται περιληπτικά τα σημεία που παρατηρήθηκε δημιουργία ρωγμών και περιλαμβάνονται στις περιοχές των υποφορέων που απομονώθηκαν με σκοπό την καλύτερη διερεύνηση τους. Οι περιοχές αυτές βρίσκονται όπως φαίνεται από το Σχήμα 7.19 είτε στο σημείο τερματισμού της συγκόλλησης στην περιοχή της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης, είτε στα πέλαμα των δοκών στην περιοχή της πλαστικής άρθρωσης. Τα σημεία αυτά ήταν τα πρώτα στα οποία παρατηρήθηκε ρηγμάτωση κατά την εφαρμογή των χρονοϊστοριών φόρτισης. Ρωγμές παρατηρήθηκαν αργότερα και σε άλλες περιοχές, ωστόσο η αστοχία των συνδέσεων επήλθε εξαιτίας της αύξησης του μεγέθους των ρωγμών του Σχήματος 7.19.



Τύπος I (εσωραφές)



Τύπος I (εξωραφές)

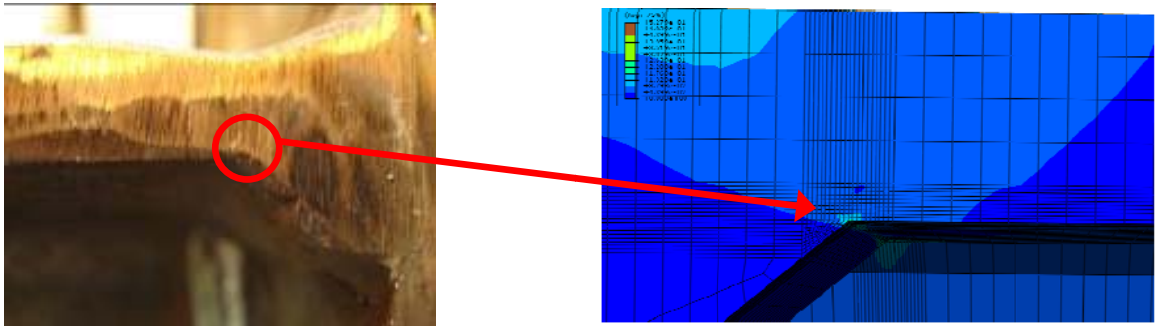


Τύπος II

*Σχήμα 7.19: Τύποι παρατηρούμενων ρωγμών κατά τη διάρκεια των ανακυκλιζόμενων πειραμάτων*

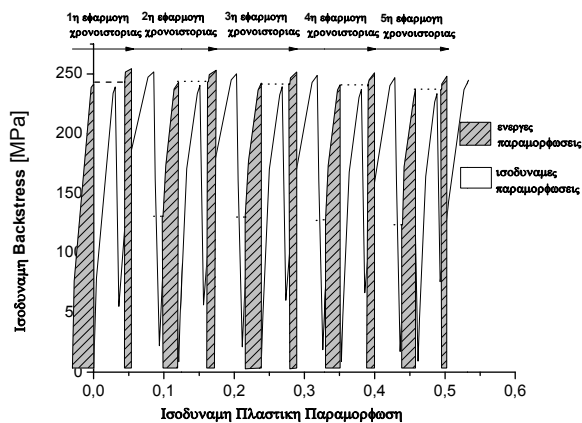
Στη συνέχεια περιγράφεται ο τρόπος υπολογισμού της χρονικής στιγμής και του σημείου απαρχής ρηγμάτωσης με τη χρήση της αρχής της ενεργού βλάβης για το πειραματικό δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε στο Κεφάλαιο 6. Η διαδικασία είναι πανομοιότυπη και για τις υπόλοιπες συνδέσεις δοκού-υποστυλώματος, τα αποτελέσματα των οποίων περιλαμβάνονται στο παράρτημα Ε.

Στο Σχήμα 7.20 φαίνεται το σημείο απαρχής της ρηγμάτωσης του παραδείγματος που περιγράφεται και η οποία είναι τύπου I για τη μέθοδο συγκόλλησης με εξωραφές σύμφωνα με το Σχήμα 7.19. Όπως διακρίνεται στο σχήμα η ρωγή εμφανίστηκε στην περιοχή της συγκόλλησης και συγκεκριμένα στην κάτω επιφάνεια του άνω πέλματος της δοκού. Στο Σχήμα 7.20 φαίνονται επίσης γραφικά οι ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις τη στιγμή απαρχής της ρηγμάτωσης, η μέγιστη τιμή των οποίων συμπίπτει με το σημείο σχηματισμού της αρχικής ρωγμής στη σύνδεση.



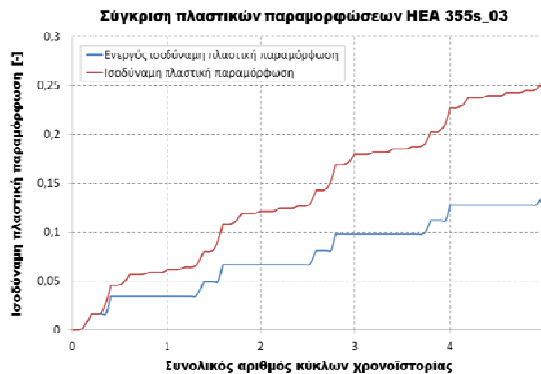
Σχήμα 7.20: Σημείο απαρχής ρηγμάτωσης (αριστερά) και διάγραμμα ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων του υπομοντέλου (δεξιά)

Ως κριτήριο εύρεσης του ποσοστού της βλάβης στο υλικό χρησιμοποιήθηκε η αρχή της ενεργού βλάβης όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Στο Σχήμα 7.21 παρουσιάζεται το διάγραμμα υπολογισμού των ενεργών ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων για το παράδειγμα που αναλύεται και το οποίο είναι αντίστοιχο του διαγράμματος του Σχήματος 7.17 με τη διαφορά ότι πρόκειται για πιο σύνθετη ιστορία φόρτισης. Στο Σχήμα 7.21 οι γραμμωσκιασμένες περιοχές αποτελούν τα διαστήματα κατά τα οποία αθροίζονται οι πλαστικές παραμορφώσεις κατά τον τελικό υπολογισμό των ενεργών ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων.



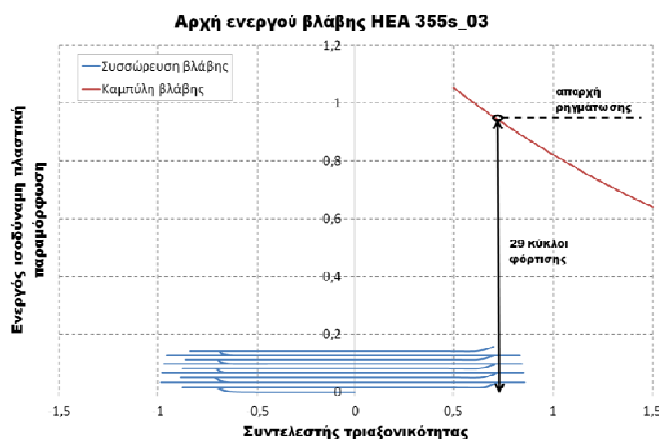
Σχήμα 7.21: Προσδιορισμός ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων του πειράματος

Στο Σχήμα 7.22 φαίνεται η διαφορά μεταξύ των τιμών της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης και της ενεργού ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης. Από το σχήμα αυτό φαίνεται ότι η χρήση της ολικής ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης θα οδηγούσε σε πρόωρη πρόβλεψη πρόωρης αστοχίας οδηγώντας τελικά σε συντηρητικά αποτελέσματα.



Σχήμα 7.22: Σύγκριση ενεργής και ολικής ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης

Στο Σχήμα 7.23 παρουσιάζεται γραφικά η διαδικασία αρχής της ενεργού βλάβης για τον υπολογισμό της απαρχής ρηγμάτωσης για το συγκεκριμένο πείραμα. Συγκεκριμένα, φαίνεται η σχέση μεταξύ των ενεργών ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων και του συντελεστή τριαξονικότητας κατά τη διάρκεια της ιστορίας φόρτισης. Η απαρχή της ρηγμάτωσης πραγματοποιείται όταν το διάγραμμα ενεργών παραμορφώσεων τμηθεί με την καμπύλη βλάβης του χάλυβα S355J2 από τον οποίο είναι κατασκευασμένη η σύνδεση.



Σχήμα 7.23: Πρόβλεψη απαρχής ρηγμάτωσης

Από το διάγραμμα του Σχήματος 7.23 φαίνεται ότι μετά τους δύο πρώτους κύκλους φόρτισης η συσσώρευση βλάβης με τη μορφή των ενεργών ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων ακολουθεί σταθερό ρυθμό αύξησης. Η παρατήρηση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι δεν είναι αναγκαίο να προσομοιωθεί ολόκληρη η ιστορία φόρτισης μέχρι την απαρχή της ρηγμάτωσης στη σύνδεση, εφόσον παραμένουν σταθερές η γεωμετρία της σύνδεσης (χωρίς παρουσία φαινομένων τοπικού λυγισμού) και η ιστορία φόρτισης. Αν οι συνθήκες αυτές ικανοποιούνται, η ενεργός ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση αυξάνεται με σταθερό ρυθμό σε κάθε κύκλο φόρτισης μετά τη διαδρομή της σύνδεσης. Σύμφωνα με την αριθμητική ανάλυση, στο παράδειγμα αυτό η απαρχή της ρηγμάτωσης λαμβάνει χώρα με την παρέλευση 29 κύκλων φόρτισης, ενώ κατά τη διάρκεια του πειράματος η πρώτη ρωγμή παρατηρήθηκε μετά από 24 κύκλους φόρτισης.

7.4 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Οι συγκολλήσεις που χρησιμοποιήθηκαν στις συνδέσεις δοκού-υποστυλώματος στα πλαίσια του προγράμματος PLASTOTOUGH [2] παρουσίασαν διαφορετική συμπεριφορά ανάλογα με τον τρόπο συγκόλλησης που έχει χρησιμοποιηθεί παρότι υποβλήθηκαν στις ίδιες συνθήκες φόρτισης. Η γενική παρατήρηση που προκύπτει από τα πειράματα είναι ότι στα δοκίμια εκείνα όπου η σύνδεση δοκού-υποστυλώματος έχει πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια εσωραφών υπέστησαν τοπικό λυγισμό στη δοκό σε μετέπειτα στάδιο της ιστορίας φόρτισης σε σχέση με την περίπτωση των κόμβων στους οποίους χρησιμοποιήθηκαν εξωραφές για τη συγκόλληση των δοκών στο υποστυλώμα. Το γεγονός αυτό είχε αντίκτυπο και στο χρονικό σημείο δημιουργίας της ρωγμής καθώς ο τοπικός λυγισμός των δοκών επιβάρυνε σημαντικά τις πλαστικές παραμορφώσεις στην περιοχή περιμετρικά της συγκόλλησης και ιδιαίτερα στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη.

Στον Πίνακα 7.3 συνοψίζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών και των αριθμητικών διερευνήσεων που πραγματοποιήθηκαν ως προς το χρονικό σημείο στο οποίο εμφανίστηκε η

ρηγματώση. Ο πίνακας διαχωρίζεται σε δύο κύριες κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τις συνδέσεις των οποίων οι δοκοί είναι διατομής HEA300, ενώ η δεύτερη εμπεριέχει τους κόμβους που δημιουργήθηκαν με χρήση δοκών διατομής IPE500. Οι δύο αυτές κατηγορίες διαχωρίζονται σε δύο επιπλέον υποκατηγορίες ανάλογα με τον τύπο της συγκόλλησης που χρησιμοποιήθηκε για τη σύνδεση μεταξύ δοκού και υποστύλωματος (εξωραφές ή εσωραφές). Στον πίνακα φαίνεται επίσης ο αριθμός των συνολικών κύκλων της ιστορίας της φόρτισης (στην περίπτωση του ποσοστημόριου 95% και του σεισμού του Kobe) έως την απαρχή της ρηγματώσης.

Όπως φαίνεται από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων, η χρήση της αρχής της ενεργού βλάβης αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την πρόβλεψη της αρχικής ρηγματώσης καθώς παρατηρείται καλή συμφωνία μεταξύ πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων. Για τους συνδέσμους που αποτελούνται από δοκούς διατομής IPE500, τα αποτελέσματα δεν παρουσιάζουν την ίδια ακρίβεια με αυτά των δοκών διατομής HEA300. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην περίπτωση των συνδέσεων με δοκούς IPE500, παρατηρήθηκαν σημαντικές εκτός επιπέδου μετατοπίσεις της διάταξης κατά τη διάρκεια των πειραμάτων και τα οποία δεν προσομοιώθηκαν κατά τη διάρκεια των αναλύσεων. Η απαρχή της ρηγματώσης στην περιοχή της συγκόλλησης επηρεάστηκε από αυτά τα φαινόμενα με αποτέλεσμα σε ορισμένες περιπτώσεις να μην υπάρχει καλή σύγκλιση μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων.

Πίνακας 7.3: Πειραματικά και αναλυτικά αποτελέσματα απαρχής ρηγματώσης

Γεωμετρία σύνδεσης	Χρονοϊστορία φόρτισης	Αριθμός κύκλων έως την απαρχή ρηγματώσης			
		Εξωραφές		Εσωραφές	
		Πειρ.	Αναλ.	Πειρ.	Αναλ.
Διατομές HEA	ECCS	9	10	9	10
	ποσοστημόριο 95%	25	24	24	29
	Σεισμός Kobe	3	3	6	8
	Σταθερού εύρους 70mm	8	8	6	7
Διατομές IPE	ECCS	6	8	7	10
	ποσοστημόριο 95%	14	9	23	12
	Σταθερού εύρους 70mm	10	8	8	10

Στη συνέχεια πραγματοποιείται στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων των ανακυκλιζόμενων φορτίσεων για τις πειραματικές και αναλυτικές διερευνήσεις. Στον Πίνακα 7.4 φαίνονται οι διορθωτικές τιμές b_i για κάθε συνδυασμό πειραματικών και αριθμητικών διερευνήσεων σύμφωνα με την εξίσωση:

$$b_i = \frac{R_{ei}}{R_{ti}} \tag{7.34}$$

Όπου R_{ei} είναι ο αριθμός των κύκλων φόρτισης μέχρι τη ρηγματώση σύμφωνα με τα πειράματα και R_{ti} είναι ο αριθμός των κύκλων φόρτισης μέχρι τη ρηγματώση σύμφωνα με τις αναλύσεις.

Στον ίδιο πίνακα φαίνεται η μέση τιμή b_m των διορθωτικών συντελεστών καθώς και η διόρθωση των θεωρητικών τιμών σύμφωνα με την εξίσωση (7.35). Στην εξίσωση (7.36) φαίνεται το σφάλμα που χαρακτηρίζει κάθε μέτρηση.

$$R_{mt} = b_m R_t \quad (7.35)$$

$$\delta_i = \frac{R_{ei}}{b_m R_{ti}} \quad (7.36)$$

Πίνακας 7.4: Πειραματικές και αναλυτικές τιμές ρηγμάτωσης κόμβων δοκού-υποστυλώματος, διορθωτικές τιμές και τιμές σφάλματος

Γεωμετρία σύνδεσης	Τύπος συγκόλλησης	Χρονοϊστορία φόρτισης	R_e	R_t	b	R_{mt}	δ
Διατομές HEA	Εξωραφές	ECCS	9	10	0,90	10,18	0,88
		Ποσοστημόριο 95%	25	24	1,04	24,43	1,02
		Σεισμός Kobe	3	3	1,00	3,05	0,98
		Σταθερού εύρους 70mm	8	8	1,00	8,14	0,98
	Εσωραφές	ECCS	9	10	0,90	10,18	0,88
		Ποσοστημόριο 95%	24	29	0,83	29,51	0,81
		Σεισμός Kobe	6	8	0,75	8,14	0,74
		Σταθερού εύρους 70mm	6	7	0,86	7,12	0,84
Διατομές IPE	Εξωραφές	ECCS	6	8	0,75	8,14	0,74
		Ποσοστημόριο 95%	14	9	1,56	9,16	1,53
		Σταθερού εύρους 70mm	10	8	1,25	8,14	1,23
	Εσωραφές	ECCS	7	10	0,70	10,18	0,69
		Ποσοστημόριο 95%	23	12	1,92	12,21	1,88
		Σταθερού εύρους 70mm	8	10	0,80	10,18	0,79
					$b_m=1,02$		

Η τυπική απόκλιση των σφαλμάτων είναι ίση με το συντελεστή μεταβλητότητας των σφαλμάτων όπως αυτός αποτυπώνεται στην εξίσωση:

$$s_\delta = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_1^n (\delta_i^2 - \delta_m^2)} = 0,34 \quad (7.37)$$

Η χαρακτηριστική τιμή της αντοχής των συγκολλητών κόμβων δοκού-υποστυλώματος έναντι αρχικής δημιουργίας ρωγμών φαίνεται στην εξίσωση (7.38) για τιμή συντελεστή k_s που προκύπτει για ποσοστημόριο 5% σύμφωνα με τις τιμές που προτείνει ο EN1990 [136].

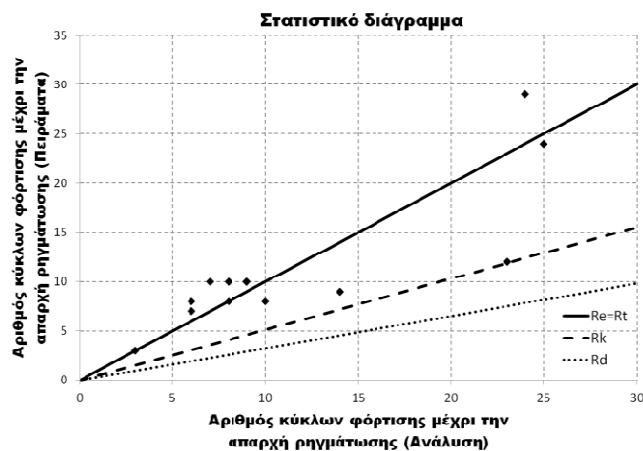
$$R_k = R_m \cdot \exp(-k_s \cdot s_\delta - 0,5 \cdot s_\delta^2) = R_m \cdot \exp(-1,87 \cdot s_\delta - 0,5 \cdot s_\delta^2) = 0,50 \cdot R_m \quad (7.38)$$

Ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας των αντιστάσεων γ_M προκύπτει για $v=14$ πειραματικά δεδομένα και για τιμή συντελεστή k_d σύμφωνα με την προτεινόμενη από τον EN1990 [112] για πιθανότητα αστοχίας 0,1% προκύπτει από την εξίσωση (7.39), ενώ στην εξίσωση (7.40) αποτυπώνεται η εξίσωση σχεδιασμού R_d .

$$\gamma_M = \exp(k_\delta - k_s) s_\delta = 1,57 \quad (7.39)$$

$$R_d = \frac{0,50R_m}{1,57} = 0,32R_m \quad (7.40)$$

Στο Σχήμα 7.23 σχεδιάζονται η μέση, η χαρακτηριστική και η καμπύλη σχεδιασμού για τη διάταξη του πειράματος της εργασίας. Η σύγκλιση μεταξύ πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων είναι καλύτερη εφόσον στους υπολογισμούς δεν συμπεριλαμβάνονται οι πειραματικές δοκιμές των κόμβων με δοκούς διατομής IPE. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι εξαιτίας των εκτός επιπέδου παραμορφώσεων των συνδέσεων δοκών-υποστυλωμάτων, παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες αποκλίσεις μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών υπολογισμών σε σχέση με τις δοκούς διατομής HEA. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να προκύπτει μεγάλος συντελεστής ασφαλείας λόγω της μεγάλης τυπικής απόκλισης που έχουν τα σφάλματα μεταξύ των πειραματικώς μετρούμενων και θεωρητικώς υπολογισθέντων αποτελεσμάτων ως προς τη δημιουργία ρωγμών στις διατάξεις με δοκούς διατομής IPE.



Σχήμα 7.23: Στατιστική επεξεργασία ανακυκλιζόμενων φορτίσεων

8 Εξαγωγή καμπυλών ολιγοκυκλικής κόπωσης υπό περιορισμένο αριθμό κύκλων

8.1 Εισαγωγή

Όπως αναλύθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια, η αστοχία λόγω ολιγοκυκλικής κόπωσης περιορισμένου αριθμού κύκλων (ultra-low cycle fatigue) στο χάλυβα δημιουργείται εξαιτίας της ανάπτυξης μεγάλων τοπικών παραμορφώσεων ανάλογα με τη χρονοϊστορία φόρτισης. Για την αποφυγή αυτού του τύπου αστοχίας είναι απαραίτητος ο επανασχεδιασμός των μελών της κατασκευής που εμφανίζουν αυξημένες παραμορφώσεις. Εναλλακτικά, η αποφυγή των αστοχιών μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω κατάλληλης επιλογής της ποιότητας του χάλυβα, ώστε αυτός να μπορεί να αντισταθεί στους μηχανισμούς που οδηγούν στην εμφάνιση και αύξηση των ρωγμών στο υλικό.

Η ανάγκη για πρόβλεψη του κρίσιμου αριθμού κύκλων φόρτισης και της γεωμετρικής περιοχής στην οποία λαμβάνει χώρα η αστοχία μιας κατασκευής ή ενός μέλους οδήγησε στην ανάπτυξη μεθοδολογιών με χρήση των οποίων υπολογίζεται με ικανοποιητική ακρίβεια το σημείο αυτό. Οι μεθοδολογίες αυτές βασίζονται στο συνδυασμό παρατηρήσεων πραγματικών κατασκευών που αστόχησαν, πειραματικών δεδομένων και εμπειρικών σχέσεων από τη θεωρία της κόπωσης. Οι αρχικές θεωρίες που αναπτύχθηκαν για το φαινόμενο της κόπωσης είχαν ως στόχο την περιγραφή της συσσώρευσης της βλάβης υπό φορτίσεις σταθερού εύρους. Οι παράμετροι που έπρεπε να υπολογιστούν ήταν ο ρυθμός αύξησης της βλάβης και η κρίσιμη τιμή της, η οποία καθορίζει την αστοχία. Για την περίπτωση κύκλων μη σταθερού εύρους οι Palmgren-Miner [113]-[114] επέκτειναν τη θεωρία αυτή συγκρίνοντας τη σχέση με αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις οι οποίες επέδειξαν καλή σύγκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων. Η ευκολία που διέπει τις αρχές αυτής της θεωρητικής προσέγγισης οδήγησε στην υιοθέτησή της από πληθώρα ερευνητών καθώς απαιτεί τον προσδιορισμό μικρού αριθμού παραμέτρων.

Όπως γίνεται αντιληπτό, η εύρεση της σχέσης μεταξύ του αριθμού των κύκλων και της έντασης της φόρτισης στην οποία μια κατασκευή αστοχεί, μπορεί να οδηγήσει σε διαγράμματα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευαστική πρακτική. Με τον τρόπο αυτό γίνεται εφικτή η επιλογή της κατάλληλης ποιότητας υλικού, ανάλογα με το φορτίο που προβλέπεται να δεχθεί η κατασκευή και την κατασκευαστική λεπτομέρεια που μελετάται. Τα διαγράμματα αυτά ακολουθούν την ίδια λογική με τις καμπύλες κόπωσης $S-N$ που εμπεριέχονται στον EN1993-1-9 [3], με τη διαφορά ότι αφορούν συνθήκες υπέρ-ολιγοκυκλικής κόπωσης όπου η αστοχία επέρχεται μετά την πάροδο μερικών δεκάδων κύκλων φόρτισης.

8.2 Σχέση των Manson- Coffin

Στην περίπτωση έργων πολιτικού μηχανικού στα οποία αναπτύσσονται πλαστικές παραμορφώσεις σε κάθε κύκλο φόρτισης, η αντοχή περιγράφεται από τη σχέση των Manson-Coffin [115]-[116]. Σε πολλές περιπτώσεις το κρίσιμο σημείο αστοχίας αποτελεί μια εγκοπή ή ένα σημείο απότομης εναλλαγής της γεωμετρίας του μέλους με αποτέλεσμα να εμφανίζονται πλαστικές παραμορφώσεις οι οποίες περιβάλλονται από υλικό ευρισκόμενο στην ελαστική κατάσταση. Η ολική παραμόρφωση δηλαδή, αποτελείται από ελαστικό και πλαστικό μέρος. Στην εξίσωση (8.1) αποτυπώνεται η σχέση που προτάθηκε από τους Manson-Coffin με βάση τις πλαστικές

παραμορφώσεις του υλικού. Η εξίσωση αυτή, με κατάλληλες τροποποιήσεις, μπορεί να περιλάβει τις ολικές παραμορφώσεις του υλικού.

$$\Delta \varepsilon_p (N_T)^Z = C \quad (8.1)$$

όπου C είναι σταθερά του υλικού που εξαρτάται από την ολκιμότητα και την παραμόρφωση αστοχίας,

z είναι σταθερά η οποία κυμαίνεται μεταξύ 0,5 και 0,7 με μικρή εξάρτηση από το υλικό,

N_T είναι ο αριθμός των κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία και

$\Delta \varepsilon_p$ είναι το εύρος της πλαστικής παραμόρφωσης.

Η ευρεία χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και η αυξανόμενη υπολογιστική ισχύς επιτρέπουν τον άμεσο και ακριβή υπολογισμό των τοπικών τάσεων και παραμορφώσεων σε πληθώρα διαφορετικών γεωμετρικών διατάξεων. Για το λόγο αυτό η σχέση των Manson-Coffin έχει βρει εφαρμογή στις περιπτώσεις ολιγοκυκλικής κόπωσης όπου η παρουσία πλαστικών παραμορφώσεων είναι σημαντική.

8.3 Υπολογισμός αντοχής έναντι κόπωσης

Οι καμπύλες βλάβης, στις οποίες βασίζεται η αρχή της ενεργού βλάβης, αποτελούν ένα μοντέλο υπολογισμού αστοχίας το οποίο βασίζεται στις ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις της μικροδομής του υλικού. Για πρακτικούς λόγους είναι απαραίτητη η μετάβαση σε ένα ισοδύναμο μοντέλο, που θα είναι ικανό να προβλέπει την αστοχία στο επίπεδο της σύνδεσης ή της κατασκευής. Για το λόγο αυτό οι καμπύλες βλάβης θα μετασχηματιστούν σε καμπύλες αντοχής, οι οποίες σχετίζονται με τα εντατικά μεγέθη τα οποία χαρακτηρίζουν το σύνολο της κατασκευής και των συνδέσεων της και όχι στο επίπεδο των κόκκων του υλικού.

Ο υπολογισμός της αντοχής έναντι κόπωσης ενός υλικού ή μιας κατασκευαστικής λεπτομέρειας απαιτεί τη χρήση τεχνικών για το συνδυασμό μεταξύ μιας παραμέτρου (S) η οποία είναι χαρακτηριστική των επιβαλλόμενων κυκλικών δράσεων και της αντοχής έναντι κόπωσης (N) η οποία εκφράζεται με τον αριθμό των κύκλων έως την αστοχία. Συνήθως στην αντοχή σε κόπωση, η συμπεριφορά των υλικών περιγράφεται από τις καμπύλες $S-N$, οι οποίες είναι γνωστές και ως καμπύλες Wöhler [117]. Η παράμετρος S του υλικού αναφέρεται στο εύρος μεταβολής της τάσης $\Delta \sigma_o$. Το πλεονέκτημα των καμπύλων $S-N$ είναι η άμεση εφαρμογή τους κατά το δομικό σχεδιασμό εξαιτίας της ευκολίας χρήσης τους. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές μορφές καμπύλων $S-N$, αλλά στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θα χρησιμοποιηθεί η απλή σχέση που αποτυπώνεται στην εξίσωση (8.2).

$$NS^m = K \quad (8.2)$$

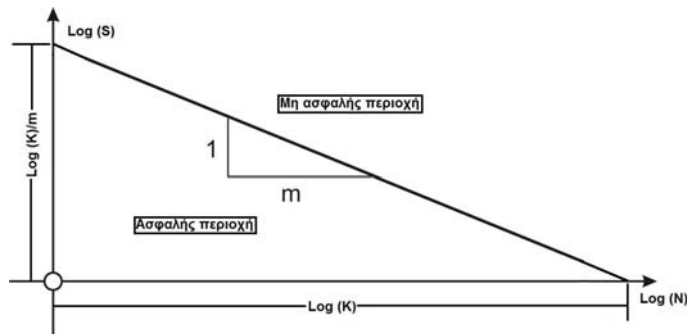
όπου N είναι ο αριθμός των κύκλων μέχρι την αστοχία υπό σταθερή τάση S ,

m και K είναι αδιάστατες σταθερές που εξαρτώνται από την τυπολογία και τις μηχανικές ιδιότητες του υπό εξέταση μεταλλικού στοιχείου

Σε λογαριθμική κλίμακα η εξίσωση (8.2) μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\text{Log}(N) = \text{Log}(K) - m \text{Log}(S) \quad (8.3)$$

Η εξίσωση (8.3) αναπαριστά μια ευθεία γραμμή με κλίση ίση με $-1/m$ και η οποία χωρίζει τις περιοχές του διαγράμματος σε ασφαλή και μη ασφαλή όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.1.



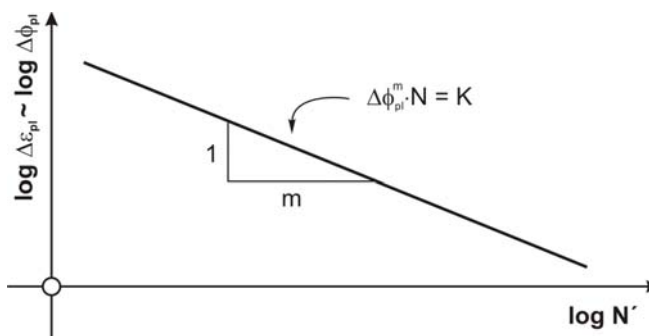
Σχήμα 8.1: Καμπύλη αντοχής σε κόπωση υπό λογαριθμική κλίμακα

Η απλότητα των καμπυλών $S-N$ έχει οδηγήσει πολλούς κανονισμούς στην υιοθέτησή τους ως μέσο πρόβλεψης της αντοχής έναντι κόπωσης. Οι καμπύλες αντοχής έναντι κόπωσης, όπως αυτή του Σχήματος 8.1, που περιλαμβάνονται στους κανονισμούς έχουν προκύψει από στατιστική ανάλυση δοκιμών κόπωσης σταθερού εύρους.

Στην περίπτωση φορτίσεων μεταβλητού εύρους, ο απευθείας υπολογισμός της αντοχής έναντι κόπωσης δεν είναι εφικτός και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται μέθοδοι που βασίζονται σε κανόνες υπολογισμού συσσώρευσης της βλάβης [118]. Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι η γραμμική συσσώρευση της βλάβης όπως προτάθηκε από τον Miner [114] και η οποία υπολογίζει μια ενεργή τιμή S_{eq} , η οποία χρησιμοποιείται αντί της S για τον υπολογισμό της αντοχής σε κόπωση.

8.4 Ορισμός απαιτήσεων παραμόρφωσης

Οι απαιτήσεις παραμόρφωσης σύμφωνα με τις καμπύλες $S-N$ καθορίζονται από την παράμετρο S , η οποία μπορεί να οριστεί με πολλούς διαφορετικούς τρόπους όπως έχει προταθεί από διάφορους ερευνητές. Οι Krawinkler και Zohrei [119] ήταν από τους πρώτους που πρότειναν τη σύνδεση της παραμέτρου S με την ολική ολκιμότητα μιας κατασκευής. Αυτό επιτεύχθηκε συνδέοντας την παράμετρο S με το πλαστικό σκέλος (δ_{pl}) της ολικής μετατόπισης μιας κατασκευής. Οι Ballio και Castiglioni [120] βασιζόμενοι σε παραμέτρους της ολικής μετατόπισης της κατασκευής, συνδέουν την παράμετρο S με μία ενεργή τάση. Η ενεργή αυτή τάση λαμβάνει υπόψη την παραμόρφωση της κατασκευής για την περίπτωση ενός ιδεατού αείρωσ ελαστικού υλικού. Από την άλλη ο Feldmann [121]-[122] απέδειξε ότι μπορούν να υιοθετηθούν καμπύλες αντοχής σχετιζόμενες με τις πλαστικές παραμορφώσεις και τις πλαστικές στροφές των κόμβων μιας κατασκευής, όταν ληφθεί υπόψη γραμμική σχέση μεταξύ των τιμών των πλαστικών παραμορφώσεων στο κρίσιμο σημείο σχηματισμού ρωγμής και των τιμών πλαστικής στροφής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.2.



Σχήμα 8.2: Καμπύλη αντοχής με βάση τις πλαστικές στροφές των κόμβων

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιείται η πρόταση του Bernuzzi [146] ο οποίος μετά από ανάλυση πειραματικών αποτελεσμάτων σε συνδέσεις δοκού-υποστυλώματος υπό ανακυκλιζόμενες φορτίσεις πρότεινε τη χρήση του ολικού εύρους μετατόπισης (ή του ολικού εύρους στροφής $\Delta\theta$ για κόμβους δοκού-υποστυλώματος που περιλαμβάνει τόσο το ελαστικό όσο και το πλαστικό τμήμα της στροφής) για τον ορισμό της παραμέτρου S , όπως φαίνεται στην εξίσωση (8.4).

$$S = \Delta\theta \quad (8.4)$$

όπου $\Delta\theta$ είναι η ολική στροφή του κόμβου.

Επομένως η εξίσωση (8.2) μετασχηματίζεται στην εξίσωση (8.5).

$$N(\Delta\theta)^m = K \quad (8.5)$$

Από τις χρονοϊστορίες που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πειραματική φόρτιση των συγκολλητών συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος, μόνο η τελευταία αποτελείται από σταθερούς κύκλους φόρτισης. Οι υπόλοιπες, όπως φαίνεται στους Πίνακες 5.6 και 5.7 αποτελούνται από κύκλους μεταβλητού εύρους οι οποίοι εφαρμόζονται μέχρι την τελική αστοχία της σύνδεσης. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η υιοθέτηση μιας μεθοδολογίας που θα επιτρέψει τον υπολογισμό της παραμέτρου S υπό φορτίσεις μεταβλητού εύρους οι οποίες προσομοιάζουν τις περιπτώσεις σεισμικών καταπονήσεων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται οι βασικές αρχές του κανόνα του Miner [114], ο οποίος προβλέπει γραμμική συσσώρευση βλάβης. Ο δείκτης βλάβης D στην περίπτωση αυτή περιγράφεται από την εξίσωση (8.6).

$$D = \sum_{i=1}^L \frac{n_i}{N_i} \quad (8.6)$$

όπου n_i είναι ο αριθμός των κύκλων υπό σταθερό εύρος S_i ,

N_i είναι ο ολικός αριθμός κύκλων φόρτισης στον οποίο θα είχαμε δημιουργία ρωγμής υπό σταθερό εύρος S_i ,

L είναι ο αριθμός των κύκλων σταθερού εύρους που έχουν εκτελεστεί

Ισχύει ότι:

$$\sum_{i=1}^L n_i = n_{tot} \quad (8.7)$$

όπου n_{tot} είναι ο συνολικός αριθμός κύκλων της χρονοϊστορίας.

Στη γενική περίπτωση μεταβλητών κύκλων φόρτισης όπου το εύρος της μετατόπισης είναι διαφορετικό σε κάθε κύκλο, η εξίσωση (8.6) μπορεί να γραφεί σύμφωνα με την εξίσωση (8.8).

$$D = \sum_{i=1}^{n_{tot}} \frac{I}{N_i} \quad (8.8)$$

όπου ο όρος (I/N_i) αντιπροσωπεύει τη βλάβη που προέρχεται από κύκλο με εύρος φόρτισης S_i .

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (8.2) και (8.6) υπολογίζεται ο δείκτης βλάβης D για την περίπτωση μεταβλητών ιστορικών φόρτισης. Η εξίσωση (8.9) προέρχεται από την εξίσωση (8.8) και αποτυπώνει τον υπολογισμό του δείκτη βλάβης στην περίπτωση χρονοϊστορίας μεταβλητού εύρους φορτίσεων.

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{n_{tot}} S_i^m}{K} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{tot}} S_i^m}{K} \quad (8.9)$$

Θεωρώντας ότι η τιμή του K είναι γνωστή για μια συγκεκριμένη τυπολογία σύνδεσης, μπορούμε να υπολογίσουμε από την εξίσωση (8.9) την τιμή της βλάβης για μια τιμή της παραμέτρου S . Στην περίπτωση φορτίσεων μεταβλητού εύρους, μπορεί να εξαχθεί μια ενεργός τιμή της παραμέτρου S μέσω της εξίσωσης (8.10). Η ενεργός αυτή τιμή περιγράφει την τιμή της παραμέτρου S στην οποία ο χάλυβας υπόκειται σε ρηγμάτωση μετά από $N=N_{tot}$ κύκλων σταθερού εύρους υπό την τιμή S_{eq} .

$$S_{eq} = \left(\frac{\sum_{i=1}^L n_i \cdot S_i^m}{n_{tot}} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (8.10)$$

Η εξίσωση (8.2) μπορεί να αποτυπωθεί σε λογαριθμικό διάγραμμα συνδυάζοντας τις εξισώσεις (8.9) και (8.10) σύμφωνα με την εξίσωση (8.11).

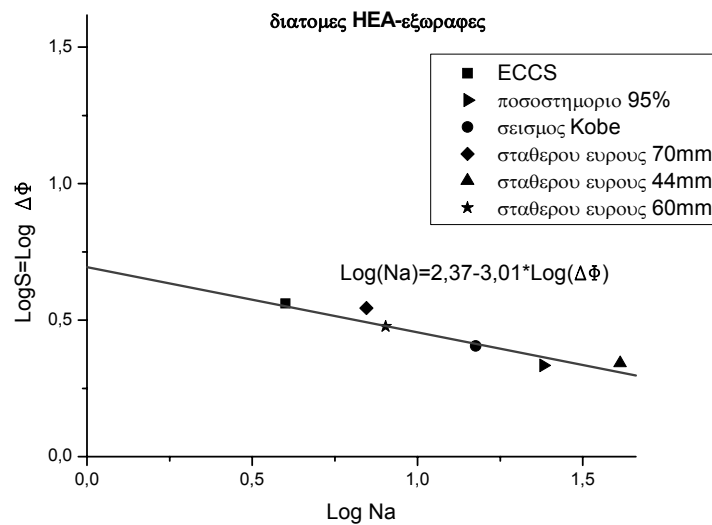
$$\text{Log}(n_{tot}) = \text{Log}(K) - m\text{Log}(S_{eq}) \quad (8.11)$$

Στο Σχήμα 8.3 φαίνονται οι καμπύλες $S-N$ για τις δοκούς διατομής HEA300 που έχουν συνδεθεί με τη βοήθεια εξωραφών με το υποστύλωμα, για όλες τις χρονοϊστορίες που εξετάστηκαν. Αντίστοιχα, στο Σχήμα 8.4 απεικονίζονται οι καμπύλες $S-N$ για την περίπτωση των συνδέσεων με εσωραφές και δοκούς διατομής HEA300. Οι εξισώσεις (8.12) και (8.13) είναι εκείνες που διέπουν τις καμπύλες $S-N$ για την περίπτωση των πειραματικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν για τις περιπτώσεις των εξωραφών και εσωραφών αντίστοιχα. Με βάση τις εξισώσεις αυτές μπορεί ο ερευνητής να καθορίσει τον κρίσιμο αριθμό των κύκλων φόρτισης που μπορεί να αντέξει μια σύνδεση με τη συγκεκριμένη γεωμετρία και ποιότητα χάλυβα, μέχρι να πραγματοποιηθεί ρηγμάτωση του υλικού, ανάλογα με τη χρονοϊστορία φόρτισης που θα εφαρμοστεί στη σύνδεση.

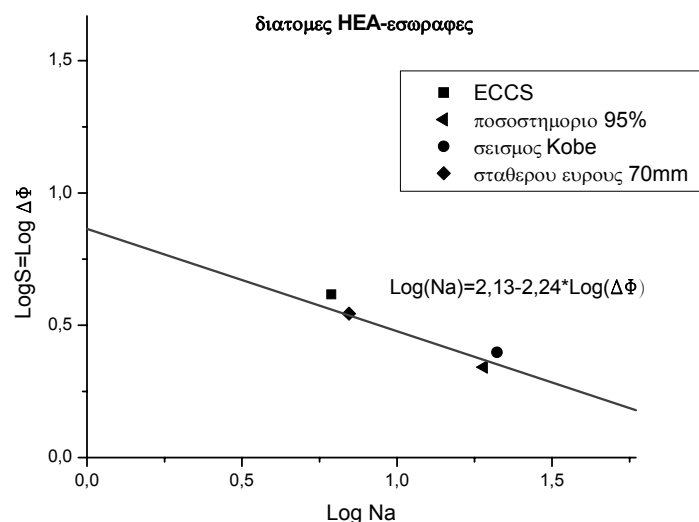
$$\text{Για εξωραφές: } \text{Log}(N_a) = 2,37 - 3,01\text{Log}(\Delta\varphi) \quad (8.12)$$

$$\text{Για εσωραφές: } \text{Log}(N_a) = 2,13 - 2,24\text{Log}(\Delta\varphi) \quad (8.13)$$

όπου N_a είναι ο αριθμός των κύκλων μέχρι να πραγματοποιηθεί ρηγμάτωση και $\Delta\varphi$ είναι το εύρος της στροφής του κόμβου [mrad/10] ή η σχετική στροφή του κόμβου εκφρασμένη σε ποσοστό %.

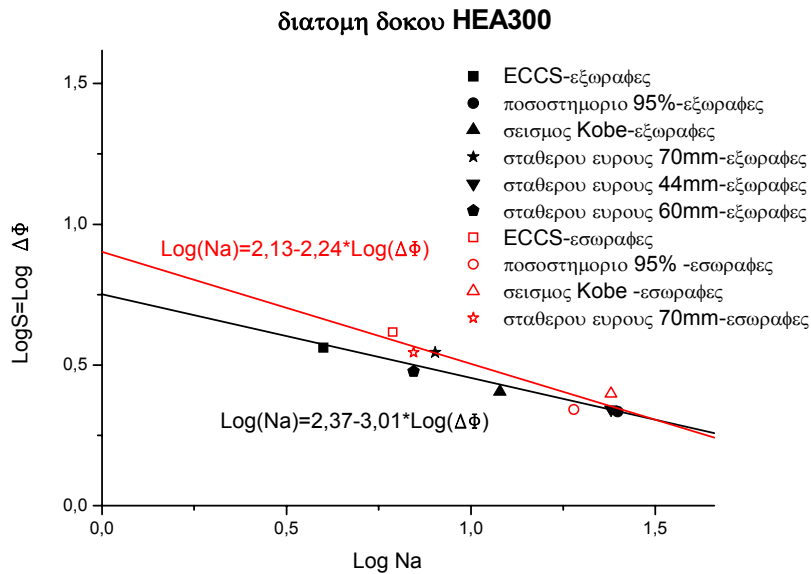


Σχήμα 8.3: Καμπύλη $S-N$ για δοκούς διατομής HEA300 συνδεόμενες με βοήθεια εξωραφών με υποστύλωμα διατομής HEM300



Σχήμα 8.4: Καμπύλη $S-N$ για για δοκούς διατομής HEA300 συνδεόμενες με βοήθεια εσωραφών με υποστύλωμα διατομής HEM300

Στο Σχήμα 8.5 φαίνεται η σύγκριση μεταξύ των δύο διαφορετικών τύπων συγκόλλησης που επιλέχθηκαν για τη σύνδεση δοκού-υποστυλώματος. Από τα αποτελέσματα φαίνεται η μικρή διαφοροποίηση μεταξύ των αποτελεσμάτων που προκύπτουν για συγκολλήσεις με τη βοήθεια εξωραφών και εσωραφών.



Σχήμα 8.5: Σύγκριση καμπύλων $S-N$ για δοκούς διατομής HEA300 με διαφορετικό τύπο συγκόλλησης

Στον Πίνακα 8.1 αποτυπώνεται ο δείκτης βλάβης για τον κόμβο που δέχεται τη μεγαλύτερη επιβάρυνση σε όρους στροφών υπό την επίδραση του σεισμού του Kobe για τη γεωμετρία του κτιρίου που επιλέχθηκε για την ανάλυση. Ο δείκτης βλάβης που προκύπτει βασίζεται στα αποτελέσματα της καμπύλης $S-N$ του Σχήματος 8.4 για διατομή δοκών HEA300 οι οποίες συγκολλούνται με τη βοήθεια εσωραφών με υποστύλωμα διατομής HEM300. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι κάθε φορά που ασκείται η χρονοϊστορία του σεισμού του Kobe στη γεωμετρία του κόμβου που εξετάζεται, παρατηρείται αύξηση της βλάβης στη σύνδεση κατά 22,7%.

Πίνακας 8.1: Συσσώρευση βλάβης για τον σεισμό του Kobe

Δοκοί HEA300 με εσωραφές			
Δφ [mrad*10] (εύρος στροφής)	N (Αριθμός κύκλων σεισμικού συνδυασμού)	n (Αριθμός κύκλων ως την απαρχή ρηγμάτωσης)	N/n (Συσσώρευση βλάβης)
3	1	8,6	0,116
2,2	2	21,8	0,092
1,1	3	176,0	0,017
0,5	4	1888,4	0,002
Δείκτης Βλάβης			0,227

Στον Πίνακα 8.2 φαίνεται ο αριθμός των κύκλων μέχρι την απαρχή ρηγμάτωσης στις συγκολλητές συνδέσεις δοκού-υποστύλωματος σε σύγκριση με τη σχετική μετακίνηση των ορόφων εκφραζόμενη σε ποσοστό (%). Ο πίνακας αφορά συνδέσεις με διατομή δοκών HEA300 οι οποίες συγκολλούνται μέσω εσωραφών με υποστύλωμα διατομής HEM300 και ποιότητα χάλυβα S355J2 με τα χαρακτηριστικά που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια.

Πίνακας 8.2: Παράδειγμα αντοχής συγκολλητής σύνδεσης δοκού-υποστυλώματος σε όρους ρηγμάτωσης ανάλογα με τη σχετική στροφή των ορόφων (%)

HEA300		Αριθμός κύκλων για απαρχή ρηγμάτωσης	
		Εξωραφές	Εσωραφές
Σχετική στροφή (%)	2.0	29	28
	2.2	22	23
	2.4	17	19
	2.6	13	15
	2.8	11	13
	3.0	9	11
	3.2	7	10
	3.4	6	8
	3.6	5	7
	3.8	4	6
	4.0	3	6

8.5 Συμπεράσματα επεξεργασίας των αποτελεσμάτων

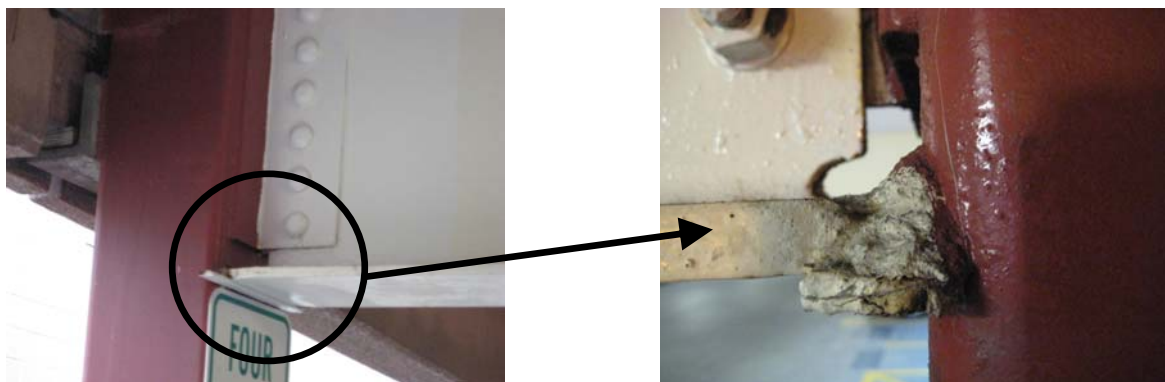
Από την ανάλυση που προηγήθηκε, γίνεται αντιληπτή η σημασία της μετατροπής των αποτελεσμάτων των αναλύσεων με τη βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων σε καμπύλες $S-N$ οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ευκολία από το μελετητή. Η διαδικασία ανάλυσης των συνδέσεων που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια είναι ιδιαίτερα κοπιαστική και απαιτεί σε πολλές περιπτώσεις εξειδικευμένο προσωπικό, γεγονός που αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα στη χρήση της μεθόδου εύρεσης της απαρχής ρηγμάτωσης στην καθημερινή πρακτική. Αντίθετα, η χρήση καμπυλών κόπωσης $S-N$ όπως αυτές των εξισώσεων (8.12) και (8.13) έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα κατά τον υπολογισμό της αστοχίας στην περίπτωση της απλής κόπωσης, καθώς αποτελούν μέρος του EN1993-1-9 [3]. Το γεγονός αυτό δείχνει την εξοικείωση που υπάρχει από τους μηχανικούς στη χρήση σχέσεων αυτής της μορφής, με αποτέλεσμα την ευκολία που θα είχε η υιοθέτηση ανάλογων σχέσεων για την περίπτωση της υπέρ-ολιγοκυκλικής κόπωσης, όπως αυτή μελετάται στην παρούσα εργασία.

Η εξαγωγή σχέσεων αυτής της μορφής απαιτεί αναλύσεις υπό διαφορετικού εύρους φορτίσεις σε πλήθος διαφορετικών γεωμετρικών διατάξεων και χαλύβων διαφορετικής ποιότητας προκειμένου να καταστεί δυνατή η καταγραφή της επίδρασης κάθε χαρακτηριστικού που έχουν στη θέση και κλίση της καμπύλης $S-N$. Από τις εξισώσεις (8.12) και (8.13) μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι οι καμπύλες που προκύπτουν έχουν κλίση περίπου ίση με την τιμή 3, όσο δηλαδή είναι και η τιμή που προτείνει ο EN1993-1-9 [3] για την περίπτωση της κόπωσης. Η ίδια τιμή για την κλίση της καμπύλης προκύπτει και από άλλους ερευνητές [124] για την περίπτωση που χρησιμοποιούνται ως παράμετρος S οι συνολικές μετατοπίσεις λαμβάνοντας υπόψη τόσο τον ελαστικό, όσο και τον πλαστικό κλάδο. Επομένως, για την περίπτωση παρόμοιας γεωμετρίας αναμένεται η κλίση της καμπύλης $S-N$ που θα υπολογιστεί να είναι παρόμοια με αυτή του Σχήματος 8.5.

9 Επιρροή της παρουσίας οπών συγκόλλησης σε συνδέσεις δοκού-υποστυλώματος

9.1 Γενικά

Σε πολλές περιπτώσεις συγκολλητών συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος, ιδιαίτερα σε εκείνες που πραγματοποιούνται στο εργοτάξιο, υπάρχουν οπές στον κορμό της δοκού προκειμένου να διευκολυνθεί η εκτέλεση της συγκόλλησης. Η τεχνική της ύπαρξης τέτοιου είδους οπών, όπως αυτές που φαίνονται στο Σχήμα 9.1 είναι διαδεδομένη στη βόρειο Αμερική, γεγονός που αποδείχθηκε πως επηρέασε την αστοχία πολλών συνδέσεων κατά το σεισμό του Northridge. Ερευνητές έχουν αποδείξει ότι υιοθετώντας μικρού μεγέθους οπές, έχουμε ως αποτέλεσμα μικρότερες ανηγμένες παραμορφώσεις στην περιοχή περιμετρικά των οπών. Ωστόσο, η μειωμένη διάμετρος της οπής προκαλεί δυσκολίες στη διαδικασία της συγκόλλησης με αποτέλεσμα να παρατηρούνται προβλήματα που προέρχονται από ανεπαρκή τήξη του μετάλλου στη ρίζα της συγκόλλησης στα πέλματα της δοκού, καθώς γίνεται δύσκολη η εισαγωγή του ηλεκτροδίου στα σημεία που παρεμβάλλεται ο κορμός της δοκού. Ιδιαίτερα στο κάτω πέλμα των δοκών, η θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη της συγκόλλησης είναι πλησίον της ρίζας της οπής συγκόλλησης, όπου μπορεί να παρατηρηθούν ψαθυρής μορφής αστοχίες.



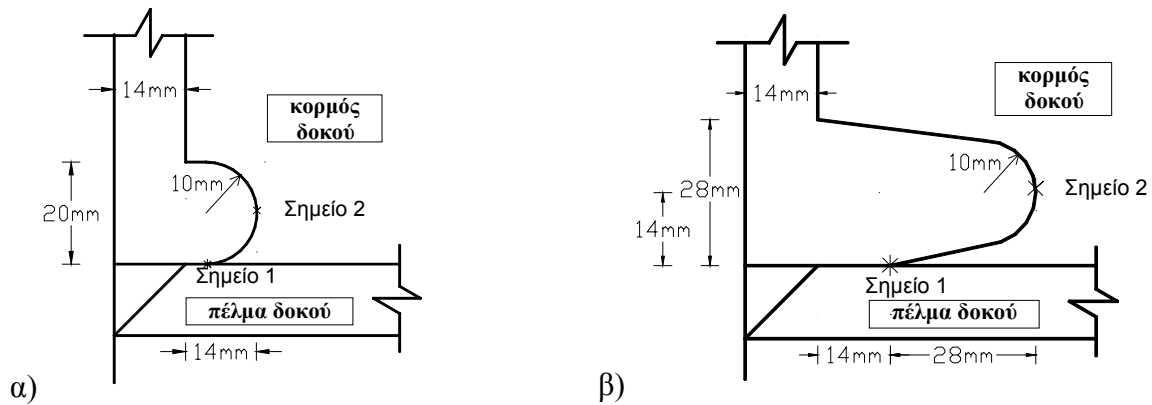
Σχήμα 9.1: Παραδείγματα οπών συγκόλλησης σε συνδέσεις δοκού-υποστυλώματος

Η επιρροή αυτών των λεπτομερειών της σύνδεσης κατά την αστοχία των συγκολλητών συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος εξετάστηκε στην παρούσα διατριβή με χρήση της τεχνικής που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια προκειμένου να γίνει μια προσπάθεια ποσοτικοποίησης της επίδρασης των οπών στη διαδικασία των ρηγματώσεων. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για κύκλους φόρτισης σταθερού εύρους μετατοπίσεων, όπως έχει ήδη πραγματοποιηθεί για τις συνδέσεις που μελετήθηκαν στο Πολυτεχνείο του Aachen, στις οποίες όμως απουσιάζουν τέτοιου είδους οπές. Η αναλυτική διαδικασία χρησιμοποιεί τα ίδια μοντέλα και τις ίδιες ιδιότητες υλικών που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των προηγούμενων αναλύσεων για τους κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων που μελετήθηκαν κατά το πρόγραμμα 'PLASTOTOUGH' [2].

9.2 Γεωμετρία οπών συγκόλλησης

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μελετήθηκαν δύο διαφορετικές γεωμετρικές διατάξεις οπών συγκόλλησης όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.2. Οι κύριες γεωμετρικές παράμετροι των οπών

συγκόλλησης είναι το ολικό τους μήκος, το μήκος του ευθύγραμμου μέρους, η κλίση και το ύψος τους. Η πρώτη διάταξη είναι αυτή που χρησιμοποιείται συχνότερα στην κατασκευή συγκολλητών πλαισίων ροπής στις ΗΠΑ και είναι παρόμοια με τη γεωμετρία των οπών που προτείνει η AISC [125] για ελατές διατομές, για το μικρότερο επιτρεπτό μέγεθος οπής. Η διάμετρος του κυκλικού μέρους της οπής είναι ίση με 20mm και το ολικό της μήκος 28mm. Η δεύτερη διάταξη είναι μεγαλύτερη σε μέγεθος και αποτελείται από κυκλικό μέρος διαμέτρου 20mm και ολικού μήκους 56mm. Οι πλαστικές παραμορφώσεις μετρώνται σε δύο σημεία όπως φαίνεται από το Σχήμα 9.2. Το πρώτο σημείο είναι στη ρίζα της οπής στο σημείο που ξεκινά το κυκλικό της μέρος πλησίον του συγκολλησίμου υλικού, ενώ το δεύτερο σημείο είναι στο μέσο του κυκλικού τμήματός της.

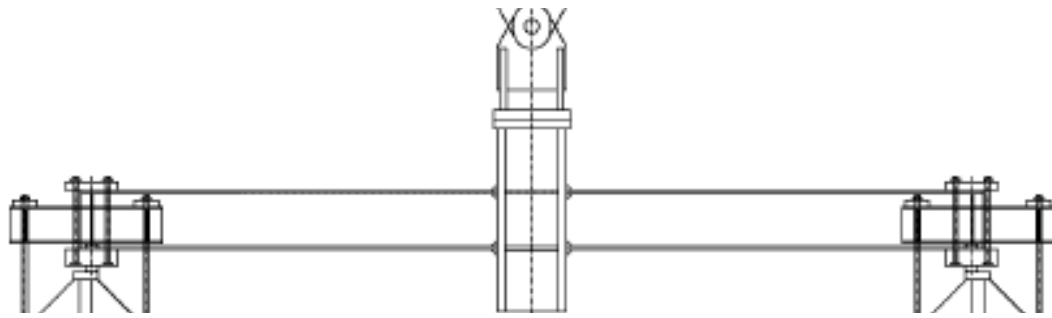


Σχήμα 9.2: Γεωμετρία συνήθων (αριστερά) και ευμεγεθών οπών συγκόλλησης (δεξιά)

Σκοπός του ελέγχου των δύο αυτών διαφορετικών διατάξεων είναι η προσπάθεια απομάκρυνσης των υψηλών τοπικών παραμορφώσεων από την περιοχή της συγκόλλησης που μπορεί να προκαλέσει η παρουσία των οπών στον κορμό της δοκού [126]. Η ευμεγέθης οπή συγκόλλησης έχει ως στόχο την αποφυγή αιχμηρών ακμών στη γεωμετρία της σύνδεσης και οι οποίες οδηγούν στην αύξηση των τοπικών παραμορφώσεων. Η κρισιμότητα του μεγέθους της οπής γίνεται αντιληπτή από το γεγονός ότι ενώ μικρότερο μέγεθος οπών οδηγεί σε μικρότερη συγκέντρωση παραμορφώσεων, εντούτοις καθίσταται δυσκολότερη η διαδικασία συγκόλλησης με αποτέλεσμα πολλές φορές να παρατηρείται ανεπαρκής τήξη του υλικού στη ρίζα της.

9.3 Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων

Η γεωμετρία της σύνδεσης που χρησιμοποιήθηκε για τις αναλύσεις είναι όμοια με αυτή των συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος χωρίς οπές συγκόλλησης που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Η σύνδεση φαίνεται στο Σχήμα 9.3 και αποτελείται από υποστύλωμα διατομής HEM300 το οποίο τοποθετείται στην κατακόρυφη διεύθυνση με λεπίδες ενίσχυσης στις δύο πλευρές του και από δύο δοκούς διατομής HEA300, οι οποίες τοποθετούνται οριζόντια και συγκολλούνται με το υποστύλωμα σύμφωνα με τις διατάξεις του Σχήματος 9.2. Τα γεωμετρικά στοιχεία είναι όμοια με αυτά που φαίνονται στο Σχήμα 5.1. Στις συγκολλήσεις που πραγματοποιούνται στη σύνδεση δοκού-υποστυλώματος θεωρούμε πως έχουν αφαιρεθεί τα βοηθητικά μεταλλικά υποθέματα (backing bars) που τοποθετούνται κάτω από τα πέλματα των δοκών για να μη χυθεί μέταλλο εκτός της συγκόλλησης. Όπως μπορεί να γίνει αντιληπτό από το Σχήμα 9.2 η συγκόλληση χαρακτηρίζεται ως εσωραφή, χωρίς να έχει χρησιμοποιηθεί εξωραφή για τη σφράγιση της ρίζας της συγκόλλησης, όπως στις συνδέσεις που μελετήθηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια.

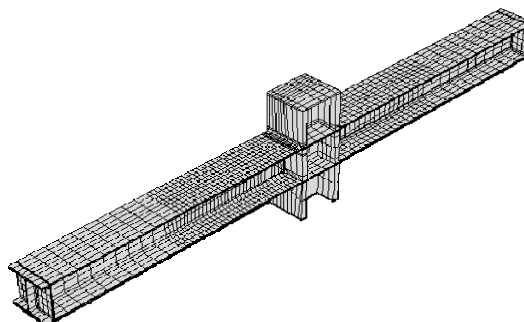


Σχήμα 9.3: Γεωμετρική διάταξη των συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος

Η ποιότητα του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις ήταν όμοια με το χάλυβα S355J2 που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων του χρησιμοποιούμενου χάλυβα φαίνεται στο Σχήμα 3.5 και προέρχεται από τις εφελκυστικές δοκιμές που έγιναν σε κατάλληλα διαμορφωμ δοκίμια σε θερμοκρασία δωματίου.

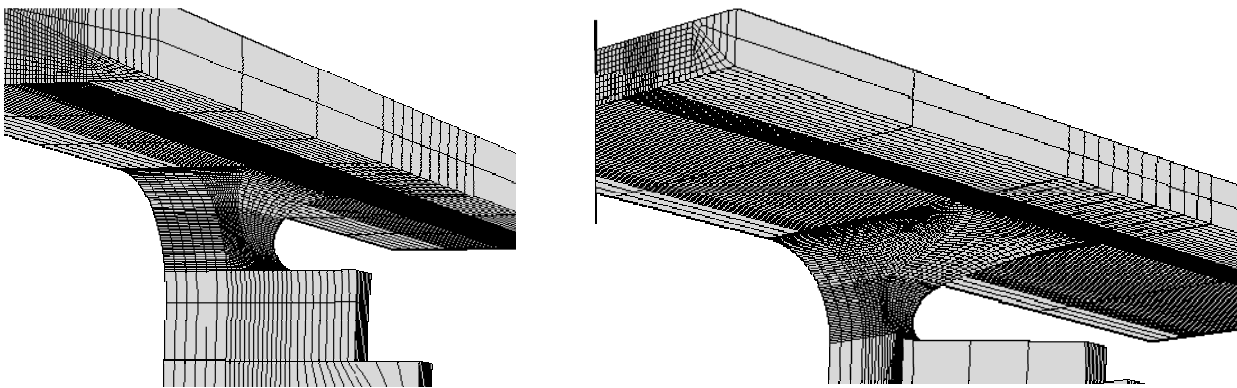
Για την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο διαρροής von Mises [90]. Το φαινόμενο Bauschinger [87] λαμβάνεται υπόψη μέσω ενός συνδυαστικού μη γραμμικού ιστροπικού και κινηματικού μοντέλου σκλήρυνσης όπως αυτό έχει ήδη περιγραφεί στο κεφάλαιο 6. Το φαινόμενο Bauschinger χαρακτηρίζεται από μειωμένη τάση διαρροής κατά την αντιστροφή της φοράς φόρτισης, αφού όμως κατά το προηγούμενο στάδιο φόρτισης έχει επέλθει πλαστικοποίηση του φορέα που μελετάται.

Οι αναλυτικές διερευνήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS 6.7. Στο Σχήμα 9.4 φαίνεται η διακριτοποίηση της συγκολλητής σύνδεσης δοκού-υποστυλώματος για την οποία χρησιμοποιήθηκαν εξαεδρικά στοιχεία οκτώ κόμβων όμοια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για τους κόμβους χωρίς οπές συγκόλλησης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.4 πλησίον της συγκόλλησης παρατηρείται πύκνωση των πεπερασμένων στοιχείων η οποία έχει ως σκοπό την όσο το δυνατόν πιο ακριβή απεικόνιση της συμπεριφοράς της κρίσιμης περιοχής όπου αναμένονται μεγάλες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων. Ταυτόχρονα, η μεγαλύτερη διακριτοποίηση εξασφαλίζει την καλύτερη προσομοίωση φαινομένων τοπικού λυγισμού που πιθανόν να προκύψουν. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε προσδίδοντας κατακόρυφες μετατοπίσεις στην άνω επιφάνεια της διατομής του υποστυλώματος, όπως και στις συνδέσεις χωρίς οπές. Για τον έλεγχο της συμπεριφοράς των οπών συγκόλλησης επιλέχθηκαν κύκλοι φόρτισης οι οποίοι δεν αναμένεται να προκαλέσουν τοπικό λυγισμό στις διατομές των δοκών. Για το λόγο αυτό, εφαρμόστηκαν δύο χρονοϊστορίες φόρτισης, με τιμές κατακόρυφης μετατόπισης 30mm και 50mm.



Σχήμα 9.4: Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για τη σύνδεση δοκού-υποστυλώματος παρουσία οπών συγκόλλησης

Όπως έχει ήδη περιγραφεί κατά την ανάλυση των μοντέλων στα οποία απουσιάζουν οι οπές συγκόλλησης, για την καλύτερη ανάλυση των κρίσιμων περιοχών χρησιμοποιήθηκε η τεχνική των υποφορέων. Η τεχνική των υποφορέων έχει ήδη περιγραφεί στο κεφάλαιο 6 και είναι μια δυνατότητα του προγράμματος των πεπερασμένων στοιχείων προκειμένου να διευκολύνεται η ανάλυση πολύπλοκων γεωμετριών με ανάγκη έντονης διακριτοποίησης, η οποία υπό συνήθεις συνθήκες θα χρειαζόταν πολύ μεγαλύτερο υπολογιστικό χρόνο. Υπενθυμίζεται ότι για τη χρησιμοποίηση της τεχνικής αυτής απαιτείται ένα ολικό μοντέλο, όπως αυτό του Σχήματος 9.4, από το οποίο θα προκύψουν οι συνοριακές συνθήκες της περιοχής που θα απομονωθεί για να γίνει εκτενέστερη ανάλυσή της με τη χρήση των υποφορέων. Τα τελικά αποτελέσματα προέρχονται από την επίλυση του υποφορέα με βάση τις συνοριακές συνθήκες που επιβάλλονται από τα αποτελέσματα του ολικού μοντέλου και όποιου επιπλέον φορτίου πιθανόν να ασκείται στην κρίσιμη περιοχή που εξετάζεται. Οι υποφορείς που χρησιμοποιήθηκαν κατά την ανάλυση φαίνονται στο Σχήμα 9.5 ανάλογα με την οπή συγκόλλησης που εξετάζεται κάθε φορά. Στα μοντέλα αυτά το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων στην κρίσιμη περιοχή περιμετρικά της οπής όπου αναμένονται και οι μεγαλύτερες ανηγμένες παραμορφώσεις έχουν μέγεθος ίσο με $0,2 \times 0,2 \times 0,2 \text{ mm}$ το οποίο προέκυψε με βάση το χαρακτηριστικό μήκος όπως αυτό περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3. Το χαρακτηριστικό μήκος εκφράζει το μήκος εκείνο στο οποίο πρέπει να ισχύει η κρίσιμη τιμή του συνδυασμού ισοδύναμων ενεργών παραμορφώσεων και τριαξονικότητας προκειμένου να υπάρξει απαρχή ρηγμάτωσης σύμφωνα με την αρχή της ενεργού βλάβης.

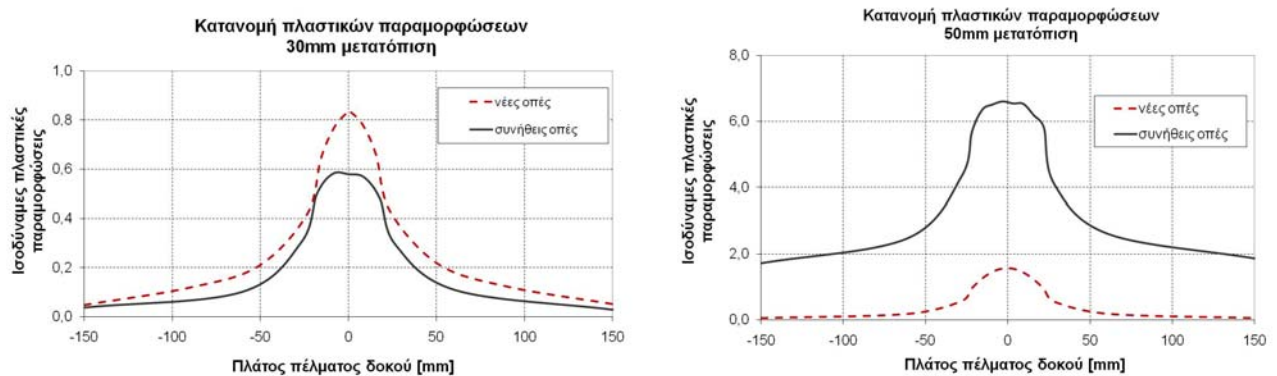


Σχήμα 9.5: Υποφορείς ανάλυσης για συνήθεις (αριστερά) και υπερμεγέθεις (δεξιά) οπές συγκόλλησης

9.4 Αποτελέσματα αναλύσεων

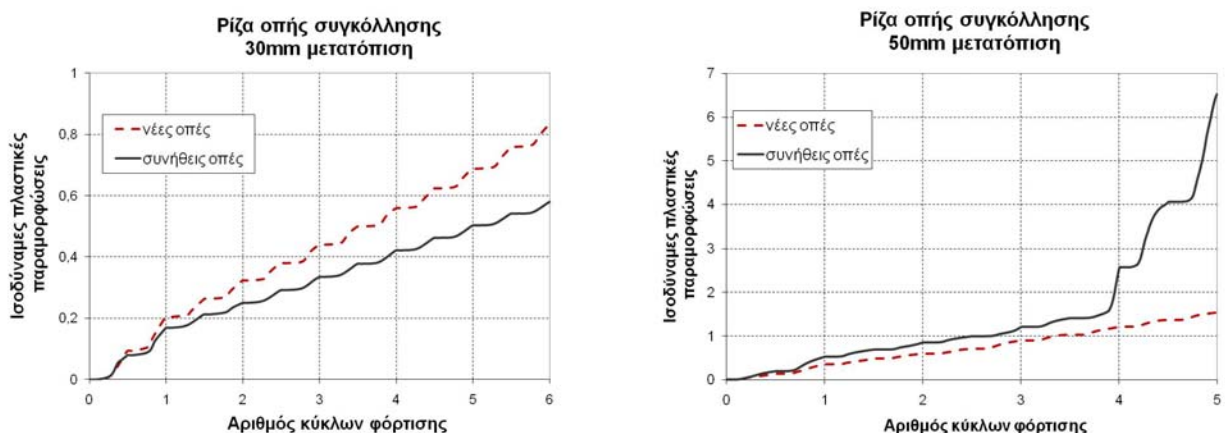
Οι ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις καταγράφονται για τις δύο διαφορετικές γεωμετρίες κατά πλάτος του πέλματος της δοκού. Η καταγραφή γίνεται στη ρίζα της οπής συγκόλλησης, δηλαδή στο σημείο που η καμπυλότητα της οπής συναντά το πέλμα της δοκού. Τα αποτελέσματα αυτών των καταγραφών για τις χρονοϊστορίες των 30mm και 50mm φαίνονται στο Σχήμα 9.6. Από το Σχήμα αυτό συμπεραίνουμε ότι στις συνήθεις οπές παρατηρούνται αυξημένες συγκεντρώσεις πλαστικών παραμορφώσεων στο μέσο του πλάτους του πέλματος, ιδιαίτερα στις μεγαλύτερες μετατοπίσεις των 50mm της σύνδεσης. Το σημείο των αυξημένων πλαστικών παραμορφώσεων συμπίπτει με το σημείο εμφάνισης ρωγμών στη σύνδεση είτε υπό μονοτονική είτε υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Σε αντίθεση με τις συνήθεις οπές, οι πλαστικές παραμορφώσεις των μεγαλύτερων οπών συγκόλλησης στο ίδιο σημείο είναι σημαντικά μικρότερες. Η διαφορά αυτή στην τιμή των πλαστικών παραμορφώσεων οφείλεται στην αμβλεία γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της οπής συγκόλλησης και του πέλματος της δοκού στην περίπτωση των υπερμεγεθών οπών. Επιπλέον η τιμή του συντελεστή τριαξονικότητας στο κρίσιμο σημείο είναι μεγαλύτερη για τις

συνήθεις οπές, γεγονός το οποίο καθιστά τη νέα γεωμετρία να χαρακτηρίζεται από μικρότερη πιθανότητα για απαρχή ρηγμάτωσης σε σχέση με τις συνήθεις οπές συγκόλλησης για την ίδια χρονοϊστορία φόρτισης.



Σχήμα 9.6: Κατανομή ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων στο πέλμα της δοκού για 30mm (αριστερά) και 50mm (δεξιά) κατακόρυφης μετατόπισης

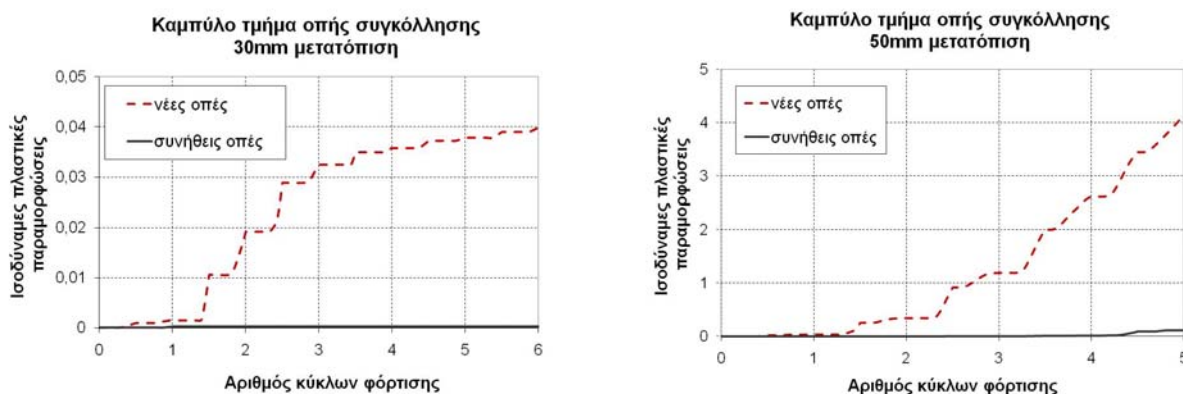
Στο Σχήμα 9.7 φαίνεται η προοδευτική αύξηση των τιμών των μέγιστων ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων στο μέσο του πέλματος της δοκού και συγκεκριμένα στη ρίζα της οπής συγκόλλησης. Από τα διαγράμματα φαίνεται ότι η διακύμανση των ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων για τη φόρτιση των 30mm κατακόρυφης μετατόπισης έχει παρόμοια μορφή και στις δύο γεωμετρίες οπών. Οι νέες δηλαδή οπές συγκόλλησης δεν φαίνεται να επιδρούν σε μεγάλο βαθμό στη διαμόρφωση των παραμορφώσεων στο πέλμα της δοκού. Ωστόσο, όταν η χρονοϊστορία των φορτίσεων γίνει μεγαλύτερη, η νέα γεωμετρία φαίνεται να έχει ευεργετική επίδραση στη μέγιστη τιμή των πλαστικών παραμορφώσεων. Ειδικά μετά τον τέταρτο κύκλο φόρτισης φαίνεται μια απότομη αύξηση στην τιμή των ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων για την περίπτωση των συνήθων οπών, ενώ αντίθετα ο ρυθμός αύξησής τους για τη νέα γεωμετρία παραμένει σταθερός.



Σχήμα 9.7: Μέγιστες ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις στη ρίζα της οπής συγκόλλησης για 30mm (αριστερά) και 50mm (δεξιά) μετατόπισης (σημείο 1, βλ. Σχήμα 10.2)

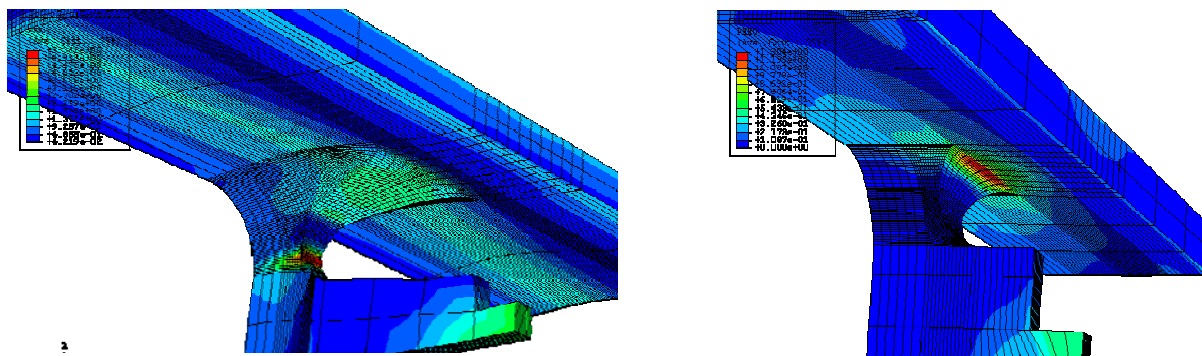
Στο Σχήμα 9.8 φαίνεται η διακύμανση των τιμών των μέγιστων ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων στο μέσο του καμπύλου τμήματος της οπής συγκόλλησης. Από τα διαγράμματα γίνεται αντιληπτό ότι για μικρές μετατοπίσεις (30mm κατακόρυφης μετατόπισης) οι πλαστικές παραμορφώσεις στο καμπύλο τμήμα έχουν πολύ μικρή τιμή ανεξαρτήτως της γεωμετρίας που

εξετάζεται. Αντίθετα, για μεγαλύτερες μετατοπίσεις (50mm κατακόρυφης μετατόπισης) η καμπυλότητα των νέων οπών απορροφά το μεγαλύτερο μέρος των παραμορφώσεων, με αποτέλεσμα να ανακουφίζεται η ρίζα της οπής συγκόλλησης, γεγονός το οποίο έγινε αντιληπτό στο Σχήμα 9.6. Το καμπύλο τμήμα των οπών συνήθους μεγέθους παραμένει με πολύ μικρές πλαστικές παραμορφώσεις είτε επιβάλλονται μικρές είτε μεγαλύτερες μετατοπίσεις στη σύνδεση δοκού-υποστυλώματος.



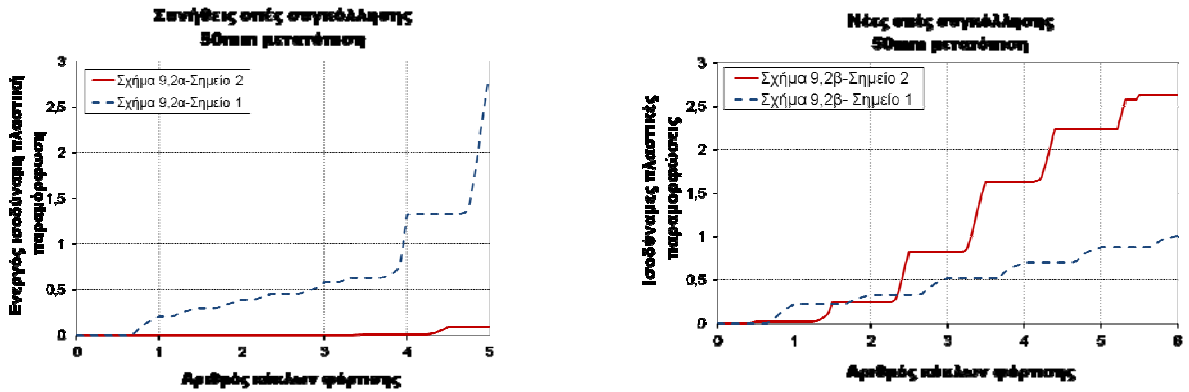
Σχήμα 9.8: Μέγιστες ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις στο καμπύλο τμήμα της οπής συγκόλλησης για 30mm (αριστερά) και 50mm (δεξιά) μετατόπισης (σημείο 2, βλ. Σχήμα 10.2)

Τα αποτελέσματα που έχουν ήδη αναφερθεί και καταδειχθεί μέσω διαγραμμάτων, φαίνονται γραφικά στο Σχήμα 9.9, το οποίο δείχνει τις ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις για τις δύο διαφορετικές γεωμετρίες οπών συγκόλλησης που μελετώνται. Στο σχήμα αυτό φαίνονται οι υποφορείς της ανάλυσης για τις συνήθεις και τις νέες οπές συγκόλλησης για 50mm κατακόρυφης μετατόπισης της διατομής του υποστυλώματος. Στην περίπτωση της γεωμετρίας με τις οπές μεγαλύτερου μεγέθους, οι μέγιστες τιμές παραμορφώσεων δημιουργούνται στο μέσο του καμπύλου τμήματος της οπής και όχι στο σημείο που η καμπύλη συναντά το πέλαμα της δοκού, όπως στην περίπτωση των οπών μικρότερου μεγέθους. Το φαινόμενο αυτό είναι ικανό να οδηγήσει σε επέκταση της ζωής της σύνδεσης σε περιπτώσεις έντονων καταπονήσεων.



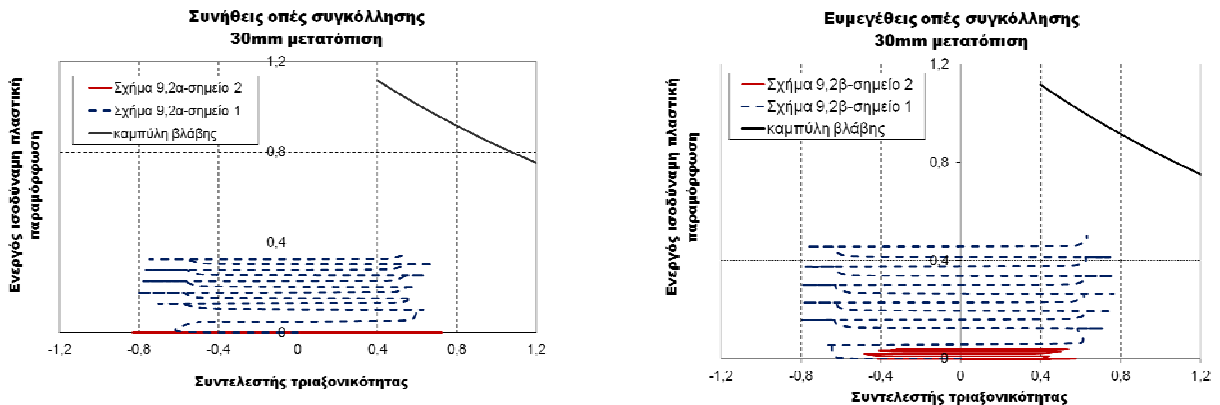
Σχήμα 9.9: Κατανομή ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων για 50mm μετατόπιση στα υπομοντέλα του μεγαλύτερου (αριστερά) και μικρότερου (δεξιά) μεγέθους οπών συγκόλλησης

Στο Σχήμα 9.10 φαίνεται η σύγκριση των ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων για τις ευμεγέθεις και τις συνήθεις οπές συγκόλλησης σε δύο διαφορετικά σημεία όπως αυτά έχουν καταγραφεί στο Σχήμα 9.2. Στο σχήμα αυτό συγκρίνονται οι μέγιστες τιμές πλαστικής παραμόρφωσης στη ρίζα και στο καμπύλο τμήμα της οπής συγκόλλησης. Περιγράφονται μόνο οι τιμές που προκύπτουν από την μετακίνηση των 50mm καθώς για την τιμή των 30mm κατακόρυφης μετατόπισης η διαφορά στην τιμή μεταξύ των δύο σημείων είναι πολύ μικρή.



Σχήμα 9.10: Σύγκριση ενεργών ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων στη ρίζα και στο καμπύλο τμήμα των συνήθων (αριστερά) και νέων (δεξιά) οπών συγκόλλησης

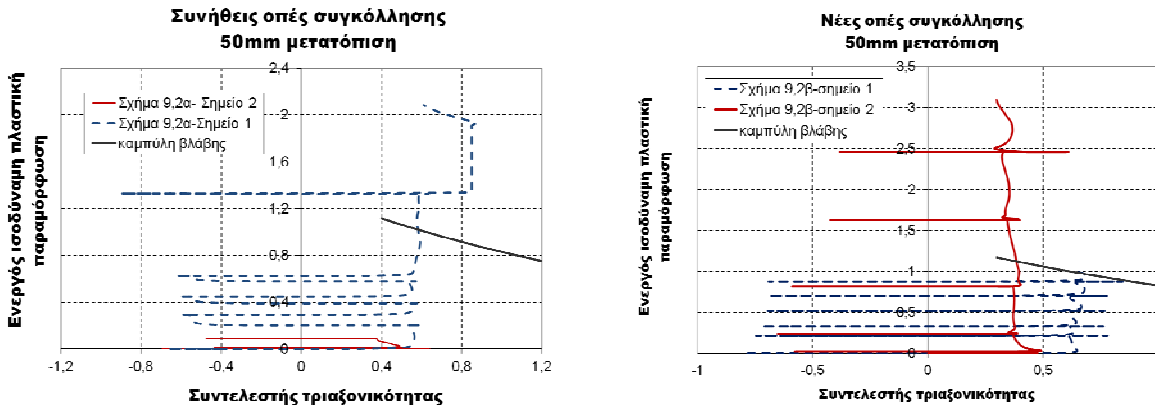
Η τεχνική της ενεργού βλάβης χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη της όλκιμης δημιουργίας ρωγμής στο κρίσιμο σημείο κάθε γεωμετρίας, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 7. Το σημείο όπου αναμένεται η αρχική δημιουργία ρηγματώσης εξαρτάται από τον τύπο της οπής συγκόλλησης που χρησιμοποιείται κάθε φορά. Ρηγματώση του υλικού για τις συνήθειες οπές συγκόλλησης αναμένεται στη ρίζα του καμπύλου τμήματος της οπής, το οποίο είναι κοντά στη συγκόλληση της δοκού με το υποστύλωμα, ενώ στην περίπτωση των οπών μεγαλύτερου μεγέθους η ρηγματώση αναμένεται να δημιουργηθεί στην κορυφή του καμπύλου τμήματος της οπής στον κορμό της διατομής της δοκού. Στο Σχήμα 9.11 φαίνεται η εφαρμογή της αρχής της ενεργού βλάβης για τις συνήθειες και τις ευμεγέθεις οπές συγκόλλησης για κατακόρυφη μετατόπιση του κόμβου κατά 30mm. Από τα διαγράμματα γίνεται αντιληπτό ότι σε περιπτώσεις μικρών μετατοπίσεων το κρίσιμο σημείο όπου αναμένεται η αρχική ρηγματώση της σύνδεσης είναι στη ρίζα της οπής συγκόλλησης, ενώ δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές στην τιμή των ενεργών ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων ανάμεσα στις δύο γεωμετρίες οπών συγκόλλησης.



Σχήμα 9.11: Αρχή της ενεργού βλάβης για 30mm μετατόπιση για συνήθειες (αριστερά) και ευμεγέθεις (δεξιά) οπές συγκόλλησης

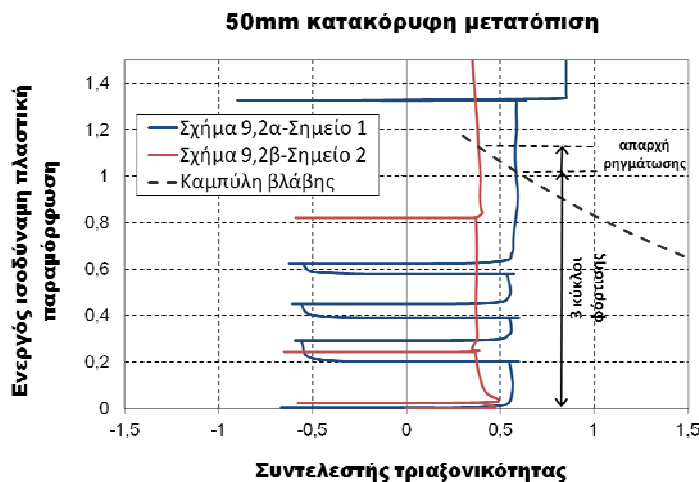
Στο Σχήμα 9.12 εφαρμόζεται η αρχή της ενεργού βλάβης για μετατόπιση 50mm. Όπως φαίνεται και από τα γραφήματα, η γεωμετρία στην οποία υπάρχουν οι συνήθειες οπές συγκόλλησης αναμένεται να παρουσιάσει απαρχή ρηγματώσης στην ρίζα της οπής μετά την πάροδο τεσσάρων κύκλων φόρτισης. Στη δοκό όπου υπάρχουν οι ευμεγέθεις οπές συγκόλλησης, αναμένεται ρηγματώση μετά την πάροδο επίσης τεσσάρων κύκλων φόρτισης στο καμπύλο τμήμα της οπής στον κορμό της διατομής της δοκού και όχι στη ρίζα της οπής που βρίσκεται στο πέλαμα. Με τον τρόπο αυτό η ρηγματώση κατευθύνεται μακριά από το σημείο που έχει πραγματοποιηθεί η

συγκόλληση δοκού-υποστυλώματος, αστοχία της οποίας επιφέρει απότομη απώλεια της φέρουσας ικανότητας της σύνδεσης. Αντίθετα, η φέρουσα ικανότητά της διατηρείται σχεδόν σταθερή μέχρις ότου πραγματοποιηθεί επέκταση της ρωγμής κατά μήκος του κορμού της δοκού, η οποία λαμβάνει χώρα με την πάροδο επιπλέον κύκλων φόρτισης.



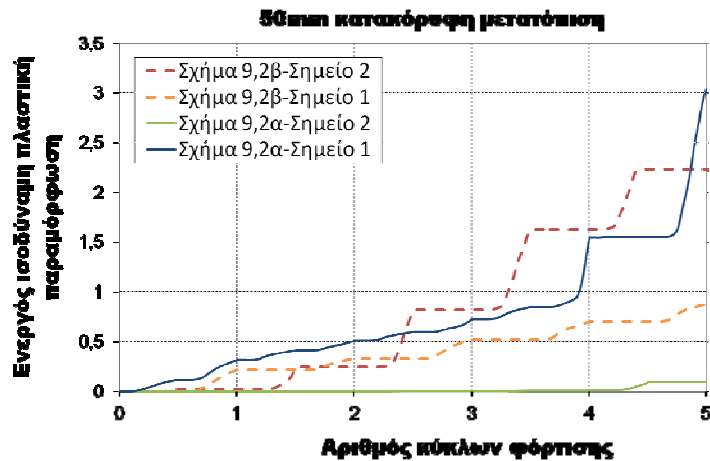
Σχήμα 9.12: Αρχή της ενεργού βλάβης για 50mm μετατόπιση για συνήθεις (αριστερά) και νέες (δεξιά) οπές συγκόλλησης

Στο Σχήμα 9.13 φαίνεται η σύγκριση των τιμών των ενεργών ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων για τις κρίσιμες περιοχές των δύο γεωμετριών στις οποίες αναμένεται να εμφανιστεί πρώτα η ρηγματώση. Από το διάγραμμα εξάγεται το συμπέρασμα ότι ρηγματώση θα επέλθει στον ίδιο κύκλο φόρτισης, στη ρίζα της οπής συγκόλλησης στην περίπτωση των μικρότερου μεγέθους οπών και στο μέσο της καμπύλης της οπής για τις μεγαλύτερου μεγέθους οπές.



Σχήμα 9.13: Σύγκριση σημείου απαρχής ρηγματώσης για τις διαφορετικές οπές συγκόλλησης

Στο Σχήμα 9.14 φαίνεται η διακύμανση των ενεργών ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων για τις δύο διαφορετικές γεωμετρίες οπών συγκόλλησης στα σημεία της ρίζας της οπής και στο καμπύλο τμήμα αυτής. Από το διάγραμμα προκύπτει το συμπέρασμα ότι στις μικρότερου μεγέθους οπές συγκόλλησης η ενεργός ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση αυξάνεται απότομα μετά την πλήρη διαρροή της σύνδεσης με αποτέλεσμα να προκύπτει απότομα η αστοχία. Αντίθετα, στην περίπτωση των οπών μεγαλύτερου μεγέθους η αύξηση των ενεργών πλαστικών παραμορφώσεων στο καμπύλο τμήμα της οπής ακολουθεί σταθερό ρυθμό αύξησης.



Σχήμα 9.14: Διακύμανση ενεργών ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων για τις γεωμετρίες της μελέτης

9.5 Συμπεράσματα αποτελεσμάτων

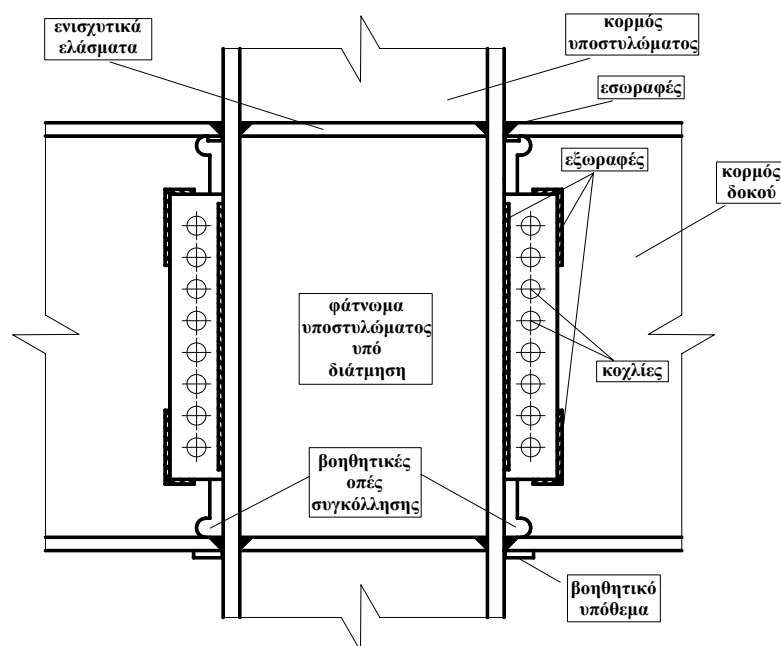
Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας ελέγχθηκαν ορισμένες μορφές κατασκευαστικών λεπτομερειών, όπως η παρουσία οπών συγκόλλησης στη διατομή της δοκού, γεγονός το οποίο είναι σύνηθες στην περίπτωση συγκολλήσεων που πραγματοποιούνται στο εργοτάξιο καθώς με τον τρόπο αυτό διευκολύνεται η διαδικασία συγκόλλησης μεταξύ δοκού-υποστυλώματος. Εξετάστηκαν δύο διαφορετικές γεωμετρίες οπών συγκόλλησης, με την πρώτη να αποτελεί το τυπικό σχήμα οπής που χρησιμοποιείται σε αυτού του είδους τις συνδέσεις, ενώ η δεύτερη γεωμετρία αποτελεί μία νέα πρόταση η οποία χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερο μέγεθος και εντονότερο καμπύλο τμήμα. Εξετάστηκαν δύο χρονοϊστορίες με εναλλασσόμενους κύκλους φόρτισης σταθερού εύρους. Το μέγεθος της μετατόπισης για το οποίο εξετάστηκαν οι συνδέσεις δεν προκαλεί φαινόμενα τοπικού λυγισμού στη δοκό για τον αριθμό των κύκλων φόρτισης που εξετάστηκαν και εντός του οποίου αναμένεται να έχει λάβει χώρα ρηγμάτωση της σύνδεσης.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν οι μεγαλύτερου μεγέθους οπές κατευθύνουν τη συγκέντρωση των μεγάλων πλαστικών παραμορφώσεων στο καμπύλο τμήμα της οπής συγκόλλησης, σε απόσταση δηλαδή από το πέλμα της δοκού και την εσωραφή δοκού-υποστυλώματος. Το σύνηθες, μικρότερο μέγεθος των οπών συγκόλλησης χαρακτηρίζεται από μεγάλη συγκέντρωση πλαστικών παραμορφώσεων στη ρίζα της οπής, στο πέλμα της δοκού, σε κοντινή απόσταση από την εσωραφή με τη διατομή του υποστυλώματος, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε απότομη απώλεια της φέρουσας ικανότητας της σύνδεσης. Σύμφωνα με την αρχή της ενεργού βλάβης για μικρό εύρος μετατοπίσεων η συμπεριφορά και των δύο γεωμετριών είναι παραπλήσια. Για μεγαλύτερο μέγεθος μετατοπίσεων, η απαρχή της ρηγμάτωσης θα επέλθει μετά την πάροδο του ίδιου αριθμού κύκλων φόρτισης, με τη διαφορά ότι στις συνήθεις οπές συγκόλλησης αυτή θα επέλθει στη ρίζα της οπής ενώ στη νέα γεωμετρία στο καμπύλο τμήμα αυτής. Οι νέες οπές ουσιαστικά καθιστούν κρίσιμο σημείο, το οποίο θα αποτελέσει την αφετηρία αστοχίας της σύνδεσης, το καμπύλο τμήμα της οπής στον κορμό της δοκού, γεγονός το οποίο είναι ευεργετικό για τη σύνδεση καθώς δεν επιβαρύνεται η συγκόλληση. Η έναρξη της ρηγμάτωσης στη ρίζα της συγκόλλησης είναι πιο επικίνδυνη σε σχέση με την παρουσία ρωγμών στο καμπύλο τμήμα των οπών συγκόλλησης, γιατί μπορεί η συγκόλληση να μην έχει εκτελεστεί σωστά, όπως θα παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 10. Οι αρχικές κατασκευαστικές ατέλειες πιθανόν να επιτείνουν τη συγκέντρωση των τάσεων και να οδηγούν σε πρόωρη ρηγμάτωση.

10 Επιρροή της παρουσίας βοηθητικών υποθεμάτων σε συνδέσεις δοκού-υποστυλώματος

10.1 Γενικά

Κατά τη διάρκεια του σεισμού του Northridge το 1994 στην Καλιφόρνια και του σεισμού του Kobe το 1995 στην Ιαπωνία παρατηρήθηκαν εκτεταμένες βλάβες σε συγκολλητές συνδέσεις δοκών-υποστυλωμάτων πλαισίων ροπής. Η τυπική γεωμετρία αυτών των κόμβων φαίνεται στο Σχήμα 10.1 και αποτελείται από συγκολλητές συνδέσεις των πελμάτων των δοκών με το πέλιμα του υποστυλώματος και κοχλιωτή σύνδεση ανάμεσα στον κορμό των δοκών και το υποστύλωμα. Συγκεκριμένα, η συγκόλληση των πελμάτων των δοκών στο υποστύλωμα των πλαισίων ροπής πραγματοποιείται στο εργοτάξιο και αφού είχε τοποθετηθεί η κοχλίωση η οποία λαμβάνει χώρα μέσω συγκολλητής πλάκας στο πέλιμα του υποστυλώματος η οποία τοποθετείται στο εργοστάσιο. Για την πραγματοποίηση της συγκόλλησης των πελμάτων υπήρχαν βοηθητικές οπές στον κορμό των δοκών ώστε να μπορεί ο συγκολλητής να πραγματοποιήσει έγχυση του υλικού. Πριν τη συγκόλληση τοποθετούνταν βοηθητικά υποθέματα στην κάτω επιφάνεια των πελμάτων των δοκών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 10.1 ώστε να συγκρατείται το υγρής μορφής υλικό του τόξου συγκόλλησης στη θέση του. Τα υποθέματα αυτά στις περισσότερες περιπτώσεις δεν αφαιρούνταν μετά το πέρας της εργασίας και παρέμεναν ως μέρος της συγκολλητής σύνδεσης. Σε πολλές περιπτώσεις υπήρχε επιπρόσθετα συγκόλληση μεταξύ του κορμού της δοκού και της πλάκας στην οποία εφαρμόζεται η κοχλίωση. Σύμφωνα με τους αμερικάνικους κανονισμούς [127] αυτό ήταν απαραίτητο στις περιπτώσεις που το μέτρο πλαστικοποίησης του κορμού της δοκού ήταν μεγαλύτερο από το 30% του ολικού μέτρου πλαστικοποίησης της δοκού. Με τον τρόπο αυτό μεταφέρεται μεγαλύτερο ποσοστό ροπής μέσω της σύνδεσης του κορμού της δοκού με το υποστύλωμα ώστε να ανακουφιστούν οι συγκολλήσεις των πελμάτων της δοκού.



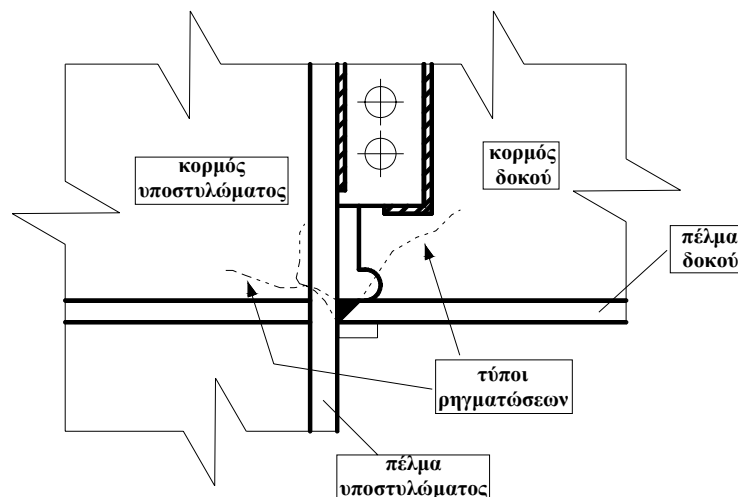
Σχήμα 10.1: Τυπική μορφή συγκολλητής σύνδεσης πλαισίου ροπής πριν το σεισμό του Northridge

Το γεγονός ότι η συγκόλληση των πελμάτων της δοκού στο υποστύλωμα πραγματοποιείται στο εργοτάξιο είναι αντίθετη με την Ευρωπαϊκή πρακτική όπου οι συγκολλήσεις της σύνδεσης πραγματοποιούνται στο εργοστάσιο διασφαλίζοντας με τον τρόπο αυτό καλύτερο έλεγχο καθώς γίνονται σε περιβάλλον προστατευμένο από τις περιβαλλοντικές συνθήκες από πιστοποιημένους συγκολλητές. Μετά τους σεισμούς του Northridge και του Kobe και εξαιτίας των ψαθυρής φύσεως αστοχιών που παρατηρήθηκαν διεξήχθησαν εκτεταμένες έρευνες [128], [129], [20] προκειμένου να καθοριστούν τα αίτια και να βρεθούν λύσεις για την αποφυγή παρόμοιων φαινομένων στο μέλλον. Στα πλαίσια του παρόντος Κεφαλαίου θα γίνει αναφορά στα αίτια τα οποία οδήγησαν στην αστοχία αυτών των συνδέσεων με ιδιαίτερη έμφαση στην παρουσία των βοηθητικών υποθεμάτων και των προβλημάτων που ανέκυψαν από αυτά. Με χρήση πεπερασμένων στοιχείων και της αρχής της ενεργού βλάβης που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 7 θα ποσοτικοποιηθεί η επιβλαβής δράση της παραμονής αυτών των υποθεμάτων μετά το τέλος της συγκόλλησης, όπως ήταν και η συνθήκη κατασκευαστική πρακτική.

10.2 Μορφή αστοχιών

Η μορφή των αστοχιών που παρατηρήθηκε στις συνδέσεις δοκού-υποστυλώματος μετά τα δύο αυτά σεισμικά γεγονότα ήταν ψαθυρής φύσεως χωρίς να υπάρχουν εμφανή σημάδια διαρροής πριν τη θραύση της σύνδεσης. Τα αποτελέσματα αυτά κατέδειξαν την απουσία επαρκούς πλαστιμότητας της σύνδεσης σε αντίθεση με τις επιταγές του αρχικού της σχεδιασμού. Το μεγάλο εύρος των αστοχιών οδήγησε τους ερευνητές στο συμπέρασμα ότι το πρόβλημα ήταν στον αρχικό σχεδιασμό που διέπει αυτού του τύπου τις συνδέσεις και ο οποίος δεν παρείχε επαρκή πλαστιμότητα και όχι σε μεμονωμένες σχεδιαστικές παρατυπίες της κάθε σύνδεσης.

Η μορφή των αστοχιών που παρατηρήθηκαν φαίνεται στο Σχήμα 10.2, στο οποίο απεικονίζονται οι διαφορετικού τύπου ρωγμές που δημιουργήθηκαν κατά τη σεισμική διέγερση. Το μεγαλύτερο ποσοστό των αστοχιών έλαβε χώρα στο κάτω πέλμα της δοκού, στη διεπιφάνεια μεταξύ συγκόλλησης και πέλματος του υποστυλώματος [130]. Το άνω πέλμα συνήθως δεν έφερε αστοχίες και αυτό εν πολλοίς οφείλεται στην παρουσία της πλάκας από σκυρόδεμα που έφεραν τα κτίρια. Η ρηγμάτωση στο σύνολο σχεδόν των περιπτώσεων είχε ως αρχικό σημείο το μέσο της συγκόλλησης στο πέλμα της δοκού. Στη συνέχεια παρατηρήθηκαν τρεις πιθανές μορφές αστοχίας. Στην πρώτη η ρωγμή επεκτεινόταν κάθετα ως προς το πέλμα της δοκού με αποτέλεσμα την ολική αστοχία της σύνδεσης του πέλματος της δοκού με το πέλμα του υποστυλώματος, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις επεκτεινόταν στον κορμό της δοκού. Στις υπόλοιπες δύο μορφές αστοχίας η ρηγμάτωση διαδιδόταν στο πέλμα του υποστυλώματος και επεκτεινόταν στον κορμό του υποστυλώματος ο οποίος βρίσκεται υπό διάτμηση.



Σχήμα 10.2: Μορφές αστοχιών σε συγκολλητές συνδέσεις δοκού-υποστυλώματος [131]

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι οι μορφές των ρηγματώσεων διέφεραν όχι μόνο ανάμεσα σε διαφορετικά κτίρια, αλλά ακόμα και στο φορέα του ίδιου κτιρίου. Το κοινό τους γνώρισμα ωστόσο ήταν το σημείο απαρχής της ρωγμής το οποίο βρίσκεται στη ρίζα της συγκόλλησης στην κάτω επιφάνεια του κάτω πέλματος της δοκού, στο σημείο της διεπιφάνειας με το πέλμα του υποστυλώματος. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 10.3 η ρηγματώση μπορεί να επεκταθεί στον κορμό του υποστυλώματος, με αποτέλεσμα την απώλεια της φέρουσας ικανότητας του υποστυλώματος το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε κατάρρευση. Παρόλα αυτά δεν παρατηρήθηκαν καταρρεύσεις καθώς το υποστυλώμα βρίσκεται υπό θλίψη, ενώ η παρουσία της πλάκας του σκυροδέματος προσφέρει πλευρική ευστάθεια. Οι αστοχίες σε πολλές περιπτώσεις δεν έγιναν άμεσα αντιληπτές καθώς δεν υπήρχαν εμφανείς βλάβες στα μη φέροντα στοιχεία των κατασκευών, τα οποία δεν επέτρεπαν τον άμεσο οπτικό έλεγχο των συνδέσεων.



Σχήμα 10.3: Ρηγματώση που πλήττει τον κορμό του υποστυλώματος κατά το σεισμό του Northridge [132]

Η διασπορά των βλαβών ήταν μεγάλη, τόσο σε ότι αφορά διαφορετικά ύψη κτιρίων, όσο και σε ότι αφορά την απόσταση από το επίκεντρο της σεισμικής δράσης [132]. Το μεγαλύτερο ποσοστό των αστοχιών παρατηρήθηκε σε κτίρια ύψους μέχρι 6 ορόφων και σε κτίρια τα οποία κυμαίνονταν από 15 έως 22 ορόφους. Δεν υπήρχε συγκεκριμένο ποσοστό κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων με βλάβες ανά τύπο κτιρίου, καθώς υπήρχαν κατασκευές με μικρό αριθμό συνδέσεων στις οποίες είχε πραγματοποιηθεί ρηγματώση, ενώ σε άλλα κτίρια το σύνολο σχεδόν των συνδέσεων εμφάνισε ρωγμές. Οι αστοχίες παρατηρήθηκαν εξίσου σε συνδέσεις διαφορετικής γεωμετρίας, είτε σε ότι αφορά τη διατομή του υποστυλώματος (διπλό ταυ ή κοιλοδοκός), είτε σε ότι αφορά την ύπαρξη ενισχύσεων στο φάτνωμα του υποστυλώματος που βρίσκεται υπό διάτμηση. Η χρήση διαφορετικών

υλικών για την πραγματοποίηση της συγκόλλησης δεν φαίνεται να έχει σημαντική επίδραση στην προστασία των συνδέσεων από ψαθυρή μορφής ρηγματώσεις.

Το αποτέλεσμα αυτών των παρατηρήσεων ήταν η αναζήτηση μιας διαφορετικής σχεδιαστικής φιλοσοφίας για την αποφυγή παρόμοιων μελλοντικών φαινομένων. Με βάση τα αποτελέσματα πειραματικών και αναλυτικών μελετών προτάθηκαν λύσεις οι οποίες εφαρμόζονται πλέον στη διεθνή πρακτική, όπως είναι οι δοκοί απομειωμένης διατομής (dog-bone) και οι τοπικές ενισχύσεις στις συνδέσεις δοκών-υποστυλωμάτων μέσω κατάλληλων διατάξεων στις οποίες θα γίνει αναφορά στη συνέχεια.

Στις καταγραφές των βλαβών εξαιτίας της σεισμικής διέγερσης προστέθηκαν τα αποτελέσματα από πλήθος πειραματικών αποτελεσμάτων [133]-[135] τα οποία πραγματοποιήθηκαν μετά τα σεισμικά γεγονότα με σκοπό να καταδείξουν τα αίτια αστοχίας και τα τρωτά σημεία της σύνδεσης. Οι πειραματικές διατάξεις έδειξαν όμοιες μορφές αστοχίας με αυτές που παρατηρήθηκαν κατά το σεισμό. Σε όλα τα πειράματα διαπιστώθηκε μειωμένη ικανότητα της δοκού ως προς την παραλαβή πλαστικών παραμορφώσεων, παρουσιάζοντας μεγάλη διασπορά αποτελεσμάτων, έτσι ώστε η πλαστική στροφή του κόμβου να είναι 1-5% rad, λαμβάνοντας υπόψη και τη συνεισφορά του υποστυλώματος, ενώ η πλαστική στροφή της δοκού ήταν στις περισσότερες περιπτώσεις μικρότερη από 1% rad και σε ορισμένες μικρότερη και από 0,5% rad. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων έγινε αντιληπτό το γεγονός ότι οι μεγαλύτερες διατομές υποστυλωμάτων είχαν δυσμενή επίδραση στη συμπεριφορά της σύνδεσης. Η χρήση μεγαλύτερων διατομών στα υποστυλώματα και τις δοκούς ήταν διαδεδομένη στις σύγχρονες κατασκευές, όχι μόνο λόγω του μεγαλύτερου μεγέθους τους, αλλά και εξαιτίας του μικρότερου αριθμού πλαισίων ροπής που είναι απαραίτητα για την παραλαβή των σεισμικών δυνάμεων για λόγους οικονομίας.

10.3 Αίτια βλαβών

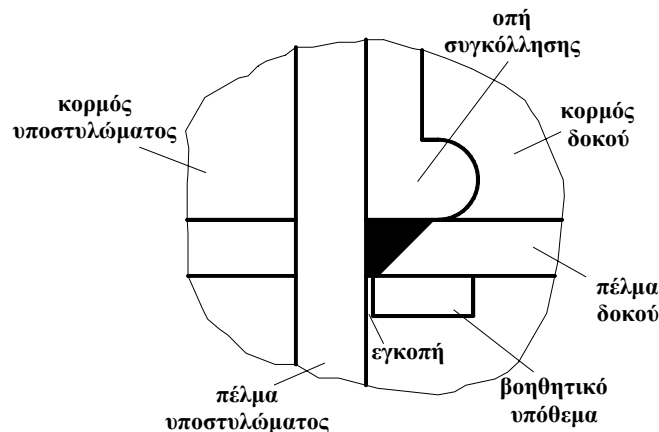
Τα αίτια που οδήγησαν στη ψαθυρή θραύση των συνδέσεων αναζητήθηκαν τόσο στις συνθήκες υλοποίησης της σύνδεσης στο εργοτάξιο, όσο και στη σχεδιαστική λογική που διέπει τη γεωμετρία της. Οι λόγοι που οδήγησαν στην καθολική αυτή αντιμετώπιση του προβλήματος είναι το αποτέλεσμα επιτόπιων ελέγχων και αναλύσεων που ανέδειξαν προβλήματα τόσο στον τρόπο εφαρμογής της συγκόλλησης, όσο και στην αναπάντεχη συμπεριφορά κύριων συστατικών της σύνδεσης που θα αναλυθούν στη συνέχεια.

Οι συγκολλήσεις μεταξύ των πελμάτων των δοκών και των πελμάτων των υποστυλωμάτων πριν τα σεισμικά γεγονότα λάμβαναν χώρα σχεδόν αποκλειστικά στο εργοτάξιο. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την αυξημένη δυσκολία πραγματοποίησης της συγκόλλησης, ιδιαίτερα στο κάτω πέλμα των δοκών όπου παρατηρήθηκαν και τα μεγαλύτερα προβλήματα. Συγκεκριμένα, η δυσκολία πρόσβασης των ηλεκτροσυγκολλητών είχε ως αποτέλεσμα σε πολλές περιπτώσεις το υλικό να μην έχει εισχωρήσει επαρκώς σε ολόκληρο το πλάτος του πέλματος της δοκού ή να παρατηρείται ανεπαρκής τήξη του υλικού. Η δυσκολία αυτή επιτείνεται από την ύπαρξη του κορμού της δοκού, ο οποίος παρά την ύπαρξη οπών συγκόλλησης, εμποδίζει την εύκολη μετακίνηση του ηλεκτροδίου κατά πλάτος της δοκού σε σχέση με την αντίστοιχη συγκόλληση του άνω πέλματος. Η δυσκολία πρόσβασης καθιστούσε επίπονο και πολλές φορές ελλιπή τον οπτικό ή τεχνικό έλεγχο (μέσω υπερήχων) της συγκόλλησης. Ακόμα και συνδέσεις όμως οι οποίες είχαν συγκολληθεί σε ιδανικές εργαστηριακές συνθήκες και υπό ενδελεχή έλεγχο, παρουσίασαν ψαθυρές μορφές αστοχίας [135], γεγονός που καταδεικνύει τελικά ότι η ελλιπής συγκόλληση λόγω της γεωμετρίας του κάτω πέλματος της δοκού επέτεινε το πρόβλημα της ψαθυρής θραύσης χωρίς ωστόσο να είναι αποκλειστικά υπεύθυνη για την αστοχία.

Αμέσως μετά την εξακρίβωση των βλαβών στις συνδέσεις δοκών-υποστυλώματος πλαισίων ροπής λόγω του σεισμού του Northridge και εξαιτίας της έλλειψης εμφανούς διαρροής στη διατομή της δοκού, η αιτία της αστοχίας αναζητήθηκε στα χαρακτηριστικά του υλικού της συγκόλλησης. Η ψαθυρή μορφή αυτής οδήγησε τους ερευνητές στον έλεγχο της δυσθραυστότητας του συγκολλησίμου υλικού, γεγονός που κατέδειξε τη μειωμένη τιμή του μετά από τη λήψη δειγμάτων από χαρακτηριστικές περιπτώσεις αστοχίας κόμβων [136]. Συγκεκριμένα τα αποτελέσματα των δοκιμών Charpy σε θερμοκρασίες δωματίου κατέγραψαν πολύ χαμηλές τιμές δυσθραυστότητας που κυμαίνονταν μεταξύ 9J και 20J. Το εύρος των τιμών αυξανόταν σε 46-83J για θερμοκρασία 100°C. Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε επίσης κατά την απευθείας εξέταση του ηλεκτροδίου E70T-4 που είχε χρησιμοποιηθεί σε πολλές παρόμοιες συγκολλήσεις που είχαν πραγματοποιηθεί σε κτίρια στην ευρύτερη περιοχή του Los Angeles [137].

Αναλύσεις των συγκολλήσεων υπό φορτίσεις που προσομοιάζουν τα σεισμικά φορτία, ανέδειξαν την παρουσία υψηλών τάσεων. Αυτό αποδόθηκε στην αδυναμία συμμετοχής των κοχλιώσεων του κορμού στη μεταβίβαση της δημιουργηθείσας ροπής στο υποστυλώμα [19] και στην παρουσία των οπών συγκόλλησης οι οποίες είχαν ως αποτέλεσμα την αύξηση των τάσεων στην περιοχή πλησίον της συγκόλλησης, όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 9. Η μη συμμετοχή των κοχλιών του κορμού οφείλεται στη μεγάλη διαφορά δυσκαμψίας ανάμεσα στις συγκολλήσεις και τις κοχλιώσεις. Επομένως, ενώ αρχικά στην ελαστική περιοχή η δύναμη αναλαμβάνεται εξ' ολοκλήρου από τη συγκόλληση, μετά τη διαρροή αυτής δεν υπάρχει η δυνατότητα ανακατανομής της έντασης προς την κοχλιώση εξαιτίας της μικρής ολκιμότητας των συγκολλήσεων. Για το λόγο αυτό στον EN1993 [34] απαγορεύεται ο συνδυασμός κοχλιώσεων άντυγας κατηγορίας A και συγκολλήσεων στην ίδια σύνδεση, με εξαίρεση τις κοχλιώσεις κατηγορίας C εξαιτίας της παρόμοιας δυσκαμψίας που διαθέτουν με τις συγκολλήσεις. Η ανάλυση των συγκολλήσεων των πελμάτων των δοκών έδειξε ότι αναλαμβάνουν ποσοστό της τέμνουσας δύναμης που δρα στη σύνδεση, γεγονός αντίθετο με τη θεώρηση κατά το σχεδιασμό σύμφωνα με την οποία η τέμνουσα δύναμη αναλαμβάνεται αποκλειστικά από τις συγκολλήσεις του κορμού.

Ένα από τα σημαντικότερα αίτια απαρχής ρηγμάτωσης στους συγκολλητούς κόμβους δοκού-υποστυλώματος αποτελεί η παρουσία βοηθητικών μεταλλικών υποθεμάτων στην κατώτερη επιφάνεια του κάτω πέλματος της δοκού. Τα βοηθητικά αυτά υποθέματα φαίνονται στο Σχήμα 10.4 και τοποθετούνται προκειμένου να διατηρηθεί το ρευστό συγκολλησίμο υλικό κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης στη θέση της σύνδεσης μέχρι να ψυχθεί. Ο αμερικάνικος κανονισμός συγκολλήσεων [131] επέτρεπε τα υποθέματα αυτά να παραμένουν στη θέση τους και να μην αφαιρούνται εφόσον οι κατασκευές στις οποίες χρησιμοποιούνται υφίστανται κυρίως στατικές φορτίσεις στην οριακή κατάσταση αστοχίας τους, θεωρώντας ως δυναμικές κυρίως φαινόμενα κόπωσης και όχι τις σεισμικές δράσεις. Για το λόγο αυτό στο σύνολο σχεδόν των κτιρίων που υπέστησαν αστοχίες τα υποθέματα δεν είχαν αφαιρεθεί με αποτέλεσμα να δημιουργείται κενό ανάμεσα στο υπόθεμα και στο πέλμα του υποστυλώματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 10.4. Η εγκοπή αυτή δρα ως προϋπάρχουσα ρωγμή η οποία μπορεί να επιφέρει ψαθυρή θραύση καθώς το ρευστό υλικό της συγκόλλησης μπορεί να εισχωρήσει σε αυτή με τυχαίο τρόπο, αφήνοντας όμως το μεγαλύτερο μέρος της εγκοπής κενό.



Σχήμα 10.4: Βοηθητικό υπόθεμα στο κάτω πέλμα δοκού συγκολλητής σύνδεσης

Στα πλαίσια του παρόντος κεφαλαίου θα αναλυθεί η επίπτωση της παρουσίας του βοηθητικού υποθέματος στη σύνδεση καθώς και της εγκοπής ανάμεσα στο πέλμα της δοκού και στο πέλμα του υποστυλώματος. Ιδιαίτερη σημασία θα δοθεί στους λόγους, από πλευράς μηχανικής της βλάβης, που η παρούσα γεωμετρική διάταξη έχει δυσμενή επίπτωση στη συμπεριφορά της σύνδεσης υπό ανακυκλιζόμενες φορτίσεις.

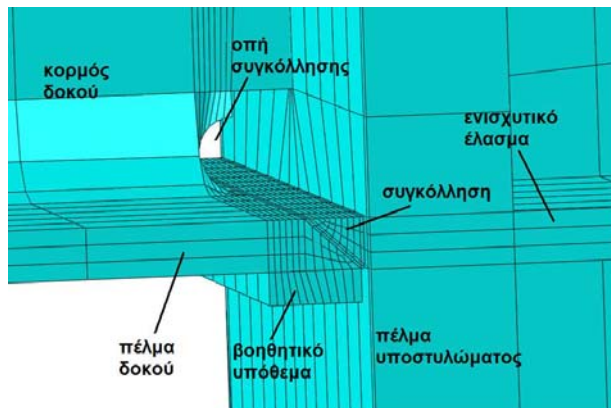
10.4 Γεωμετρία μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας για τον έλεγχο της επιρροής των βοηθητικών υποθεμάτων συγκόλλησης, χρησιμοποιήθηκε η πειραματική διάταξη που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 9.2. Αυτή αποτελείται από δύο δοκούς διατομής HEA300, οι οποίες τοποθετούνται σε οριζόντια θέση, και από μία διατομή HEM300 η οποία τοποθετείται στην κατακόρυφη διεύθυνση και δρα ως υποστύλωμα. Οι μετατοπίσεις επιβάλλονται στην άνω επιφάνεια του υποστυλώματος, στο οποίο έχουν δεσμευτεί κατάλληλα οι εκτός επιπέδου μετατοπίσεις. Οι δοκοί είναι συγκολλημένες στο υποστύλωμα μέσω εσωραφών, ενώ για τη διεξαγωγή των συγκολλήσεων έχει θεωρηθεί ότι χρησιμοποιήθηκαν βοηθητικά υποθέματα τόσο στο άνω όσο και στο κάτω πέλμα της διατομής. Τα υποθέματα αυτά θεωρείται ότι δεν έχουν αφαιρεθεί μετά το πέρας των συγκολλήσεων, όπως ήταν και η συνήθης πρακτική κατά τη διαμόρφωση πλαισίων ροπής στις ΗΠΑ πριν το σεισμό του Northridge.

Το μέγεθος των υποθεμάτων είναι 9x25mm όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.12 με πλάτος ίσο με το πλάτος του πέλματος της δοκού. Κατά τη συγκόλληση σχηματίζεται μια εγκοπή ανάμεσα στο υπόθεμα και στο πέλμα του υποστυλώματος. Η εγκοπή αυτή σχεδιάζεται μεγέθους 2mm και είναι κενή, θεωρώντας ότι δεν έχει εισέλθει καθόλου υλικό συγκόλλησης σε αυτή. Στην πράξη μέσα σε αυτή την εγκοπή εισέρχεται υλικό συγκόλλησης με τυχαίο τρόπο, το οποίο στην παρούσα ανάλυση αγνοείται έτσι ώστε τα μεταλλικά υποθέματα να είναι συγκολλημένα μόνο με την κατώτερη επιφάνεια του κάτω και του άνω πέλματος της δοκού στην οποία τοποθετούνται. Η περίπτωση να υπάρχει υλικό συγκόλλησης στην εγκοπή έτσι ώστε αυτή να συνδέεται σε κάποια σημεία με το πέλμα του υποστυλώματος είναι δυσμενέστερη καθώς ο τυχαίος τρόπος της σύνδεσης οδηγεί σε αύξηση των τοπικών παραμορφώσεων λόγω ανομοιογένειας της γεωμετρίας.

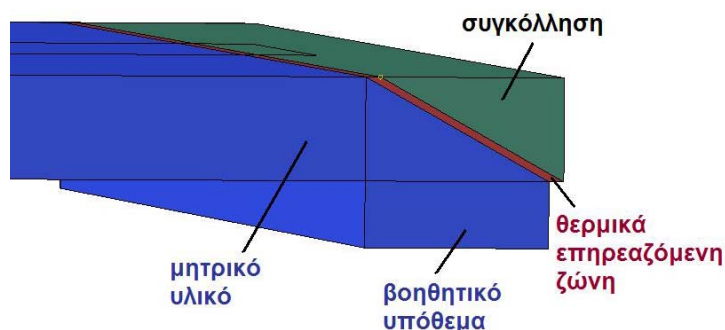
Στο Σχήμα 10.5 φαίνεται το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για την περίπτωση της παρουσίας βοηθητικών υποθεμάτων στη σύνδεση. Στο σχήμα αυτό διακρίνεται η λεπτομέρεια του κάτω πέλματος της δοκού στο οποίο υπάρχει το βοηθητικό υπόθεμα καθώς και η εγκοπή που σχηματίζεται μεταξύ αυτού και του πέλματος του υποστυλώματος και αποτελεί τμήμα του ολικού μοντέλου της σύνδεσης. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη χρήση εξαεδρικών πεπερασμένων

στοιχείων οκτώ κόμβων του προγράμματος ABAQUS v.6.5. Για τη λεπτομερέστερη ανάλυση των στοιχείων που βρίσκονται σε μικρή απόσταση από τον κόμβο δοκού-υποστυλώματος, υπάρχει πύκνωση του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων στην κρίσιμη περιοχή που αναμένεται ρηγματώση, ενώ χρησιμοποιήθηκε η τεχνική των υποφορέων όπως αυτή έχει περιγραφεί σε προηγούμενα κεφάλαια.



Σχήμα 10.5: Λεπτομέρεια μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

Στο Σχήμα 10.6 διακρίνεται η περιοχή της συγκόλλησης στη σύνδεση του Σχήματος 10.5. Σε αυτό το σχήμα διακρίνονται οι περιοχές του μοντέλου στις οποίες έχει διαφοροποιηθεί η ποιότητα του υλικού κατά την ανάλυση. Το μητρικό υλικό αποτελείται από χάλυβα ποιότητας S355J2, ενώ διακρίνονται επίσης το υλικό της συγκόλλησης καθώς και η θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη πάχους λίγων χιλιοστών. Το πλάτος της θερμικά επηρεαζόμενης ζώνης εξαρτάται από την τεχνική της συγκόλλησης, την τεχνολογική διαδικασία, τη χημική σύσταση του μητρικού υλικού και τις θερμοκρασιακές συνθήκες. Οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών είναι ίδιες με αυτές που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 3.

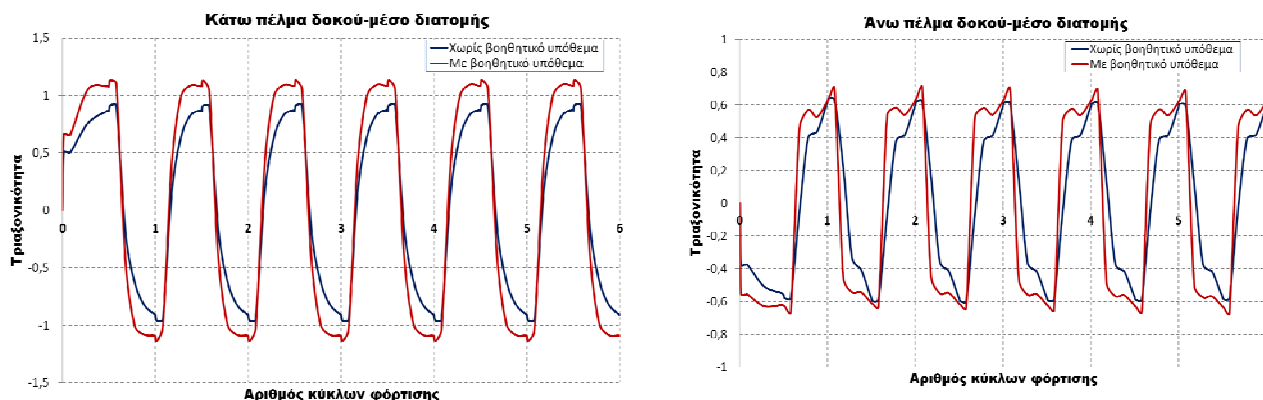


Σχήμα 10.6: Διαφοροποίηση ποιότητας υλικών κατά την ανάλυση

10.5 Αποτελέσματα αναλύσεων

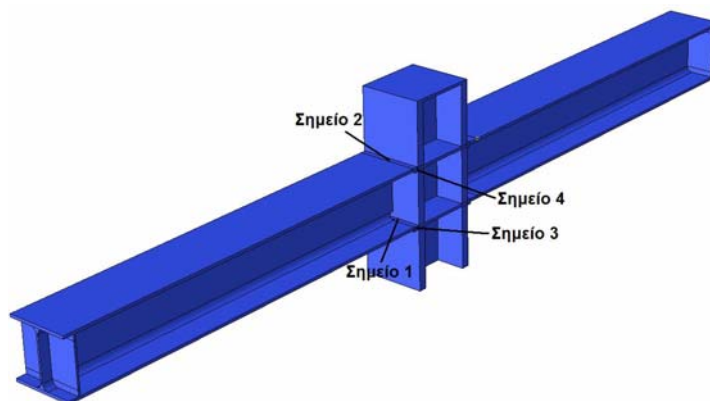
Η χρονοϊστορία που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη της επίδρασης των βοηθητικών υποθεμάτων συγκόλλησης στις συνδέσεις αποτελείται από ανακυκλιζόμενες φορτίσεις σταθερού εύρους. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν κύκλοι μετατόπισης 50mm οι οποίοι εφαρμόζονται στην κορυφή της διατομής του υποστυλώματος. Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα διαφέρουν σημαντικά στην περίπτωση που πραγματοποιείται τοπικός λυγισμός των πελμάτων της δοκού. Αυτό θα γίνει αντιληπτό στη συνέχεια κατά τη σύγκριση των αποτελεσμάτων συνδέσεων με και χωρίς την παρουσία τοπικού λυγισμού στη διατομή της δοκού.

Από την ανάλυση των δοκιμών προκύπτει ότι η προσθήκη βοηθητικών υποθεμάτων κάτω από το πέλμα της δοκού αυξάνει την τιμή του συντελεστή τριαξονικότητας στη ρίζα της συγκόλλησης, τόσο στο άνω όσο και στο κάτω πέλμα της δοκού. Στο Σχήμα 10.7 φαίνονται οι τιμές του συντελεστή τριαξονικότητας για τις περιπτώσεις δοκών στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν βοηθητικά υποθέματα συγκολλήσεων και δοκών στις οποίες αυτά έχουν αφαιρεθεί. Το Σχήμα 10.7 δείχνει την τιμή του συντελεστή τριαξονικότητας στο μέσο του πλάτους της κάτω επιφάνειας των πελμάτων της κάθε δοκού για κατακόρυφη μετατόπιση 50mm και από αυτό συμπεραίνουμε ότι η προσθήκη των υποθεμάτων προκαλεί αύξηση των τιμών του συντελεστή τριαξονικότητας σε ποσοστό 25-30%. Σύμφωνα με όσα αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 7 η αύξηση του συντελεστή τριαξονικότητας συνεπάγεται μείωση της οριακής τιμής της ενεργού ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης με αποτέλεσμα να επέρχεται συντομότερα η δημιουργία ρηγματώσεων στη σύνδεση.



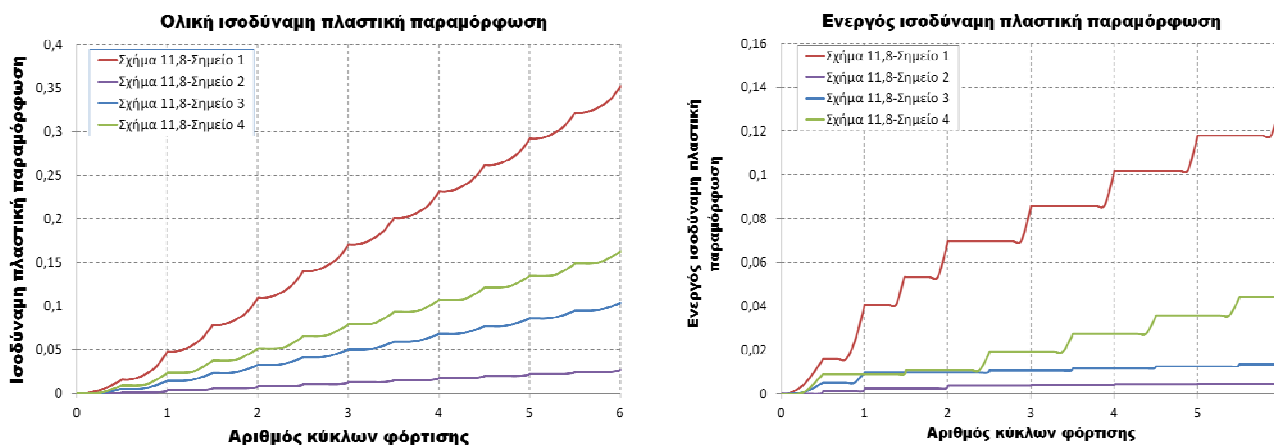
Σχήμα 10.7: Τιμές τριαξονικότητας πριν και μετά την τοποθέτηση βοηθητικού υποθέματος

Για τον προσδιορισμό του κρίσιμου σημείου στο οποίο θα πραγματοποιηθεί ρηγματώση του υλικού, καταγράφονται οι ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις και οι τιμές της τριαξονικότητας σε διάφορα σημεία της σύνδεσης. Από την ανάλυση του ολικού μοντέλου της σύνδεσης και ανάλογα με τις τιμές των πλαστικών παραμορφώσεων και της τριαξονικότητας που θα προκύψουν, καθορίζεται η κρίσιμη διατομή που θα απομονωθεί κατά την ανάλυση με τη χρήση υποφορέων, στην οποία θα υπάρχει εντονότερη διακριτοποίηση σύμφωνα με τις αρχές της μηχανικής της ενεργού βλάβης. Στο Σχήμα 10.8 φαίνονται τα σημεία για τα οποία θα καταγραφούν τα διαγράμματα ισοδύναμων ενεργών πλαστικών παραμορφώσεων και συντελεστή τριαξονικότητας. Το Σημείο 1 βρίσκεται στο μέσο της συγκόλλησης στο κάτω πέλμα της διατομής της δοκού ενώ το Σημείο 2 βρίσκεται ομοίως στο μέσο της συγκόλλησης, αλλά στο άνω πέλμα της διατομής της δοκού. Το Σημείο 3 βρίσκεται στην περίμετρο της συγκόλλησης στο κάτω πέλμα της δοκού, ενώ το Σημείο 4 βρίσκεται επίσης στην εξωτερική πλευρά της συγκόλλησης αλλά στο άνω πέλμα της δοκού. Όλα τα σημεία είναι στη ρίζα της συγκόλλησης καθώς στο σημείο αυτό εμφανίζονται μεγαλύτερες πλαστικές παραμορφώσεις, καθώς και μεγαλύτερες τιμές τριαξονικότητας, εξαιτίας της παρουσίας του βοηθητικού υποθέματος συγκόλλησης.



Σχήμα 10.8: Γεωμετρία σημείων καταγραφής της σχέσης ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης-τριαξονικότητας

Στο Σχήμα 10.9 φαίνονται οι τιμές των ολικών και των ενεργών ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων για τα σημεία του Σχήματος 10.8. Οι τιμές αυτές προκύπτουν από την ανάλυση του ολικού μοντέλου της σύνδεσης και όχι του υποφορέα και χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του κρίσιμου σημείου στο οποίο αναμένεται ρηγμάτωση. Η περαιτέρω ανάλυση με τη χρήση του υποφορέα θα προσδιορίσει τη στιγμή που θα πραγματοποιηθεί η ρηγμάτωση. Στην παρούσα σύνδεση για τους 6 κύκλους φόρτισης που ασκήθηκαν πραγματοποιήθηκε πολύ μικρός τοπικός λυγισμός των άνω πελμάτων των δοκών. Η διατομή του υποστυλώματος διατηρεί την κατακόρυφη θέση της σε όλη τη διάρκεια της φόρτισης χωρίς να υποστεί απόκλιση από την κατακόρυφη διεύθυνση.

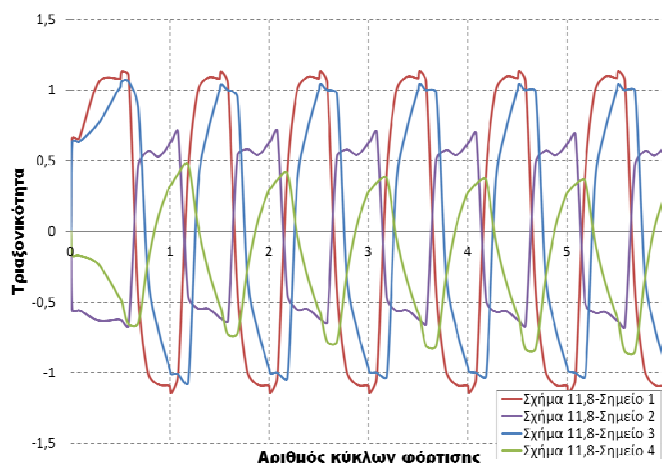


Σχήμα 10.9: Διακύμανση πλαστικών παραμορφώσεων στην περιοχή της συγκόλλησης

Από το Σχήμα 10.9 προκύπτει ότι η μέγιστη τιμή της ενεργού ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης προκύπτει στη ρίζα της συγκόλλησης στο μέσο του πλάτους του κάτω πέλματος της διατομής της δοκού. Λόγω του μικρού τοπικού λυγισμού του άνω πέλματος της διατομής της δοκού η ενεργός ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση του σημείου 4 στο άκρο της συγκόλλησης του άνω πέλματος της δοκού είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη παραμόρφωση του σημείου 2, το οποίο βρίσκεται στη μέση του πλάτους της συγκόλλησης. Από το Σχήμα 10.9 προκύπτει ότι η ποσοστιαία μεταβολή των ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων είναι παρόμοια με τη μεταβολή των ενεργών πλαστικών παραμορφώσεων. Η διαπίστωση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι για τον καθορισμό του κρίσιμου σημείου στο οποίο θα πραγματοποιηθεί ρηγμάτωση μπορεί να χρησιμοποιηθούν οι ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις, ο υπολογισμός των οποίων προσφέρεται από το σύνολο σχεδόν των προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων. Ωστόσο, ο καθορισμός των κρίσιμων σημείων στα οποία αναμένεται ρηγμάτωση μέσω των ισοδύναμων

πλαστικών παραμορφώσεων δεν αντικαθιστά την αναγκαιότητα του υπολογισμού των ενεργών ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων προκειμένου να υπολογιστεί η στιγμιά δημιουργία ρωγμής για μια συγκεκριμένη χρονοϊστορία φόρτισης.

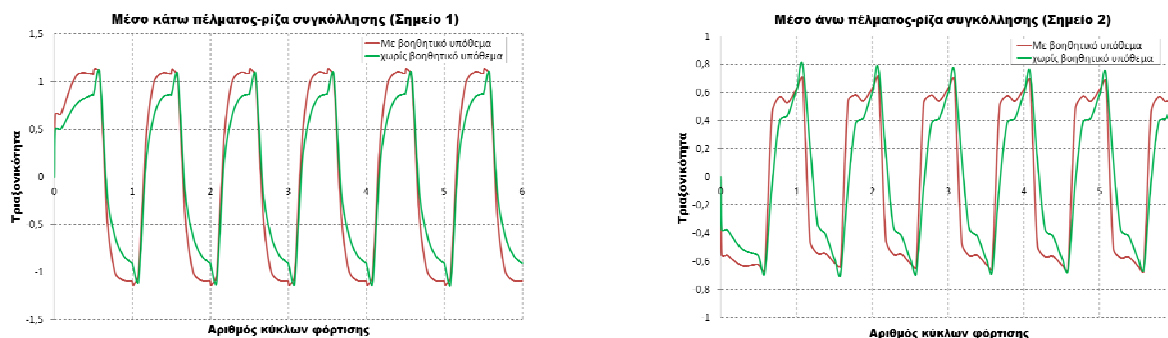
Στο Σχήμα 10.10 φαίνονται οι τιμές του συντελεστή τριαξονικότητας για τα σημεία του Σχήματος 10.8. Για το κάτω πέλμα της δοκού η τιμή του συντελεστή τριαξονικότητας είναι μεγαλύτερη στο μέσο της συγκόλλησης από την αντίστοιχη τιμή στο άκρο της δοκού. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το γεγονός ότι το σημείο 1 έχει μεγαλύτερη ενεργό ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ρηγμάτωση θα λάβει πρώτα χώρα στο μέσο της ρίζας της συγκόλλησης στο κάτω πέλμα της δοκού, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα των συνδέσεων που υπέστησαν βλάβη κατά το σεισμό του Northridge. Από το Σχήμα 10.10 φαίνεται ότι η τιμή του συντελεστή τριαξονικότητας στη ρίζα της συγκόλλησης στο άνω πέλμα της δοκού (σημεία 2,4) είναι μικρότερη από τις αντίστοιχες τιμές του κάτω πέλματος (σημεία 1,3). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ρίζα της συγκόλλησης που βρίσκεται στην κάτω επιφάνεια του άνω πέλματος της δοκού καταπονείται λιγότερο σε σύγκριση με τη ρίζα της συγκόλλησης που βρίσκεται στην κάτω επιφάνεια του κατώτερου πέλματος της διατομής της δοκού. Η διαφορά στο ποσοστό της καταπόνησης διαπιστώνεται και από τις πλαστικές παραμορφώσεις στα αντίστοιχα σημεία που φαίνονται στο Σχήμα 10.9. Από το Σχήμα 10.10 φαίνεται επίσης ότι η τιμή του συντελεστή τριαξονικότητας στα σημεία που βρίσκονται στο μέσο του πλάτους της συγκόλλησης (σημεία 1,2) είναι μεγαλύτερη από την τιμή στα σημεία που βρίσκονται στην εξωτερική πλευρά των πελμάτων (σημεία 3,4).



Σχήμα 10.10: Τιμές τριαξονικότητας στην περιοχή των συγκολλήσεων για 50mm κατακόρυφης μετατόπισης

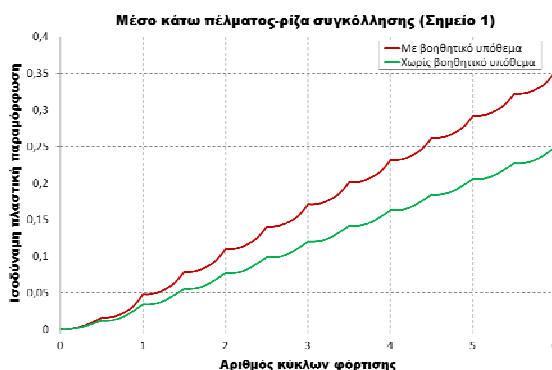
Στο Σχήμα 10.11 φαίνεται η σύγκριση μεταξύ των τιμών του συντελεστή τριαξονικότητας στο μέσο της ρίζας της συγκόλλησης μεταξύ ενός κόμβου δοκού-υποστυλώματος στον οποίο υπάρχει βοηθητικό υπόθεμα συγκόλλησης και ενός κόμβου στον οποίο το υπόθεμα έχει αφαιρεθεί. Από το σχήμα γίνεται φανερό ότι η παρουσία του βοηθητικού υποθέματος συγκόλλησης αυξάνει τις τιμές του συντελεστή τριαξονικότητας στη ρίζα της συγκόλλησης τόσο στο κάτω όσο και στο άνω πέλμα της δοκού του συγκολλητού κόμβου. Καθώς η τριαξονικότητα είναι ενδεικτικό μέγεθος της εντατικής κατάστασης του υλικού, η αύξηση της τιμής της μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της απαιτούμενης χρονικής διάρκειας που απαιτείται ώστε να πραγματοποιηθεί ρηγμάτωση και θραύση του υλικού. Η μέγιστη τιμή του συντελεστή τριαξονικότητας σε κάθε κύκλο φόρτισης παραμένει ωστόσο σχεδόν σταθερή ανεξαρτήτως της παρουσίας των υποθεμάτων.

Κεφάλαιο 10: Επιρροή της παρουσίας βοηθητικών υποθεμάτων συγκόλλησης σε συνδέσεις δοκού-υποστυλώματος



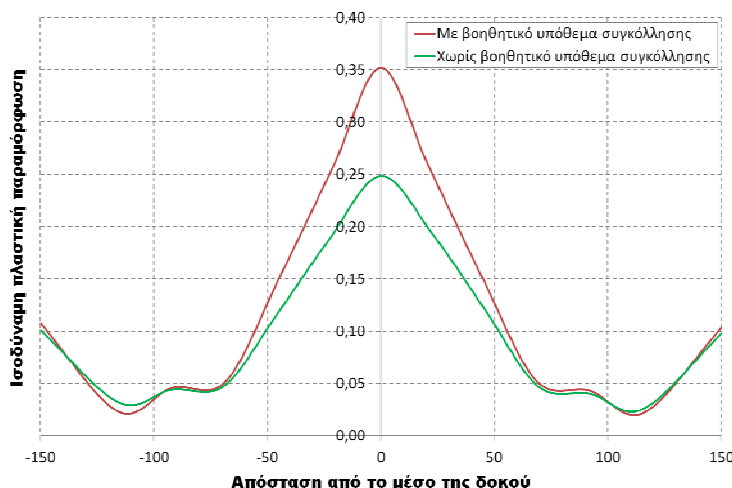
Σχήμα 10.11: Σύγκριση τιμών τριαξονικότητας με και χωρίς την παρουσία βοηθητικού υποθέματος συγκόλλησης στο κάτω (αριστερά) και στο άνω (δεξιά) πέλμα της δοκού

Στο Σχήμα 10.12 φαίνονται οι τιμές των ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων για το σημείο 1 του Σχήματος 10.8 που βρίσκεται στη ρίζα της συγκόλλησης στο μέσο του πλάτους του κάτω πέλματος της δοκού. Από το διάγραμμα συμπεραίνεται ότι η παρουσία του βοηθητικού υποθέματος αυξάνει την τιμή των ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων. Η αύξηση αυτή είναι της τάξεως του 40% για την περίπτωση της γεωμετρίας της σύνδεσης που μελετάται. Οι τιμές αυτές υπενθυμίζεται ότι έχουν εξαχθεί από το ολικό μοντέλο της σύνδεσης και αναμένεται να αλλάξουν κατά τη χρήση των υποφορέων. Ωστόσο, ο λόγος της διαφοράς μεταξύ των τιμών δεν αναμένεται να αλλοιωθεί σε μεγάλο βαθμό.



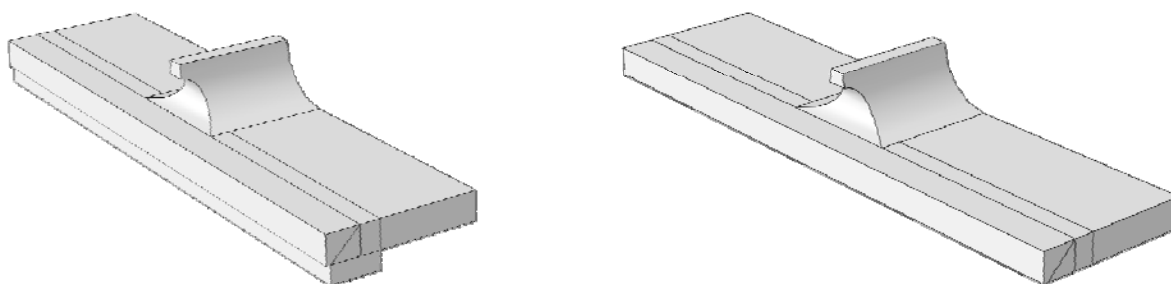
Σχήμα 10.12: Σύγκριση ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων με και χωρίς την παρουσία βοηθητικού υποθέματος συγκόλλησης

Στο Σχήμα 10.13 φαίνεται η τιμή των ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων στη ρίζα της συγκόλλησης κατά πλάτος της δοκού μετά την πάροδο 6 κύκλων φόρτισης. Η μέγιστη τιμή της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης παρατηρείται στο μέσον του πλάτους της δοκού καθώς δεν έχουμε φαινόμενα τοπικού λυγισμού των πελμάτων τα οποία θα μπορούσαν να μεταβάλουν τη συμμετρία των παραμορφώσεων εκατέρωθεν του μέσου της δοκού. Η τιμή της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης στο μέσο του πλάτους της δοκού στην περίπτωση της παρουσίας βοηθητικού υποθέματος συγκόλλησης είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή όταν το υπόθεμα απουσιάζει, όπως φάνηκε στο Σχήμα 10.12. Αντίθετα, στα άκρα των πελμάτων της δοκού η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση όταν υπάρχει υπόθεμα συγκόλλησης είναι ουσιαστικά ίση με την περίπτωση που το υπόθεμα έχει αφαιρεθεί. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η πλαστικοποίηση της διατομής της δοκού ξεκινά από το μέσο του πλάτους της και στη συνέχεια επεκτείνεται προς τα άκρα των πελμάτων. Η παρουσία του μεταλλικού υποθέματος της συγκόλλησης έχει ευεργετική επίδραση στις παραμορφώσεις των άκρων των πελμάτων. Συγκεκριμένα, κατά την πλαστικοποίηση της διατομής της δοκού μέρος των πλαστικών παραμορφώσεων αναλαμβάνεται από το μεταλλικό υπόθεμα με αποτέλεσμα να ελαττώνεται ο ρυθμός εξάπλωσής τους προς τα άκρα της δοκού.



Σχήμα 10.13: Σύγκριση ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων στη ρίζα της συγκόλλησης κατά τον έκτο κύκλο φόρτισης

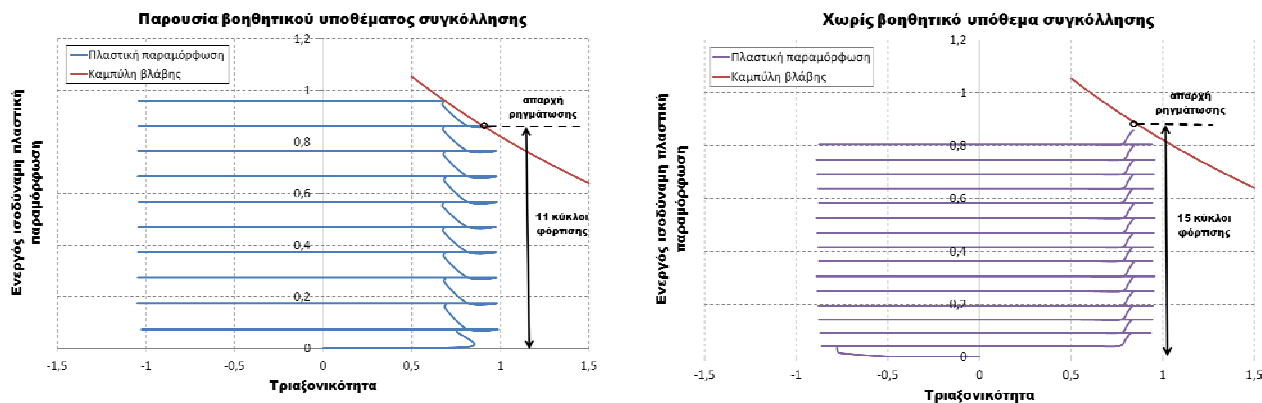
Ο συνδυασμός μεγαλύτερων τιμών τριαξονικότητας και μεγαλύτερων ισοδύναμων ενεργών παραμορφώσεων στις διατομές των δοκών όπου υπάρχουν βοηθητικά υποθέματα συγκόλλησης σε σχέση με αντίστοιχες στις οποίες τα υποθέματα απουσιάζουν, μπορεί να οδηγήσει σε εμφάνιση ρηγματώσεων σε συντομότερο χρονικό διάστημα. Για τη λεπτομερέστερη σύγκριση της χρονικής στιγμής στην οποία θα πραγματοποιηθεί αστοχία του υλικού υπό μια συγκεκριμένη ιστορία φόρτισης είναι απαραίτητη η χρήση εντονότερης διακριτοποίησης στις κρίσιμες περιοχές, σύμφωνα με αυτά που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 7. Για το λόγο αυτό στο Σχήμα 10.14 φαίνονται οι υποφορείς για την περίπτωση των συνδέσεων με και χωρίς την παρουσία μεταλλικών βοηθητικών υποθεμάτων. Οι υποφορείς αυτοί αποτελούνται από τη συγκόλληση (εσωραφή) στο κάτω πέλμα της δοκού, μέρος του κάτω πέλματος και του κορμού της δοκού, τμήμα του πέλματος του υποστύλωματος καθώς και από το βοηθητικό υπόθεμα, στην περίπτωση που αυτό υπάρχει. Με τον τρόπο αυτό γίνεται δυνατή η διακριτοποίηση των κρίσιμων περιοχών με εξαεδρικά πεπερασμένα στοιχεία οκτώ κόμβων μεγέθους 0,2mm και η επίλυση του μοντέλου σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα. Στο Σχήμα 10.14 απουσιάζει το πέλμα του υποστύλωματος ώστε να είναι πιο ευκρινής η περιοχή της συγκόλλησης.



Σχήμα 10.14: Υπομοντέλο περιοχής συγκόλλησης για την περίπτωση σύνδεσης με (αριστερά) και χωρίς (δεξιά) βοηθητικό υπόθεμα συγκόλλησης

Στο Σχήμα 10.15 φαίνεται η αύξηση των ενεργών ισοδύναμων πλαστικών παραμορφώσεων ως προς τις τιμές του συντελεστή τριαξονικότητας για την περίπτωση συνδέσεων με και χωρίς την παρουσία βοηθητικού υποθέματος συγκόλλησης. Όπως φαίνεται από τα σχήματα ο ρυθμός αύξησης των πλαστικών παραμορφώσεων είναι σταθερός μετά τους πρώτους κύκλους φόρτισης, εφόσον δεν υπάρχει αλλαγή της γεωμετρίας της σύνδεσης μέσω σχηματισμού τοπικού λυγισμού στις δοκούς ή απόκλισης της διατομής του υποστύλωματος από την κατακόρυφη θέση της. Από τα

διαγράμματα φαίνεται ότι η απαρχή της ρηγμάτωσης για την περίπτωση της σύνδεσης παρουσίας του βοηθητικού υποθέματος συγκόλλησης θα πραγματοποιηθεί στο μέσο του πλάτους της δοκού στη ρίζα της συγκόλλησης του κάτω πέλματος μετά την πάροδο 11 κύκλων φόρτισης. Στην αντίστοιχη σύνδεση όπου το υπόθεμα έχει αφαιρεθεί, η αστοχία θα πραγματοποιηθεί μετά την πάροδο 15 κύκλων φόρτισης, γεγονός που αποδεικνύει την ευμενή επίδραση της αφαίρεσης του υποθέματος σε μια συγκόλληση.



Σχήμα 10.15: Εφαρμογή αρχής ενεργού βλάβης για την περίπτωση σύνδεσης για την περίπτωση παρουσίας (αριστερά) και απουσίας (δεξιά) του βοηθητικού υποθέματος συγκόλλησης

10.6 Συμπεράσματα αναλύσεων

Τα βοηθητικά υποθέματα συγκολλήσεων αποτελούσαν και αποτελούν συνήθη πρακτική στην περίπτωση των εργοταξιακών συγκολλήσεων σε συνδέσεις δοκών-υποστυλωμάτων σε πλαίσια ροπής. Η χρήση τους κατά την πραγματοποίηση της συγκόλλησης όμως είχε σαν αποτέλεσμα τη συνένωσή τους με τη δοκό ως συστατικό μέρος πλέον της σύνδεσης. Μετά το πέρας της συγκόλλησης δεν αφαιρούνταν από τη σύνδεση, καθώς δεν υπήρχε κανονισμός που να το θέτει ως όρο στις περιπτώσεις των συνήθων κτιριακών έργων μέχρι το σεισμό του Northridge.

Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο παρόν κεφάλαιο με όρους μηχανικής της βλάβης, απέδειξε τη δυσμενή επίδραση των υποθεμάτων στη συμπεριφορά συνδέσεων υπό ανακυκλιζόμενες φορτίσεις, όπως είναι και οι σεισμικές δονήσεις. Ειδικότερα, αποδείχθηκε ότι η παρουσία των βοηθητικών υποθεμάτων συγκόλλησης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των τιμών του συντελεστή τριαξονικότητας στη ρίζα της συγκόλλησης, ενώ ταυτόχρονα αυξάνονται οι ενεργές ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις. Ο συνδυασμός των δύο αυτών μεγεθών με χρήση της αρχής της ενεργού βλάβης οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η απαρχή της ρηγμάτωσης στην περίπτωση των συνδέσεων στις οποίες υπάρχουν τα υποθέματα, θα πραγματοποιηθεί νωρίτερα σε σχέση με κόμβους στους οποίους το υπόθεμα έχει αφαιρεθεί.

Οι κανονισμοί μετά το σεισμό του Northridge και του Kobe [139] προτείνουν την αφαίρεση των μεταλλικών βοηθητικών υποθεμάτων συγκόλλησης από τις συνδέσεις δοκού-υποστυλώματος και ειδικότερα από το κάτω πέλμα των δοκών. Μετά την αφαίρεση απαιτείται η πραγματοποίηση εξωραφής στο κάτω πέλμα της δοκού προκειμένου να ενισχυθεί η ρίζα της συγκόλλησης. Στο άνω πέλμα της δοκού, το υπόθεμα της συγκόλλησης μπορεί να παραμείνει στη θέση του μετά το πέρας της εργασίας, αρκεί όμως να σφραγισθεί με τη βοήθεια εξωραφής προκειμένου να αποφευχθούν τα φαινόμενα των αυξημένων πλαστικών παραμορφώσεων κατά τη φόρτιση, όπως αποδείχθηκε και από τις αναλύσεις που προηγήθηκαν.

11 Συμπεράσματα-Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

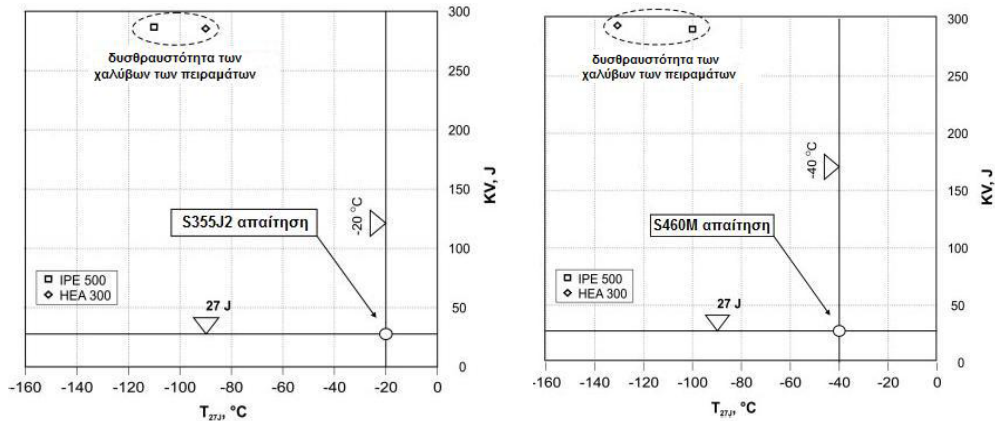
11.1 Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε μια μεθοδολογία προκειμένου να γίνει εφικτή η πρόβλεψη της δημιουργίας ρωγμών σε συγκολλητούς κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων που υπόκεινται σε ανακυκλιζόμενες φορτίσεις. Βασικός στόχος της εργασίας ήταν η διερεύνηση της γεωμετρικής περιοχής και του κρίσιμου αριθμού κύκλων φόρτισης στον οποίο πραγματοποιείται εμφάνιση ρηγματώσεων στο χάλυβα σε συγκολλητές συνδέσεις πλαισίων ροπής υπό σεισμικές καταπονήσεις.

Η διεξαγωγή πειραματικών και αριθμητικών αναλύσεων με τη μορφή προσομοιώσεων με πεπερασμένα στοιχεία αποτελούν τους δύο βασικούς άξονες του ερευνητικού προγράμματος PLASTOTOUGH και, κατ' επέκταση, της παρούσας διατριβής. Υπογραμμίζεται ότι τα πειραματικά αποτελέσματα αποτελούν το βασικότερο παράγοντα στον οποίο βασίζονται οι αναλύσεις. Για το λόγο αυτό όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός πειραματικών διερευνήσεων, τόσο του δομικού χάλυβα της κατασκευής, όσο και της ίδιας της σύνδεσης δοκού-υποστυλώματος, τόσο καλύτερη θα είναι και η ακρίβεια των προσομοιώσεων με τη βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων. Παρ' όλα αυτά στα πλαίσια της εργασίας αυτής γίνεται μια πρώτη προσέγγιση, η οποία θα αποτελέσει οδηγό για μελλοντική έρευνα η οποία θα ακολουθήσει.

Το κύριο βάρος της διατριβής αυτής δίνεται στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο πανεπιστήμιο του RWTH Aachen τόσο σε επίπεδο υλικού, όσο και σε επίπεδο κατασκευής, καθώς και στην αριθμητική διερεύνηση που ακολούθησε στο εργαστήριο μεταλλικών κατασκευών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Τόσο οι πειραματικές διερευνήσεις στη Γερμανία όσο και οι αναλύσεις με τη βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιήθηκαν από το συγγραφέα της παρούσας διατριβής. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται εκτεταμένα αριθμητικά εργαλεία προκειμένου να διερευνηθεί η συμπεριφορά των συνδέσεων της διατριβής σε όρους ρηγματώσης. Ο σκοπός είναι η λεπτομερής καταγραφή της συμπεριφοράς των συνδέσεων και η τελική διατύπωση απλών σχέσεων μέσω των οποίων θα μπορεί ο μελετητής να υπολογίσει εύκολα την αντοχή μιας κατασκευής σε όρους ρηγματώσεων. Η εύρεση και καταγραφή μιας διαδικασίας η οποία προσδιορίζει την αντοχή μιας κατασκευής σε όρους ρηγματώσεων ανάλογα με την ποιότητα του χάλυβα που χρησιμοποιείται κάθε φορά, αντιμετωπίζεται για πρώτη φορά στην παρούσα διατριβή και στις τεχνικές εκθέσεις του προγράμματος που προαναφέρθηκε.

Για τις ανάγκες των πειραματικών προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια από διατομές θερμής έλασης οι οποίες προήλθαν από Ευρωπαϊκούς παραγωγούς (Peiner Träger GmbH, EVRAZ Vitkovice Steel). Στο Σχήμα 11.1 φαίνονται οι τιμές δυσθραυστότητας των χαλύβων της παρούσας διατριβής. Από το σχήμα γίνεται κατανοητό ότι η δυσθραυστότητα των χαλύβων από τους οποίους κατασκευάστηκαν οι συγκολλητές συνδέσεις δοκού-υποστυλώματος, είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από αυτές που θέτουν ως όρια οι κανονισμοί [30]. Από τις αναλύσεις που προηγήθηκαν φάνηκε ότι για τις ποιότητες χάλυβα του Σχήματος 11.1, οι τιμές που προέκυψαν από τις δοκιμές Charpy καθώς και η μέγιστη αντοχή σε όρους ρηγματώσεων μέσω της χρήσης των καμπυλών βλάβης είναι εξίσου μεγάλες καθιστώντας την κατασκευή ασφαλή έναντι σεισμών ομοίων με αυτούς που ελέγχθηκαν στα πλαίσια της διατριβής. Χάλυβες οι οποίοι δεν ανταποκρίνονται στις τιμές του σχήματος, ενδέχεται να παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές καμπύλων βλάβης, με αποτέλεσμα να είναι πιθανή πρόωρη αστοχία έναντι ρηγματώσεως.



Σχήμα 11.1: Απαιτήσεις δυσθραυστότητας σύμφωνα με τον EN 10025 [45] και σύγκριση με τους χάλυβες της εργασίας

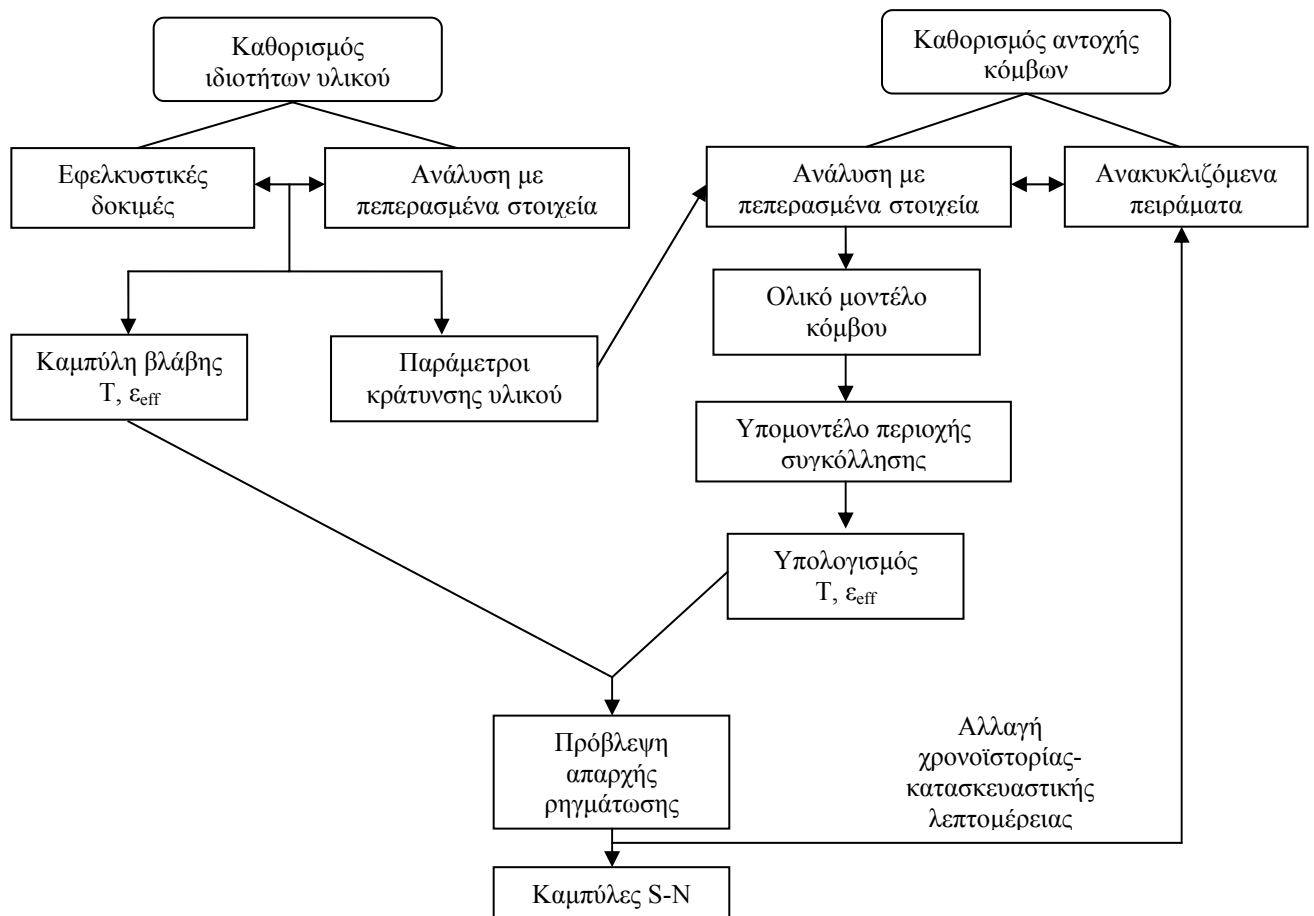
Οι αναλύσεις που προηγήθηκαν κατέδειξαν το γεγονός ότι για τους χάλυβες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή και των οποίων τα χαρακτηριστικά της τιμής δυσθραυστότητας απεικονίζονται στο Σχήμα 11.1, δεν απαιτείται η απομείωση του συντελεστή συμπεριφοράς q προκειμένου να ληφθεί υπόψη το φαινόμενο της αστοχίας έναντι υπέρ-ολιγοκυκλικής κόπωσης. Στην περίπτωση που ο δομικός χάλυβας είναι χαμηλότερης ποιότητας από αυτόν του Σχήματος 11.1 απαιτούνται διερευνήσεις για τον προσδιορισμό της ισχύουσας καμπύλης βλάβης και τον καθορισμό καμπυλών $S-N$ υπό τη μορφή $\Delta\sigma-N$, προκειμένου να αποφασισθεί κατά πόσον είναι απαραίτητη απομείωση του συντελεστή συμπεριφοράς της κατασκευής.

Η σύγκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων των αναλυτικών και των πειραματικών διερευνήσεων, τα οποία παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, αποδεικνύει την εγκυρότητα και τα πλεονεκτήματα της παρούσας διαδικασίας. Γενικότερα τα βασικά συμπεράσματα της διαδικασίας που ακολουθήθηκε στα πλαίσια της διατριβής συνοψίζονται στη συνέχεια:

- Η χρήση της αρχής της ενεργού βλάβης δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς την πρόβλεψη της απαρχής όλκιμης ρηγματώσεως σε συγκολλητές συνδέσεις πλαισίων ροπής υπό ανακυκλιζόμενες φορτίσεις.
- Η επακριβής γνώση της συμπεριφοράς του υλικού υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση και ο καθορισμός των παραμέτρων κράτυνσης που το χαρακτηρίζουν είναι καθοριστικής σημασίας για την ορθή πρόβλεψη του χρονικού σημείου στο οποίο θα πραγματοποιηθεί ρηγματώση του υλικού.
- Η σύγκλιση μεταξύ πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων μέσω της διαδικασίας που περιγράφηκε, δείχνει τη συμβατότητα μεταφοράς μεταβλητών που υπολογίστηκαν σε δοκίμια μικρής κλίμακας (καμπύλες βλάβης, νόμοι υλικού κλπ.), σε κατασκευές μεγάλου μεγέθους όπως οι συγκολλητοί κόμβοι δοκών-υποστυλωμάτων που μελετήθηκαν.
- Η δημιουργία πλαστικής άρθρωσης στη διατομή της δοκού έχει ως αποτέλεσμα την προστασία της συγκόλλησης από πρόωρες ψαθυρού τύπου ρηγματώσεις. Ο τοπικός λυγισμός της δοκού μειώνει τη συγκέντρωση πλαστικών παραμορφώσεων στη συγκόλληση με αποτέλεσμα αυτή να προστατεύεται από εκτεταμένες ρηγματώσεις οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε ολική αστοχία της σύνδεσης. Για το λόγο αυτό κύκλοι φόρτισης που χαρακτηρίζονται από μεγάλες μετατοπίσεις οι οποίοι προκαλούν τοπικό λυγισμό στη δοκό σε απόσταση από το πέλαμα του υποστυλώματος, μπορεί να έχουν ευεργετική επίδραση στη συμπεριφορά μιας σύνδεσης δοκού-υποστυλώματος καθώς απομακρύνουν την πιθανότητα αστοχιών στη συγκόλληση καθώς η ρηγματώση πραγματοποιείται στην περιοχή της πλαστικής άρθρωσης.

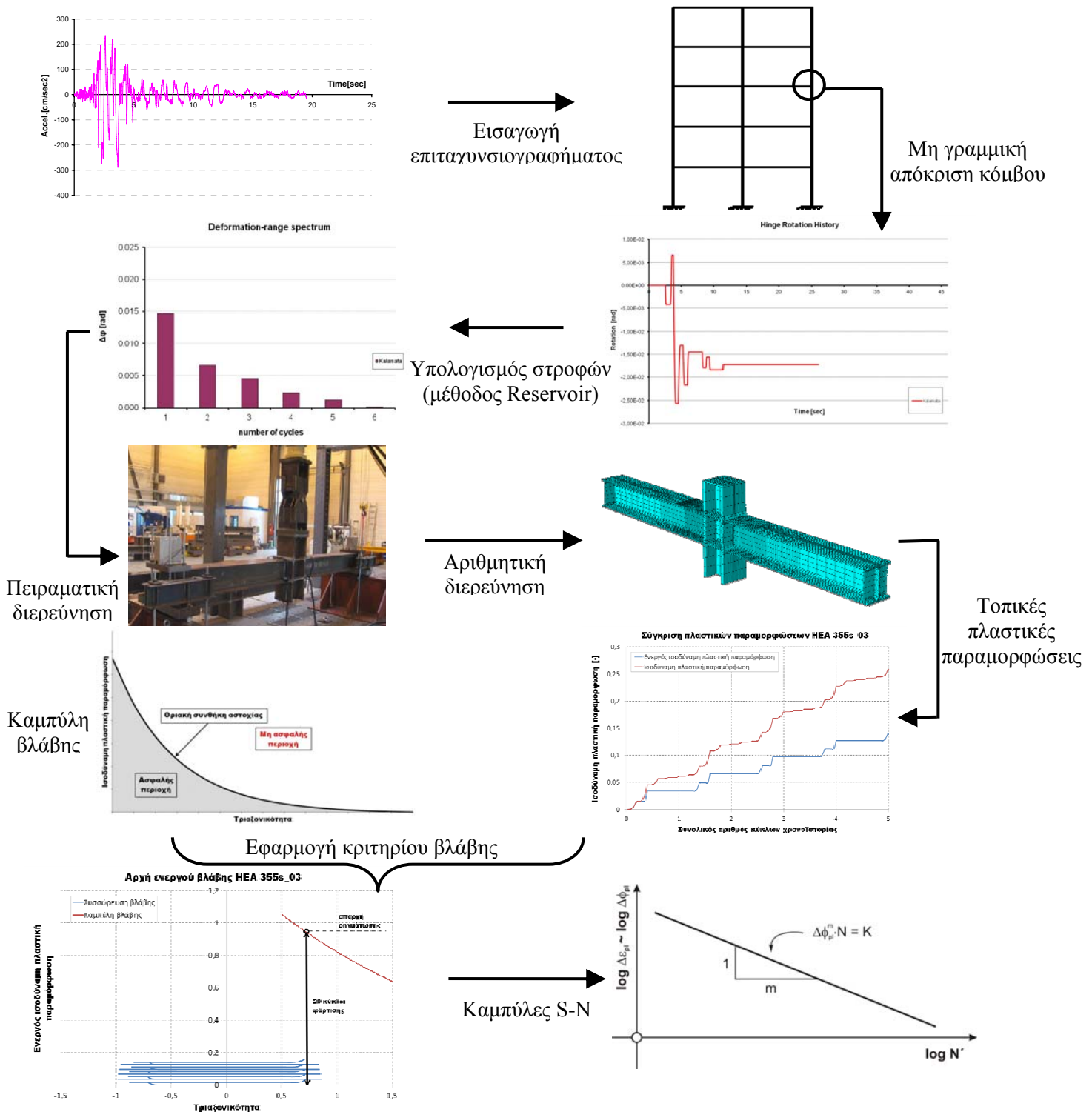
- Η δημιουργία καμπυλών αντοχής $S-N$ επιτρέπει την παράκαμψη των χρονοβόρων και κοπιαστικών αναλύσεων καταφεύγοντας σε πίνακες οι οποίοι ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του χάλυβα, της κατασκευής και της χρονοϊστορίας φόρτισης οδηγούν σε υπολογισμό της χρονικής στιγμής που θα πραγματοποιηθεί ρηγμάτωση στο σημείο για το οποίο πραγματοποιείται ο έλεγχος.
- Η αρχή της ενεργού βλάβης χρησιμεύει στη σύγκριση κατασκευαστικών λεπτομερειών με απώτερο στόχο την επιλογή της διάταξης εκείνης με τη μικρότερη πιθανότητα εμφάνισης ρωγμών, όπως πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της διατριβής για τις βοηθητικές οπές συγκόλλησης που υπάρχουν στον κορμό της διατομής των δοκών, καθώς και στα βοηθητικά μεταλλικά υποθέματα που τοποθετούνται κάτω από τη ρίζα των συγκολλήσεων. Οι αναλύσεις που ακολούθησαν έδειξαν τις διατάξεις εκείνες που εγγυώνται μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της κατασκευής σε όρους ρηγματώσεων υπό ανακυκλιζόμενες φορτίσεις μεγάλης έντασης μέσω της αποφυγής δημιουργίας ρωγμών στις κρίσιμες περιοχές των αντίστοιχων γεωμετρικών διατάξεων.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία υπολογισμού της παρούσας διατριβής μπορεί να είναι σύνθετη και με μεγάλο υπολογιστικό κόστος, αλλά υπάρχουν σημαντικά οφέλη εφόσον αυτή καταλήγει στο σχηματισμό σχέσεων $S-N$ οι οποίες προσφέρουν αποτελέσματα σε απλή μορφή που μπορεί να γίνουν άμεσα εφαρμόσιμα. Στο Σχήμα 11.2 φαίνονται συνοπτικά τα στάδια που ακολουθήθηκαν για την κατάρτιση των σχέσεων $S-N$ και τα οποία θα πρέπει να επαναληφθούν στην περίπτωση διαφορετικής ποιότητας χάλυβα ή διαφορετικών κατασκευαστικών λεπτομερειών.



Σχήμα 11.2: Διαδικασία υπολογισμού αντοχών σε όρους ρηγμάτωσης για ολιγοκυκλική κόπωση υπό περιορισμένο αριθμό κύκλων φόρτισης

Κατά τη διάρκεια του υπολογισμού της αντοχής σε όρους ρηγματώσης των συγκολλητών κόμβων της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν πειραματικά και αριθμητικά δεδομένα όπως αυτά παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Στο Σχήμα 11.3 φαίνεται η μεθοδολογία με βάση την οποία κάθε κόμβος δοκού-υποστυλώματος αξιολογήθηκε με βάση την πιθανή δημιουργία ρωγμής. Ο υπολογισμός του χρονικού σημείου στο οποίο δημιουργείται η ρωγή με βάση αυτή τη διαδικασία, εισέρχεται τελικά στο διάγραμμα *S-N* προκειμένου να υπολογιστεί η εξίσωση αστοχίας.



Σχήμα 11.3: Διαδικασία υπολογισμού ρηγματώσης συγκολλητού κόμβου δοκού-υποστυλώματος

11.2 Πρωτότυπη συμβολή

Στην παρούσα διατριβή επιχειρήθηκε η τεκμηρίωση μιας μεθοδολογίας ανάλυσης και πρόβλεψης του σχηματισμού ρωγμών σε συγκολλητές συνδέσεις δοκών-υποστυλωμάτων υπό σεισμικές καταπονήσεις. Μέσω πειραμάτων και αριθμητικών αναλύσεων διατυπώθηκαν νέοι κανόνες που χρησιμεύουν στην αποτίμηση της αντοχής ενός συγκολλητού κόμβου ως προς τη δημιουργία ρωγμών εξαιτίας ανακυκλιζόμενων φορτίσεων. Συγκεκριμένα:

- Εκτελέστηκαν πρωτότυπα πειράματα σε συγκολλητούς κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων με χρήση εξωραφών και εσωραφών με ζητούμενο την αποτύπωση του γεωμετρικού και χρονικού σημείου δημιουργίας ρωγμών με χρήση διαφόρων ιστορικών φόρτισης ανακυκλιζόμενης φύσεως.
- Μετασχηματίστηκε με κατάλληλο τρόπο ένα μοντέλο αστοχίας το οποίο προβλέπει την εμφάνιση ρωγμών σε μεταλλικά υλικά υπό μονοτονικές φορτίσεις έτσι ώστε να λαμβάνει υπόψη του την περίπτωση των ανακυκλιζόμενων φορτίσεων. Το μοντέλο αστοχίας βασίζεται στις καμπύλες βλάβης οι οποίες προέκυψαν από πειραματικές και αριθμητικές διερευνήσεις με πεπερασμένα στοιχεία σε κατάλληλα κατασκευασμένα δοκίμια υπό εφελκυσμό. Ο υπολογισμός των καμπύλων βλάβης για τις ποιότητες χάλυβα της διατριβής πραγματοποιήθηκε μέσω δοκιμίων όμοιων με αυτών που χρησιμοποιήθηκαν κατά τις εφελκυστικές δοκιμές του υλικού.
- Πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, στις οποίες λήφθηκαν υπόψη με λεπτομέρεια όλα τα φαινόμενα που έκαναν την εμφάνισή τους κατά τη φόρτιση των συνδέσεων (τοπικός λυγισμός, απόκλιση διατομής υποστυλώματος από την κατακόρυφη διεύθυνση). Τα στοιχεία των αναλύσεων αυτών (παραμορφώσεις, τάσεις, συντελεστές τριαξονικότητας) χρησιμοποιήθηκαν κατά την εφαρμογή του μοντέλου αστοχίας που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Μέσω αυτής της διαδικασίας υπολογίστηκε, με καλή σύγκλιση ως προς τα πειραματικά αποτελέσματα, η απαρχή της ρηγμάτωσης στους κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων.
- Τα αποτελέσματα της διατριβής αποτυπώθηκαν σε καμπύλες S-N όμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση της απλής κόπωσης. Η ευκολία και η εξοικείωση των μηχανικών στη χρήση καμπύλων αυτής της μορφής καθιστά ευκολότερη την υιοθέτηση της μεθοδολογίας που προτείνεται ως προς την αξιολόγηση μιας σύνδεσης δοκού-υποστυλώματος σχετικά με την πιθανότητα πρόωρης ρηγμάτωσης της.
- Πραγματοποιήθηκαν πρωτότυπες συγκρίσεις σε διάφορες κατασκευαστικές λεπτομέρειες με χρήση της προτεινόμενης μεθοδολογίας προκειμένου να αποτιμηθούν οι αντοχές τους ως προς την πιθανότητα παρουσίας ρωγμών. Ταυτόχρονα προτάθηκαν νέες διατάξεις οι οποίες εγγυώνται μικρότερη πιθανότητα εμφάνισης ρωγμών σε σχέση με τις αρχικές υπό το ίδιο ιστορικό ανακυκλιζόμενης φόρτισης.
- Η διαδικασία που περιγράφηκε στην παρούσα διατριβή μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να επισημανθούν οι κρίσιμες περιοχές σε μια σχεδιαστική διάταξη οι οποίες και μπορεί να οδηγήσουν σε πρόωρη αστοχία. Με τον τρόπο αυτό μπορεί ο ερευνητής να οδηγηθεί είτε σε επανασχεδιασμό της κατασκευαστικής λεπτομέρειας είτε σε τοπική ενίσχυση της διάταξης προκειμένου να παρατείνει τον αριθμό των κύκλων φόρτισης στον οποίο θα εμφανιστούν ρηγματώσεις.

11.3 Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

Η έρευνα που παρουσιάζεται στην παρούσα διατριβή είναι ένα πρώτο βήμα δείχνοντας τον τρόπο με τον οποίο μπορούν να εξαχθούν παρόμοια αποτελέσματα στο μέλλον. Οι βασικοί άξονες πάνω στους οποίους μπορεί να αναπτυχθεί η έρευνα στο μέλλον συνοψίζονται παρακάτω:

- Η πραγματοποίηση επιπλέον εφελκυστικών πειραμάτων σε χάλυβες διαφορετικής ποιότητας και διαφορετικής δυσθραυστότητας με στόχο τον υπολογισμό των καμπυλών βλάβης για την κάθε ποιότητα. Με αυτό τον τρόπο, μπορούν να προσδιοριστούν κατηγορίες χαλύβων ανάλογα με το σχήμα και τις τιμές των καμπύλων βλάβης, με παρόμοιο τρόπο που υπάρχουν κατηγορίες χαλύβων ανάλογα με την αντοχή τους έναντι διαρροής και θραύσης.
- Η πραγματοποίηση επιπλέον πειραμάτων συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος για διάφορες ιστορίες φόρτισης διαφοροποιώντας τις διατομές δοκών και υποστυλωμάτων. Η πειραματική διερεύνηση μιας ποικιλίας διατάξεων και ειδικών κατασκευαστικών χαρακτηριστικών που συναντώνται στην πράξη, όπως η χρήση οπών συγκόλλησης ή ειδικών βοηθητικών τεμαχίων της σύνδεσης, θα δώσουν αποτελέσματα τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για πιστοποίηση της διαδικασίας μέσω της χρήσης αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων. Με τον τρόπο αυτό προωθείται η βελτιστοποίηση κατασκευαστικών διατάξεων με τρόπο ώστε να αποφεύγεται η πρόωρη ρηγμάτωση και αστοχία τους.
- Η χρήση των προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων δίνει μεγάλες δυνατότητες ως προς τον αριθμό των ιστοριών και των γεωμετρικών διατάξεων που μπορούν να διερευνηθούν. Ο μεγάλος αυτός αριθμός αναλύσεων οδηγεί στην εξαγωγή σχέσεων S-N για την πληθώρα διαφορετικών διατομών και χαλύβων που έχουν αναλυθεί, όπως και για τις διαφορετικές κατασκευαστικές λεπτομέρειες που συναντώνται σε έργα μηχανικού. Η χρησιμότητα των πινάκων αυτών έχει γίνει εμφανής μέσω της χρήσης τους στην περίπτωση φαινομένων κόπωσης.
- Η επέκταση της αρχής της ενεργού βλάβης, η οποία βασίζεται στις μεταβλητές της ενεργού ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης και του συντελεστή τριαξονικότητας, έτσι ώστε να λαμβάνονται υπόψη περιπτώσεις αστοχίας με έντονες διατμητικές τάσεις (δοκοί σύζευξης, συστήματα FUSEIS). Ο Bai [140] πρότεινε την εισαγωγή στο μοντέλο βλάβης της τρίτης αναλλοίωτης του τανυστή των τάσεων (γωνία Lode) ώστε να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της διάτμησης στο υλικό. Η χρήση του μοντέλου αυτού μπορεί να βαθμονομηθεί μέσω ανάλογων πειραμάτων με σκοπό την πρόβλεψη ρηγματώσεων σε συστήματα απορρόφησης ενέργειας με κύριο μηχανισμό απορρόφησης ενέργειας τη διατμητική παραμόρφωση.

12 Βιβλιογραφία

- [1] Karlos V., Vayas I., PLASTOTOUGH Project, Final Report, NTUA, 2009.
- [2] European Commission, Research Fund for Coal and Steel, Directorate-General for Research and Innovation. [2010] "Modern plastic design for steel structures", RFSR-CT-2005-00039, Final Report, not yet published.
- [3] European committee for standardization (CEN) Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-9: prEN 1993-1: "Fatigue".
- [4] Chen H-P, Kalia R., Kaxiras E., Lu G., Nakano A., Nomura K., Duin A., Vashishta P., Yuan Z., (2010), "Embrittlement of Metal by Solute Segregation-Induced Amorphization", Physical Review Letters, Vol.104, Is. 15.
- [5] Enami K., (2005), "The effects of compressive and tensile prestrain on ductile fracture initiation in steels", Engineering fracture mechanics, Vol. 72, Is. 7, pp. 1089-1105.
- [6] Dlouhy I., Chlup Z., Kozak V., (2004), "Constraint effects at brittle initiation in a cast ferritic steel", Fracture and Damage Mechanics, Vol. 71, Is. 4-6, pp. 873-883.
- [7] Toribio J., Gonzalez B., Matos J., (2010), "Fatigue and fracture in cold drawn pearlitic steel", Engineering fracture mechanics, Vol. 77, Is. 11, pp. 2024-2032.
- [8] United States Navy Dpt., (1947), "Final report of a board of investigation to inquire into the design and methods of construction of welded steel merchant vessels", Washington D.C., Government Printing Office.
- [9] Masubuchi K.,(1980), "Analysis of welded structures", International series on materials science and technology, Vol. 33, Pergamon Press.
- [10] Liebowitz H., (1968), "Fracture", Academic Press.
- [11] Hradecky S., (2011), "Accident: Southwest B733 near Yuma on Apr 1st 2011", The Aviation Herald.
- [12] Fahjan Y., Ozdemir Z., Keypour H., (2007), "Procedures for real earthquake time histories scaling and application to fit Iranian design spectra", Proceedings of 5th international conference on seismology and earthquake engineering", Tehran.
- [13] Federal Emergency Management Agency-355E: State of the art report on past performance of steel moment-frame buildings in earthquakes, September 2000.
- [14] Kurobane Y., Azuma K. and Ogawa K. (1997), "Brittle fracture in steel building frames Comparative study of Northridge and Kobe earthquake damage," International Institute of Welding, Annual Assembly, San Francisco, California.
- [15] EERI Team Field, Ricles J. M., Lignos D. G., Love J., Midorikawa M., Okazaki T.: Effects of the 2011 Tohoku Japan Earthquake on Steel Structures, 3 August 2011.
- [16] Xue M., Kaufmann E.J., Lu L.W., Fisher J.W., (1996) "Achieving ductile behavior of moment connections", Modern Steel Construction, June 1996.
- [17] Popov E., Yang T., Chang S. (1998) "Design of steel MRF connections before and after 1994 Northridge earthquake", Engineering structures, Vol. 20, No. 12, pp. 1030-1038.

- [18] Lu L., Ricles J., Mao C., Fischer J., (2000) “Critical issues in achieving ductile behavior of welded moment connections”, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 55, Is. 1-3, pp. 325-341.
- [19] Engelhardt M., Husain A., (1993) “Cyclic-loading performance of welded flange-bolted web connections”. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 119, Is. 12, pp. 3537-3550.
- [20] Nakashima M., Inoue K., Tada M., (1998) “Classification of damage to steel buildings observed in the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake”. *Engineering Structures*, Vol. 20, Is. 4-6, pp. 271-281.
- [21] AISC (1997) “Seismic provisions for structural steel buildings”, American Institute of Steel Construction Inc., Chicago.
- [22] AISC (2005) “Seismic provisions for structural steel buildings”, American Institute of Steel Construction Inc., Chicago.
- [23] Engelhardt M., Sabol T., (1997) “Seismic resistant steel moment connections: developments since the 1994 Northridge earthquake”, *Progress in Structural Engineering and Materials*, Vol. 1(1), pp. 68-77.
- [24] Plumier A., (1990) “New idea for safe structures in seismic zones”, IABSE Symposium, Mixed structures including new materials, Brussels.
- [25] Iwankiw N., Carter C., (1996) “The dogbone: A new idea to chew on”, *Modern Steel Construction*, Vol. 36, No. 4, pp. 18-23.
- [26] Popov E., Blondet M., Stepanov L., (1996) “Application of ‘dog bones’ for improvement of seismic behavior of steel connections”, *Earthquake Engineering Research Center*, Rep. No. UCB/EERC-96/05, University of California, Berkeley, California.
- [27] Tadao N., Tetsuya F., Keisuke M., (1997) “At welding connections on shop assembling recommendations for beam-end details in steel structures”, *Proceedings STESSA ‘97*, 2nd International Conference on Steel Structures in Seismic Areas, Kyoto, Japan, August 1997, ed. Mazzolani F., Akiyama H., pp. 632-639.
- [28] Calado L., Mele E., (2000) “Experimental behavior of steel beam-to-column joints: fully welded vs. bolted connections”, *Proceedings 12th WCEE*, World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, January 2000, No. 2570/6/A.
- [29] Plumier A., Agatino M., Castellani C., Castiglioni C., (1998) “Resistance of steel connections to low-cycle fatigue”, *Proceedings 11th ECEE*, European Conference on Earthquake Engineering, Paris, France, September 1998, A.A. Balkema/Rotterdam.
- [30] European committee for standardization (CEN) Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-10: prEN 1993-1 “Selection of materials for fracture toughness and through-thickness properties”.
- [31] European committee for standardization (CEN) EN 13445: “Unfired pressure vessels”.
- [32] BS 7910: British Standards Institution (2005), “Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures”.
- [33] S.I.N.T.A.P. (1999), “Structural Integrity Assessment Procedure”, Final Report EU-Project, BE 95-1462, Brussels.
- [34] European committee for standardization (CEN) Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-1: prEN 1993-1 “General rules and rules for buildings”.

- [35] European committee for standardization (CEN), EN 10025: Hot Rolled Products of Structural Steels.
- [36] European committee for standardization (CEN), EN 1090-2: Execution of steel structures and aluminum structures - Part 2: Technical requirements for steel structures.
- [37] JRC- Scientific and technical report: Commentary and worked examples to EN 1993-1-10- Material toughness and through thickness properties and other toughness oriented rules in EN 1993. CRC, Sept 2008.
- [38] European committee for standardization (CEN) Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-12: prEN 1993-1 “Supplementary rules for high strength steels”.
- [39] European committee for standardization (CEN), Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: EN 1993-1-8, “Design of joints”.
- [40] Armand Considère, *Annales des Ponts et Chaussées* 9 (1885), pp. 574-775.
- [41] STEEL: A Handbook for Material Research and Engineering Volume 1: Fundamentals, Springer Verlag, Verlag Stahleisen mbH Düsseldorf, 1992.
- [42] European committee for standardization (CEN), Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 2: EN 1993-2, “Design of Steel Bridges”.
- [43] European committee for standardization (CEN), Eurocode 8 – Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 1: EN 1998-1, “General rules, Seismic Actions and Rules for Buildings”.
- [44] BS 7910: British Standards Institution. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures, 2005.
- [45] American Society for Testing and Materials-ASTM E1921-02, Standard test method for determination of reference temperature, T₀, for ferritic steels in the transition range. Annual book of ASTM standards, vol. 03.01. 2003. p. 1128–47.
- [46] European Structural Integrity Society P1-92 , Recommendations for determining the fracture resistance of ductile metals
- [47] Heerens, J., Read, D.T., Cornec, A. and Schwalbe, K.-H., (1991), “Interpretation of Fracture Toughness in the Ductile-to-Brittle Transition Region by Fractographical Observations”, Defect Assessment in Components - Fundamentals and Applications, ESIS/EGF9, Mechanical Engineering Publications, London, pp. 659-678.
- [48] Landes, J.D. and McCabe, D.E., (1984), “Effect of Section Size on Transition Temperature Behavior of Structural Steels”, Fracture Mechanics: Fifteenth Symposium ASTM STP 833, ASTM, pp. 378-392.
- [49] Wallin, K., (1999) “The Master Curve Method: A new Concept for Brittle Fracture”, International Journal of Materials and Product Technology, Vol. 14, No. 2/3/4, pp. 342-354.
- [50] K. Wallin, (1993), “Irradiation damage effects on the fracture toughness transition curve shape for reactor pressure vessel steels”, International Journal of Pressure Vessels and Piping Vol. 55, Is. 1, 1993, pp. 61-79.
- [51] Marandet, B., Sanz, G., (1976), “Étude par mécanique de la rupture de la ténacité d’aciers à résistance moyenne fournis en forte épaisseur. Revue de Métallurgie”, pp. 359-383.

- [52] EricksonKirk M., EricksonKirk M., (2006), “An Upper-Shelf Fracture Toughness Master Curve for Ferritic Steels”, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 83, No. 8, pp. 571-583.
- [53] EricksonKirk, M., EricksonKirk, M., (2006), “The relationship between the transition and upper-shelf fracture toughness of ferritic steels”, Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 29, Issue 9-10, pp. 672-684.
- [54] Kachanov L.M., (1986), “Introduction to Continuum Damage Mechanics”, Martinus Nijhoff Publ., Dordrecht.
- [55] Lemaitre J., Chaboche J. L., (1990), “Mechanics of Solid Materials”, Cambridge University Press.
- [56] Münstermann S., (2006), “Numerische Beschreibung des duktilen Versagenverhaltens von hochfesten Baustählen unter Berücksichtigung der Mikrostruktur“. Berichte aus dem Institut für Eisenhüttenkunde. Shaker Verlag, Aachen.
- [57] Ohata, M., Toyoda, M., (2004), “Damage Concept for Evaluating Ductile Cracking of Steel Structure subjected to Large-Scale Cyclic Straining”, Science and Technology of Advanced Materials, Vol. 5, pp. 241–249.
- [58] Kuwamura H., (1998), “Fracture of steel during an earthquake-state-of-the-art in Japan”, Engineering structures Vol. 20, No. 4-6, pp.310-322.
- [59] Mazzolani F., (2000), “Influence of strain rate, Moment resistant connections of steel frames in seismic areas; Design and reliability”, London, E&FN Spon, pp.167-178.
- [60] El Hassouni A., Plumier A., Cherrabi A., (2011), “Experimental and numerical analysis of the strain-rate effect on fully welded connections”, Journal of Constructional steel research, Vol. 67, pp. 533-546.
- [61] Kato B., (1997), “Kobe earthquake damage to steel moment connections and suggested improvement”, Japanese Society of Steel Construction, Technical report No.39, Tokyo.
- [62] Paret T., (2000), “The W1 issue: Extent of weld fracturing during Northridge earthquake”, Journal of Structural Engineering, Vol. 126, No. 1, pp. 10-18.
- [63] Kim J., Oh Y., Hwang I., Kim D., Kim J., (2001), “Fracture behavior of heat-affected zone in low alloy steels”, Journal of Nuclear Materials, Vol. 299 pp. 132-139.
- [64] An G., Ohata M., Toyoda M., (2003), “Effect of strength mis-match and dynamic loading on ductile fracture initiation”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 70, pp. 1359-1377.
- [65] Διαμαντούδης Θ., (2000), “Συγκολλήσεις μετάλλων”, Θεσσαλονίκη.
- [66] Pratt, J. L., (1989) "Introduction to the Welding of Structural Steelwork", Steel Construction Institute.
- [67] Goto M., (1994), “Statistical investigation of the behaviour of small cracks and fatigue life in carbon steels with different ferrite grain sizes”, Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., Vol. 17, No. 6, pp. 635-649.
- [68] Signes E., Baker R., Harrison H., Buderkin F., (1967), “Factors affecting the fatigue strength of welded high strength steels”, Br. Weld J., Vol. 14, pp. 108-116.
- [69] Otegui J., Kerr H., Burns D., Mohaupt U., (1989), “ Fatigue crack initiation from defects at weld toes in steel”, Int. J. Pres. Ves. & Piping, Vol. 38, pp. 385-417.

- [70] Otegui J., (1988), “Fatigue crack initiation and coalescence in welded joints in steel”, PhD thesis, Mech. Enf., University of Waterloo, Canada.
- [71] American Society for Testing and Materials-ASTM E 1820-“Standard test method for measurements of fracture toughness”.
- [72] American Society for Testing and Materials-ASTM E23-07 —”Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials”.
- [73] ESIS P2-92, (1999), “Procedure for determining the fracture behaviour of materials”, European Structural Integrity Society, Delft, The Netherlands.
- [74] American Society for Testing and Materials-ASTM E 112, “Standard test methods for determining average grain size”.
- [75] Panontin T. L., Sheppard S. D., (1995), “The relationship between constraint and ductile fracture initiation as defined by micromechanical analyses,” *Fracture Mechanics: 26th Volume*. ASTM STP 1256.
- [76] Ritchie R.O., Server W.L., Wullarert R.A. (1979), “Critical Fracture Stress and Fracture Strain Models for the Prediction of Lower and Upper Shelf Toughness in Nuclear Pressure Vessel Steels,” *Metallurgical Transactions*, Vol. 10A, pp. 1557- 1570.
- [77] Chi W., Deierlein G.G., Ingraffea A.R. (1998), “Fracture Analyses of Welded Beam-Column Connections,” *Fatigue and Fracture Mechanics: 30th Volume*, ASTM STP 1360, ASTM.
- [78] Kanvinde A, Deierlein G.G, (2006), “A cyclic void growth model to assess ductile fracture initiation in structural steels due to ultra low cycle fatigue” *Journal engineering mechanics* Volume 133(6), pp. 701-712.
- [79] Hancock J. W., Mackenzie A. C., (1976), “On the mechanics of ductile failure in high-strength steel subjected to multi-axial stress-states,” *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 24, pp. 147-169.
- [78] Vamvatsikos D., Cornell C.A., (2002), “Incremental Dynamic Analysis”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, No. 3, pp. 491–514.
- [79] Vayas, I., Sophocleous, A., Dinu, F.: *Fatigue Analysis of Moment Resisting Steel Frames*, *J. of Earthquake Engineering*, Vol. 7, No. 4, 2003, pp. 635-654.
- [80] Matsuiski M., Endo, T., (1969), “Fatigue of metals subjected to varying stress”, *Japan Soc. Mech. Engineering*.
- [81] Downing, S.D., Socie D. F., (1982), “Simple rainflow counting algorithms”, *International Journal of Fatigue*, Vol. 4, Is. 1, January, pp. 31-40.
- [82] British Standards Institution -BS 5400-10:1980 Steel, concrete and composite bridges, Code of practice for fatigue.
- [83] ECCS, (1986), “Recommended testing procedure for assessing the behavior of structural steel elements under cyclic loading”, Technical Committee 1: Structural Safety and Loadings, Technical working group 1.3: Seismic design.
- [84] Spiliopoulos, A., Karlos, V., Vayas, I., (2008), “Inelastic deformation requirements for steel buildings subjected to seismic loading”, *Eurosteel conference 2008, Graz, Proceedings*.
- [85] Feldmann, M., Schaefer, D., Eichler, B., Vayas, I., Karlos, V., Spiliopoulos, A., (2009), “An upper shelf criterion for choice of steel based on damage mechanics”, *IABSE conference 2009, Proceedings*.

- [86] Prager W., (1956), “A new method of analyzing stresses and strains in work-hardening plastic solids”, J. App. Mech., Vol. 23pp. 493-496.
- [87] Bauschinger J., (1881), “Changes of the elastic limit and the modulus of elasticity on various metals”, Zivilingenieur, 27, 289-348.
- [88] Suresh S., (1991), “Fatigue of materials”, Cambridge university press, pp. 73-76.
- [89] Ziegler H., (1959), “A modification of Prager's hardening rule”, Quarterly of Applied Mathematics, Vol.17, p.55.
- [90] von Mises R., (1913), “*Mechanik der festen Körper im plastisch deformablen Zustand*“. Göttin. Nachr. Math. Phys., Vol. 1, pp. 582–592.
- [91] ABAQUS, (2008). User’s manual, Version 6.8 Providence, RI: ABAQUS Inc.
- [92] Gurson A.L., (1977). “Continuum Theory of ductile rupture by void nucleation and growth – Part I. Yield criteria and flow rules for porous ductile media”, J. Engrg. Mat. Tech. Vol. 99, pp. 2–15.
- [93] Tvergaard V., (1981), “Influence of Voids on Shear Band Instabilities under Plane Strain Conditions”, Int. J. Fract. Vol. 17, pp. 389-407.
- [94] Tvergaard V., (1982), “On Localization in Ductile Materials Containing Spherical Voids”, Int. J. Fract. Vol. 18, pp.237-252.
- [95] Tvergaard V., Needleman A., (1984), “Analysis of cupcone fracture in a round tensile bar”, Acta Metallurgica, Vol. 32, pp.157–169.
- [96] Needleman, A., Tvergaard, V., (1984), “An Analysis of Ductile Rupture in Notched Bars”, J. Mech. Phys. Solids Vol. 32, pp.2-15.
- [97] Swart, A.E., Karamanos, S.A., Scarpas, A, Blaauwendraad, (2010), “Finite element analysis of damage in pipeline bends” In: Heron, Vol. 55, No. 1, pp. 33 - 55.
- [98] Leblond J. B., Perrin G., Devaux J., (1995), “An improved Gurson-type model for hardenable ductile metals”, European Journal of Mechanics and Solids, Vol. 14, No. 4, pp. 499-527.
- [99] Lemaitre J., (1971), “Evaluation of dissipation and damage in metals subjected to dynamic loading”, Proc. ICM I. Kyoto, Japan.
- [100] Lemaitre J., Dufailly J., (1987), “Damage measurements”, Engineering fracture mechanics, Vol 28, No. 5/6, pp.643-661.
- [101] Lemaitre J., (1984), “How to use damage mechanics”, Nuclear engineering and design, Vol. 80, pp.233-245.
- [102] Bonora N., (1997), “A nonlinear CDM model for ductile failure”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 58, No.1-2, pp. 11-28.
- [103] Bonora N., Gentile D., Iacoviello F., (1996), “Triaxiality and ductile rupture in round notched tensile bar”, Proceedings of 12th Italian Group of Fracture National meeting.
- [104] Kanvinde A. M., (2004), “Micromechanical simulation of earthquake-induced fracture in steel structures”, Doctoral thesis, Stanford university.
- [105] Deierlein G. G., Chi W., Kanvinde A. M., (2006), “Prediction of ductile fracture in steel connections using the SMCS criterion”, Journal of Structural engineering, Vol. 132, pp. 171-181.
- [106] Rice J. R., Tracey D. M., (1969), “On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields”, Journal of mechanics physics solids, Vol. 17, No.3, pp. 201-217.

- [107] Mc Clintock F. A., (1968), “Local criteria for ductile fracture”, International journal of fracture, Vol. 4, No.2, pp. 101-130.
- [108] Fell B. V., Kanvinde A. M., Deierlein G. G., Myers A. T., (2009), “Experimental Investigation of Inelastic Cyclic buckling and fracture of steel braces”, Journal of structural engineering, Vol. 135, No. 1, pp.19-32.
- [109] Myers A. T., (2009), “Testing and probabilistic simulation of ductile fracture initiation in structural steel components and weldments”, Doctoral thesis, Stanford University.
- [110] Achenbach U.-J., (1999), “Einfluss des Gefüges auf die Schädigung von Stählen”, Berichte aus dem Institut für Eisenhüttenkunde, Shaker Verlag, Band Vol. 7.
- [111] Münstermann, S., (2006), “Numerische Beschreibung des duktilen Versagensverhaltens von hochfesten Baustählen unter Berücksichtigung der Mikrostruktur”, Berichte aus dem Institut für Eisenhüttenkunde IEHK – RWTH Aachen, Band 4/2006 Shaker Verlag.
- [112] European committee for standardization (CEN), Eurocode 0: Basis of structural design- “Annex Design assisted by testing”.
- [113] Palmgren A., (1924), “Die Lebensdauer von Kugellagern”, Z. Ver. Deutsch, Ing.68, pp.339.
- [114] Miner M., (1945), “Cumulative Damage in Fatigue”, Trans. ASME, Journal of Applied Mechanics, Vol. 67, pp. A159-A164.
- [115] Manson S.S., Hirschberg M.H., (1964), “Fatigue: an interdisciplinary approach”, Syracuse University Press, Syracuse, pp. 133.
- [116] Coffin L.F., Tavernelli J.F., (1959,) “The cyclic straining and fatigue of metals”, Trans Metall Soc. A I M E pp. 215-794.
- [117] Wöhler, A., (1870), „Über die Festigkeitsversuche mit Eisen und Stahl“, Zeitschrift für Bauwesen, Vol. 20, pp. 73-106.
- [118] Bannantine J., Comer J., Handrock J., (1989), “Fundamentals of metal fatigue analysis”, Prentice Hall.
- [119] Krawinkler H., Zohrei M., (1983), “Cumulative damage model in steel structures subjected to earthquake ground motion“, Computers and structures, Vol. 16, No. 1-4, pp.531-541.
- [120] Ballio G., Castiglioni C. A., (1995), “A unified approach for the design of steel structures under low and high cycle fatigue”, Journal of constructional steel research, Vol. 34, pp.75-101.
- [121] Feldmann, M., (1994), “Zur Rotationskapazität von I-Profilen statisch und dynamisch belasteter Träger”, Stahlbau RWTH Aachen, Dissertation. 1994.
- [122] Sedlacek G., Feldmann M., Weynand K., (1995), “Safety consideration of Annex J of Eurocode 3”, Proc. Of 3rd International Workshop on Connections in Steel Structures, Trento, pp.453-462.
- [123] Bernuzzi C., Calado L., Castiglioni C., (1997), “Ductility and load carrying capacity prediction of steel beam-to-column connections under cyclic reversal loading”, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 1, No. 2, pp.401-432.
- [124] Bernuzzi C., Calado L., Castiglioni C., (2000), “Low-cycle fatigue of structural steel components: a method for re-analysis of test data and a design approach based on ductility”, Journal of Earthquake Technology, Vol. 37, No. 4, pp. 47-63.

- [125] American Institute of Steel Construction, (2005), "Specification for structural steel buildings", Chicago, Illinois, pp.92.
- [126] Ricles J.M., Mao C., Lu L-W, Fischer J.W., (2003), "Ductile details for welded unreinforced moment connections subject to inelastic cyclic loading", Engineering Structures.
- [127] Uniform building code (UBC), (1988), Los Angeles etc. International Conference of Building Officials. Whittier, California: ICBO, 1988.
- [128] SAC Joint Venture, FEMA 267 (1995). "Interim guidelines: Evaluation, Repair, Modification and Design of welded steel moment frame structures", SAC Report 95-02, Sacramento, California.
- [129] Nakashima M., Bruneau M., (1995), "Preliminary reconnaissance report of the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake", The Architectural Institute of Japan.
- [130] American Institute of Steel Construction, (1994), Proceedings AISC Special Task Committee on the Northridge earthquake, Los Angeles, 14-15 March, Chicago: American Institute of Steel Construction Inc.
- [131] American Welding Society, (1996), 'Structural Welding Code: ANSI/ANS D1.1-96,' Miami, Florida.
- [132] Whittaker A. S., Gilani A., Bertero V. V., (1998), "Evaluation of pre-Northridge steel moment resisting frame joints," The Structural Design of Tall Buildings, Vol.7, No.4, pp. 263-284, John Wiley.
- [133] Popov E. P., Blondet, M., (1996) "Behaviour of large steel beam-column connections", Pmc. 11th WCEE, World Conf. Earthq. Engrg., Acapulco, Mexico, August, Elsevier Science Ltd., Paper No. 166.
- [134] Uang C. M., Bondad, D. M., (1996), "Dynamic testing of full-scale steel moment connections", Pmc. 11th WCEE, World Conf. Earthq. Engrg., Acapulco, Mexico, August, Elsevier Science Ltd., Paper No. 407.
- [135] Engelhardt M.D., Sabol T.A., Aboutaha R.S., Frank K.H., (1995), "An overview of the AISC Northridge moment connection test program", Proceedings 1995 National Steel Construction Conference, San Antonio, 17-19 May 1995. Chicago: American Institute of Steel Construction Inc.
- [136] Kaufmann E., Fischer J., Di Julio R., Gross J., (1997), "Failure analysis of welded steel moment frames damaged in the Northridge earthquake", Building and Fire research laboratory, National institute of standards and technology, Gaithersburg.
- [137] Xue M., Kaufmann E., Lu L., Fischer J., (1996), "Achieving ductile behavior of moment connections", Modern steel construction.
- [138] Yang T., Popov E.P., "Behavior of pre-Northridge moment resisting steel connections", Report No UCBIERC- 95/08. Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley. 1995.
- [139] FEMA, (1999), "Seismic design criteria for new moment-resisting steel frame construction", Federal Emergency Management Agency Washington D.C..
- [140] Bai Y., Wierzbicki T., (2008), "A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence", International Journal of Plasticity, Vol. 24, pp. 1071–1096.