



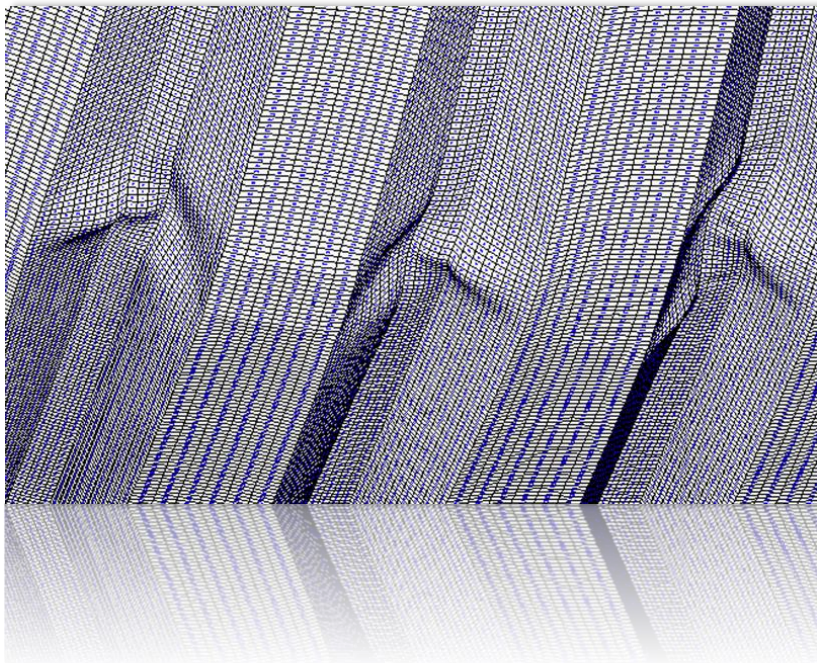
**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**
UNIVERSITY
OF THESSALY

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Διπλωματική Εργασία

**ΜΗ-ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΟΥΣ ΦΥΛΛΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ**

ΙΩΑΝΝΗΣ ΠΑΣΠΑΛΑΣ



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

ΒΟΛΟΣ 2022

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Ευριπίδης Μυστακίδης
Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Ολυμπία Παναγούλη
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Λάμπρος Κούτας
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή και Πρόεδρο του τμήματος κ. Ευριπίδη Μυστακίδη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητές κα. Ολυμπία Παναγούλη και κ. Λάμπρο Κούτα για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Οφείλω ευχαριστίες στην Καθηγήτρια κα. Δάφνη Παντούσα μεταδιδακτορική ερευνήτρια του Πανεπιστημίου Πατρών, για την πολύτιμη βοήθεια της στο κομμάτι των αναλύσεων, αλλά και την ηθική της υποστήριξη. Επίσης, ευχαριστώ τους ανθρώπους που ήταν δίπλα μου για την κατανόησή τους, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια των τελευταίων μηνών της προσπάθειάς μου. Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Μιχαήλ Πασπαλά και Κατερίνα Κοσμά για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τον συν-επιβλέποντα καθηγητή και δάσκαλο μου Κωνσταντίνο Τζάρο, για όλες τις γνώσεις που μου μετέδωσε κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, αλλά και για το πάθος που μου γέννησε στο κομμάτι της έρευνας ενός σύγχρονου μηχανικού. Αφιερώνω αυτή την εργασία σε αυτούς που έφυγαν άδικα.

Ιωάννης Πασπαλάς

ΜΗ-ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΟΥΣ ΦΥΛΛΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Ιωάννης Πασπαλάς

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2022

Επιβλέπων Καθηγητής: Ευριπίδης Μυστακίδης, Καθηγητής

Περίληψη

Οι μεταλλικές κατασκευές αποτελούν εκείνο το είδος κατασκευών, οι οποίες έρχονται να αντικαταστήσουν την εκτεταμένη χρήση οπλισμένου σκυροδέματος τόσο παγκοσμίως, όσο και στην Ελλάδα κατά τα τελευταία χρόνια. Το μέγεθός τους αυξάνεται ολοένα και περισσότερο, ενώ παράλληλα τα στατικά τους συστήματα γίνονται όλο και πιο τολμηρά. Επιπλέον μειώνονται οι διαστάσεις των δομικών στοιχείων και των διατομών, με αποτέλεσμα την απαίτηση ελέγχων ευστάθειας κατά την διαστασιολόγηση. Υπ' αυτή την έννοια, ο σχεδιασμός των μεταλλικών κατασκευών αποκτά όλο και μεγαλύτερη σπουδαιότητα για τον μηχανικό.

Η παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματεύεται την μελέτη της καμπτικής συμπεριφοράς τραπεζοειδών φύλλων αλουμινίου, τα οποία αποτελούν κέλυφος σε μεταλλικά βιομηχανικά κτήρια. Αρχικά, γίνεται παράθεση των ιδιοτήτων του αλουμινίου και των κραμάτων που προέρχονται από αυτό. Ύστερα, παρουσιάζονται τα πειράματα κάμψης τριών σημείων, που διενεργήθηκαν στο εργαστήριο τεχνολογίας και κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, σε τραπεζοειδή φύλλα αλουμινίου. Ακολουθεί ο σχολιασμός της συμπεριφοράς και του τρόπου αστοχίας λόγω φαινομένων αστάθειας. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκε, με σκοπό να προσομοιωθούν τα φαινόμενα που αναπτύσσονται. Η μοντελοποίηση του φορέα, έγινε με χρήση του προηγμένου κώδικα πεπερασμένων στοιχείων MSC Software Marc. Με σκοπό την ρεαλιστική προσομοίωση της συμπεριφοράς, πραγματοποιήθηκαν μη-γραμμικές αναλύσεις και έγινε εισαγωγή γεωμετρικών ατελειών. Αφότου εξήχθησαν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα, μετά από μία πληθώρα προσπαθειών, έγινε η τελική σύγκριση με τα πειραματικά.

Η σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων έδειξε πως ενώ η δυσκαμψία του φορέα προβλέπεται σωστά από το αριθμητικό μοντέλο, παρατηρούμε αποκλίσεις όταν η συμπεριφορά γίνεται μη γραμμική. Οι αποκλίσεις αυτές αποδίδονται στην αβεβαιότητα συνθηκών στήριξης κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων και την ανομοιοότητα του πραγματικού υλικού, σε σχέση με αυτό που χρησιμοποιείται θεωρητικά σύμφωνα με τα πρότυπα.

Λέξεις Κλειδιά: Φύλλα και Κράματα Αλουμινίου, Τοπικός Λυγισμός, Ευστάθεια-Αστάθεια, Αστοχία, Κάμψη, Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων.

NON-LINEAR COMPUTATIONAL INVESTIGATION OF THE BENDING BEHAVIOR OF TRAPEZOIDAL ALUMINUM SHEET

Ioannis Paspalas

University of Thessaly, Department of Civil Engineering, 2022

Supervisor: Euripidis Mistakidis, Professor

Abstract

Metal structures are gaining momentum worldwide against concrete structures, due to their flexibility and the fast construction. Their size is continuously growing, while at the same time their static systems become more challenging. In addition, the dimensions of structural elements and cross-sections are reduced, resulting in the requirement for stability controls during design. In this respect, the design of metal structures is an important aspect for the engineers.

The present thesis studies the flexural behavior of trapezoidal aluminum sheets, which are used as shell in metallic industrial buildings. Initially, the material properties of aluminum and its alloys are presented. The study is based on the 3-point bending flexural tests of trapezoidal aluminum sheets, that have been conducted in the laboratory of technology and reinforced concrete structures of Department of Civil Engineering of University of Thessaly. The results of the tests are used to evaluate their behavior and the non-linear phenomena that appear. The behavior of the trapezoidal aluminum sheets is simulated numerically. For this purpose, a detailed numerical model was developed using the advanced finite element software MSC Marc. Aiming to the realistic simulation of the behavior, non-linear analyses were carried out and geometric imperfections were introduced. The numerical results were compared with the experimental data. Several numerical techniques were used for the accurate simulation of the tests.

The comparison of numerical and experimental results showed that while the stiffness of the structural system is correctly predicted by the numerical model, deviations are observed when the behavior becomes non-linear. These deviations are attributed to conduct phenomena at the support and to the dissimilarity of the real material in relation to the one which is theoretically used according to the standards.

Keywords: *Aluminum Sheets and Alloys, Local Buckling, Stability-Instability, Failure, Bending, F.E.A.*

Πίνακας Περιεχομένων

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	ΚΙΝΗΤΡΟ ΚΑΙ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	1
1.2	ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	1
1.3	ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	2
2	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	3
2.1	ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	3
2.2	ΓΕΝΙΚΑ	4
2.3	ΧΡΗΣΕΙΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΣΗΜΕΡΑ	7
2.4	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	8
2.4.1	Bayer Process	8
2.4.2	Hall- Héroult Process	11
2.5	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	12
2.5.1	Φυσικές	12
2.5.2	Μηχανικές	14
2.6	ΚΡΑΤΥΝΣΗ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	15
2.6.1	Κράτυνση Καθαρού Αλουμινίου	15
2.6.2	Κράτυνση Κραμάτων Αλουμινίου	16
2.6.3	Ενδοτράχυνση (work Hardening)	17
2.6.4	Τελειωτική Σκλήρυνση (Precipitation Hardening)	18
2.7	ΚΡΑΜΑ ΓΕΝΙΚΑ	18
2.7.1	Κράματα Αλουμινίου	19
2.7.2	Κράματα Διαμόρφωσης (Wrought Alloys)	19
2.7.3	Κράματα Χύτευσης (Casting Alloys)	22
2.8	ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ	24
2.8.1	Κράμα Αλουμινίου EN AW-3005 (AlMn1Mg0.5 H28)	30
3	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	32
3.1	ΦΥΣΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ	32
4	ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ	35
4.1	ΛΥΓΙΣΜΟΣ	35
4.1.1	Θεμελιώδης Ορισμοί	35
4.1.2	Ευστάθεια	35
4.1.3	Αστάθεια	37

4.1.4	Φορτίο Λυγισμού.....	39
4.1.5	Μέγιστο Φορτίο.....	40
4.1.6	Λυγισμός Πλακιδίων	41
4.1.6.1	Θεμελιώδης Εξισώσεις.....	43
4.1.6.2	Λυγισμός Απλώς Εδραζόμενου Πλακιδίου	45
4.1.6.3	Επίδραση Συνοριακών Συνθηκών	48
4.1.6.4	Μέγιστη Αντοχή Πλακιδίων	50
4.1.6.5	Επίδραση Αρχικών Ατελειών.....	52
5	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	54
5.1	ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ.....	54
5.1.1	Γενική περιγραφή δοκιμιών	54
5.1.2	Πειραματική διαταξη και πρωτοκόλλο δοκιμιών	54
5.2	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΝ EC 9.....	56
5.2.1	Γενικά.....	56
5.2.2	Αντοχές Διατομής Τραπεζοειδούς Φύλλου Αλουμινίου ELT 39 896 έναντι καμπτικών ροπών (Bending Moment cross-section resistance).....	57
5.2.2.1	Ροπή Αντοχής Έναντι Θετικής Κάμψης.....	57
5.2.2.2	Ροπή Αντοχής Έναντι Αρνητικής Ροπής Κάμψης	61
5.2.2.3	Αντοχή Διατομής Τραπεζοειδούς Φύλλου Αλουμινίου EL 39 896 Έναντι Κατακόρυφων Διατμητικών Δυνάμεων	65
5.2.2.4	Αντοχή Διατομής Τραπεζοειδούς Φύλλου Αλουμινίου EL T 39 896 Έναντι Εγκάρσιων Συγκεντρωμένων Κατακόρυφων Διατμητικών Δυνάμεων (Shear cross-section resistance to local transverse forces).....	66
5.2.2.5	Σύνοψη αποτελεσμάτων-Αντοχές διατομής τραπεζοειδούς φύλλου αλουμινίου EL T 39 896.....	68
5.3	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΡΙΑΚΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΥΝΕΧΩΝ ΠΛΑΚΩΝ ΑΠΟ ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΕΣ ΦΥΛΛΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ EL T 39 896.....	69
5.4	ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	77
5.4.1	Δημιουργία Μοντέλου Προσομοίωσης.....	78
5.4.2	Συνοριακές Συνθήκες.....	81
5.4.3	Ιδιότητες Υλικού.....	84
5.4.4	Είδη αναλύσεων	84
6	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	89
6.1	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	89
6.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΜΕΣΩ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	92
6.3	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΕΛΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	95
6.4	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	101
7	ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	104
8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	107
8.1	ΞΕΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	107

8.2	ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	109
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	110
	ΠΗΓΕΣ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ.....	110

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Σύστημα ονοματολογίας κραμάτων διαμόρφωσης και χαρακτηριστικά.....	20
Πίνακας 2.2: Μέθοδοι ενίσχυσης της σκληρότητας των κραμάτων.	24
Πίνακας 4.1:	47
Πίνακας 4.2:	48
Πίνακας 5.1: Γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά τραπεζοειδούς φύλλου αλουμινίου EL T 39 896 για πλήρη διατομή πλάτους 1m.	56
Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικές τιμές αλουμινίου σύμφωνα με τον Ευρωκώδικά 9-Μέρος 1.4 (EN 1999.01.04).	56
Πίνακας 5.3: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά.....	68
Πίνακας 5.4: Αντοχή σε κάμψη, διάτμηση και στροφή.....	68
Πίνακας 5.5: Αμφιέριστες πλακολωρίδες.	74
Πίνακας 5.6: Πλακολωρίδες συνεχούς δοκού δύο ίσων ανοιγμάτων.	75
Πίνακας 5.7: Πλακολωρίδες συνεχούς δοκού τριών ίσων ανοιγμάτων.	76
Πίνακας 6.1:Συγκέντρωση αποτελεσμάτων.	89

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Αλουμίνιο κατά την εξόρυξη του με την μορφή βωξίτη.	5
Σχήμα 2.2: Αλουμίνιο στην καθαρή του μορφή.	6
Σχήμα 2.3: Τμήματα αεροσκάφους κατασκευασμένα από κράματα αλουμινίου (οι αριθμοί με μπλε γραμματοσειρά υποδηλώνουν κράματα αλουμινίου).	7
Σχήμα 2.4: Διαδικασία παραγωγής αλουμινίου (Al) μέσω της μεθόδου Bayer.	9
Σχήμα 2.5: Τομή βιομηχανικής κυψέλης ανοδίων Hall- Héroult.	11
Σχήμα 2.6: Φαινόμενο κράτυνσης ως συνάρτηση της περιεκτικότητας του κάθε στοιχείου κράματος.	16
Σχήμα 2.7: Αντοχή συνάρτησή του χρόνου σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και σε ανεβασμένη θερμοκρασία.	17
Σχήμα 2.8: Η αντοχή του βαθμού ψυχρής κατεργασίας σε συνάρτηση με την θερμοκρασία.	17
Σχήμα 2.9: Πλίνθωμα (ingot) καθαρού αλουμινίου.	22
Σχήμα 2.10: Επίδραση ψυχρής έλασης στην αντοχή διαρροής.	26
Σχήμα 2.11: Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων (stress-strain) βάση του EN 1999-1-1 Annex E, E2.2.2.	31
Σχήμα 3.1: Φύλλο αλουμινίου υπό συγκεντρωμένη φόρτιση (στιγμιότυπο από το εργαστήριο τεχνολογίας και κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος).	32
Σχήμα 3.2: Πρώτη εμφανή παραμόρφωση στο φορέα. Εμφάνιση τοπικού λυγισμού στα κεντρικά άνω πέλματα (στιγμιότυπο από το εργαστήριο τεχνολογίας και κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος).	33
Σχήμα 3.3: Κατάρρευση φορέα λόγω φαινομένων αστάθειας (τοπικός λυγισμός), (στιγμιότυπο από το εργαστήριο τεχνολογίας και κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος).	34
Σχήμα 4.1: Σφαίρα που ισορροπεί σε τμήμα κύκλου.	36
Σχήμα 4.2: Διάγραμμα φορτίου-βύθισης ράβδου υπό αξονική φόρτιση με και χωρίς διαταραχές.	37
Σχήμα 4.3: Αξονικά φορτιζόμενη ράβδος.	37
Σχήμα 4.4: Σφαίρα σε επισφαλή θέση ισορροπίας στο άνω μέρος τμήματος κύκλου.	38
Σχήμα 4.5: Σφαίρα με αρχικά ασφαλή θέση.	38
Σχήμα 4.6: Ράβδος στη νέα θέση ισορροπίας μετά το λυγισμό.	39

Σχήμα 4.7: Ποιητικό διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης ράβδου κατά τη διάρκεια αυξανόμενης φόρτισης με τη συμβολή διαταραχής. (Παρατηρούμε ότι η δυσκαμψία της ράβδου μειώνεται ραγδαία και σιγά σιγά αρχίζει να παραλαμβάνει ξανά φορτίο στη νέα θέση ισορροπίας). ...	40
Σχήμα 4.8: Γεωμετρία πλακιδίου, λόγος πλευρών a/b.	41
Σχήμα 4.9: Διατμητικές δυνάμεις πλακιδίου υπό συγκεντρωμένη φόρτιση.....	42
Σχήμα 4.10: Τμήμα πλακιδίου που υπόκειται σε δυνάμεις εντός του επιπέδου.	43
Σχήμα 4.11: Ροπές πλακιδίου υπό συγκεντρωμένη φόρτιση.	43
Σχήμα 4.12: Σχεδίαση του συντελεστή λυγισμού για απλώς εδραζόμενο πλακίδιο ως συνάρτηση του λόγου των πλευρών του πλακιδίου a/b και των διαφορετικών αριθμών κυμάτων.....	46
Σχήμα 4.13: Επίδραση συνοριακών συνθηκών στον συντελεστή λυγισμού ορθογώνιων πλακιδίων.	49
Σχήμα 4.14: Ανακατανομή των θλιπτικών τάσεων κατά μήκος του φορτισμένου άκρου και απλή προσέγγιση κατά von Karman.	50
Σχήμα 4.15: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για τέλει και ατελείς απλά υποστηριζόμενες πλάκες.	53
Σχήμα 5.1: Διατομή λαμαρίνας (στιγμιότυπο από το εργαστήριο τεχνολογίας και κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος).	54
Σχήμα 5.2: Πλαϊνή όψη πειραματικής διάταξης (στιγμιότυπο από το εργαστήριο τεχνολογίας και κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος).	55
Σχήμα 5.3: Βασική γεωμετρία πειραματικής διάταξης.	55
Σχήμα 5.4: Διατομή τραπεζοειδούς φύλλου αλουμινίου EL T 39 896.	56
Σχήμα 5.5: Διατομή υπολογισμού σε θετική ροπή κάμψης.	58
Σχήμα 5.6: Αρχική διατομή υπολογισμού σε αρνητική ροπή κάμψης.	62
Σχήμα 5.7: Διατομή με πλήρη κορμό και ενεργό θλιβόμενο κάτω πέλμα.	63
Σχήμα 5.8: Διατομή τραπεζοειδούς φύλλου αλουμινίου (όλες οι διαστάσεις είναι σε mm).	78
Σχήμα 5.9: Διάγραμμα σφάλματος ανάλογα με την πύκνωση του δικτύου πεπερασμένων στοιχείων.	79
Σχήμα 5.10: Τομή λεπτομερειών της τελικής διακριτοποίησης των στοιχείων κατά πλάτος.	80
Σχήμα 5.11: Τρισδιάστατη υπόσταση του τελικού μοντέλου προσομοίωσης.	80
Σχήμα 5.12: Προσομοίωση συνοριακών συνθηκών στήριξης.	81
Σχήμα 5.13: Προσομοίωση συνθηκών στήριξης πειραματικής διάταξης με χωρικά πεπερασμένα στοιχεία.....	82

Σχήμα 5.14: Προσομοίωση συνοριακής συνθήκης φόρτισης.....	82
Σχήμα 5.15: Μοντέλο προσομοίωσης με χωρικά πεπερασμένα στοιχεία και συνθήκες επαφής ...	83
Σχήμα 5.16: Πλάγιες όψεις θετικών ιδιομορφών (σε κλίμακα 50:1).....	87
Σχήμα 5.17: Τομές των αντίστοιχων ιδιομορφών (σε κλίμακα 50:1).....	88
Σχήμα 6.1: Διάγραμμα φορτίου-βύθισης πειραματικών δοκιμών.	90
Σχήμα 6.2: Αντιπροσωπευτικές εικόνες αστοχίας των δοκιμών μετά το πέρας των δοκιμών (στιγμιότυπα από το εργαστήριο τεχνολογίας και κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος).	91
Σχήμα 6.3: Καμπύλες φορτίου παραμόρφωσης σύμφωνα με το πλήθος των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν (αποτελέσματα από Marc Mentat).....	92
Σχήμα 6.4: Καμπύλες φορτίου-βύθισης σύμφωνα με τον τρόπο στήριξης του τραπεζοειδούς φύλλου αλουμινίου (αποτελέσματα από Marc Mentat).....	93
Σχήμα 6.5: Καμπύλες φορτίου βύθισης σύμφωνα με τον νόμο υλικού που χρησιμοποιήθηκε (αποτελέσματα από Marc Mentat).	93
Σχήμα 6.6: Διάγραμμα φορτίου-βύθισης γεωμετρικά τέλειου και ατελούς φορέα (αποτελέσματα από Marc Mentat).	94
Σχήμα 6.7: Καμπύλη φορτίου βύθισης μοντέλου χωρικών πεπερασμένων στοιχείων (αποτελέσματα από Marc Mentat).	95
Σχήμα 6.8: Ισοδύναμες τάσεις Von Misses στο βήμα 130 για βύθιση 130 mm (αποτελέσματα από Marc Mentat).	96
Σχήμα 6.9: Ισοδύναμες τάσεις Von Misses στο βήμα 147 για βύθιση 147 mm παρατηρούμε τον λυγισμό που αναπτύσσεται στις επόμενες πτυχώσεις (αποτελέσματα από Marc Mentat). ...	96
Σχήμα 6.10: Ισοδύναμες τάσεις Von Misses στο βήμα 180 για βύθιση 180 mm είναι εμφανές οι βλάβες του φορέα λόγω τοπικού λυγισμού σε όλες τις πτυχώσεις (αποτελέσματα από Marc Mentat).	97
Σχήμα 6.11: Πρώτες πλαστικές παραμορφώσεις που εμφανίστηκαν στις κεντρικές πτυχώσεις στο βήμα 60 για συνολική βύθιση 60 mm (αποτελέσματα από Marc Mentat).....	98
Σχήμα 6.12: Αρχικές ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις που εμφανίστηκαν στις δεύτερες συμμετρικές πτυχώσεις στο βήμα 150 για συνολική βύθιση 150 mm (αποτελέσματα από Marc Mentat).	98
Σχήμα 6.13: Πλαστικές παραμορφώσεις στο στάδιο κατάρρευσης του φορέα βήμα 180 (αποτελέσματα από Marc Mentat).	99

Σχήμα 6.14: Πλάγια όψη τελικής παραμορφωμένης κατάστασης του φορέα (αποτελέσματα από Marc Mentat).....	99
Σχήμα 6.15: Καμπύλες φορτίου βύθισης πειραματικών δοκιμίων και μοντέλου προσομοίωσης.	100
Σχήμα 6.16 Τελική εικόνα πειραματικού δοκιμίου και μοντέλου προσομοίωσης με εμφανή δείγματα τοπικού λυγισμού στα άνω πέλατα και τους κορμούς των πτυχώσεων συμμετρικά της φόρτισης (στιγμιότυπο από το εργαστήριο τεχνολογίας και κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος και αποτελέσματα από Marc Mentat).....	102
Σχήμα 6.17: Τελική όψη πειραματικού δοκιμίου και μοντέλου προσομοίωσης (σε σύγκριση με την απαραμόρφωτη κατάσταση) στα οποία είναι εμφανές το ανασήκωμα και η καμπυλότητα των άκρων (στιγμιότυπο από το εργαστήριο τεχνολογίας και κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος και αποτελέσματα από Marc Mentat).....	103

1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται πληροφορίες εισαγωγικού χαρακτήρα, που εξηγούν το κίνητρο και παρουσιάζουν το υπόβαθρο αυτής της διπλωματικής εργασίας. Επιπλέον γίνεται περιγραφή των βασικών ενοτήτων της.

1.1 Κίνητρο και υπόβαθρο

Το φαινόμενο του λυγισμού αντιμετωπίζεται ως πρόβλημα ευστάθειας και απασχολεί επί χρόνια τους μηχανικούς για τον σχεδιασμό και τη διαστασιολόγηση των μεταλλικών κατασκευών. Η αστάθεια συναντάται κυρίως σε γραμμικά και επιφανειακά μέλη κατασκευών τα οποία έχουν αυξημένο μήκος και έγκειται σε περεταίρω ελέγχους.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) και η ανάλυση μέσω αυτών (FEA) είναι ένα πανίσχυρο εργαλείο επίλυσης τέτοιων προβλημάτων αλλά και λεπτομερούς προσομοίωσης τους.

Η αγάπη μου στο μαθήματα των πεπερασμένων στοιχείων και της ελαστικής ευστάθειας, σε συνδυασμό με τη θέληση μου για μετέπειτα ενασχόληση στο κομμάτι των προσομοιώσεων αλλά και του ερευνητικού πνεύματος για σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά των αναλύσεων μέσω πεπερασμένων στοιχείων, με οδήγησαν στην επιλογή αυτής της μελέτης-έρευνας.

1.2 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της εργασίας, είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων από τις πειραματικές δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε φύλλα αλουμινίου διατομής EL T 39 896, με τα αποτελέσματα αναλύσεων μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο τεχνολογίας και κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας από τον

επίκουρο καθηγητή του τμήματος και μέλος του εργαστηρίου κ. Λάμπρο Κούτα, με σκοπό την χορήγηση πιστοποίησης στην εταιρία παραγωγής τους (ΕΛΑΣΤΡΟΝ ΑΕΒΕ).

1.3 Οργάνωση διπλωματικής εργασίας

Το υπόλοιπο αυτής της διπλωματικής εργασίας χωρίζεται σε έξι ενότητες που καταλαμβάνουν τα Κεφάλαια 2 - 7 αντίστοιχα. Συγκεκριμένα:

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η ιστορία του αλουμινίου, οι χρήσεις του σήμερα, οι μέθοδοι εξόρυξης και παραγωγής του και θεωρητικές πληροφορίες όσον αφορά το αλουμίνιο. Επιπλέον αναλύονται οι ιδιότητες του και πως αυτές επηρεάζονται μέσω των κραμάτων και της διαδικασίας μορφοποίησης τους.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται περιγραφή του προβλήματος που παρατηρείται.

Στο Κεφάλαιο 4 παρατίθεται η θεωρία της ευστάθειας και του λυγισμού των πλακιδίων.

Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφεται η πειραματική διάταξη, η πορεία των πειραμάτων. Επιπροσθέτως παρατίθεται η αναλυτική επίλυση βάση EC 9 και οι προσπάθειες προσομοίωσης του πειράματος μέσω πεπερασμένων.

Στο Κεφάλαιο 6 γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων του πέμπτου Κεφαλαίου και μεταξύ τους σύγκριση.

Τα τελικά συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 7.

2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν γενικές έννοιες, μέθοδοι εξεργασίας, τρόποι εξόρυξης και κράματα όσον αφορά το αλουμίνιο.

2.1 Ιστορική Αναδρομή

Η ανακάλυψη του αλουμινίου ανακοινώθηκε από τον Δανό Φυσικό και χημικό Hans Christian Ørsted (1777–1851) το 1835, όταν κατάφερε να το απομονώσει σε καθαρή μορφή. Ο Sir Humphrey Davy (1778–1829) είχε προηγουμένως αποτύχει στην προσπάθεια του αυτή, αλλά αυτός ήταν που ονόμασε το στοιχείο «αλουμίνιο».

Περίπου μισό αιώνα μετά την ανακοίνωση του, οδηγήθηκε στην μαζική παραγωγή λόγω της εκτεταμένης χρήσης του στη βιομηχανία και την καθημερινή ζωή. Μέχρι το 1886 χρησιμοποιήθηκε μια χημική διαδικασία για την απομόνωση του αλουμινίου, η οποία χρησιμοποιούσε κρυστάλλους κορουνδίου, που μετατράπηκαν χημικά σε χλωριούχο αλουμίνιο και στη συνέχεια ανήχθησαν με μεταλλικό νάτριο για να σχηματίσουν αλάτι και μεταλλικό αλουμίνιο. Από το 1825 έως το 1886, το αλουμίνιο χρησιμοποιήθηκε κυρίως για κοσμήματα και ως ακριβά επιτραπέζια σκεύη λόγω της δυσκολίας και του κόστους εξόρυξής του από το μετάλλεμά του. Κατά την κατασκευή του Μνημείου της Ουάσιγκτον, του ψηλότερου οικοδομήματος στον κόσμο εκείνης της περιόδου, χρειαζόταν ένα υλικό για να καλύψει τη δομή και να χρησιμεύσει ως αλεξικέραυνο. Μια πυραμίδα από χυτό αλουμίνιο κατασκευάστηκε από τον William Frishmuth το 1884 και τοποθετήθηκε στην κορυφή. Ήταν η μεγαλύτερη χύτευση αλουμινίου που κατασκευάστηκε ποτέ και ήταν η πρώτη αρχιτεκτονική εφαρμογή αυτού του μετάλλου. Το 1886, ο Charles Martin Hall (1863–1914) στις ΗΠΑ και ο Paul-Louis Toussaint Heroult (1863–1914) στη Γαλλία ανέπτυξαν ταυτόχρονα μια οικονομική ηλεκτροχημική μέθοδο απομόνωσης του αλουμινίου, η οποία τελικά οδήγησε στην ευρεία

χρήση του σε όλο τον κόσμο. Η εφεύρεσή τους αντικατέστησε τη διαδικασία χημικής αναγωγής και μείωσε το κόστος του μετάλλου κατά τριάντα φορές.

Η ευελιξία του αλουμινίου είχε ως αποτέλεσμα να αντικαταστήσει πολλά παλαιότερα, πιο καθιερωμένα υλικά και τώρα να καταναλώνεται σε ογκομετρική βάση, περισσότερο από όλα τα άλλα μη σιδηρούχα μέταλλα μαζί, συμπεριλαμβανομένου του χαλκού, του μόλυβδου και του ψευδαργύρου.

Στον πρώτο και στον δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, το αλουμίνιο ήταν ένας κρίσιμος στρατηγικός πόρος για την αεροπορία. Ακόμη και σήμερα χρησιμοποιείται στην κατασκευή αεροσκαφών και γενικότερα κελυφωτών κατασκευών.

Τον εικοστό αιώνα έγινε το πρώτο σε παραγωγή μη σιδηρούχο μέταλλο, ξεπερνώντας τον χαλκό. Τον εικοστό πρώτο αιώνα, το μεγαλύτερο μέρος του αλουμινίου καταναλώθηκε στις μεταφορές, τη μηχανική, τις κατασκευές και τη συσκευασία στις Ηνωμένες Πολιτείες, τη Δυτική Ευρώπη και την Ιαπωνία Starke Jr, E.A., (2005).

2.2 Γενικά

Το αλουμίνιο είναι το τρίτο πιο άφθονο στοιχείο στον φλοιό της γης, αλλά επειδή είναι ιδιαίτερα δραστήριο, δεν συναντάται του ελεύθερο στη φυσική του μορφή. Είναι το χημικό στοιχείο που βρίσκεται στην 3^η σειρά και στη 13^η στήλη του περιοδικού πίνακα, συνεπώς έχει 3 ελεύθερα ηλεκτρόνια, ατομικό αριθμό 13 και ανήκει στην ομάδα IIIA. Σύμφωνα με τον σύγχρονο συμβολισμό χημικών στοιχείων του Berzelius, συμβολίζεται με το σύμβολο Al. Χημικά, το αλουμίνιο είναι ένα ασθενές μέταλλο στην ομάδα του βορίου. Όπως συνηθίζεται για την ομάδα αυτή, το αλουμίνιο σχηματίζει ενώσεις κυρίως σε κατάσταση οξειδωσης +3. Το κατιόν αλουμινίου Al_3^+ είναι μικρό και πολύ φορτισμένο. Ως εκ τούτου, είναι πολωτικό και οι δεσμοί αλουμινίου τείνουν προς την ομοιοπολικότητα.

Το αλουμίνιο είναι μαλακό, μη μαγνητικό, ελαφρύ, όλκιμο, έχει καλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα και μπορεί να γίνει ισχυρό σε κράμα. Συγκεκριμένα έχει την ικανότητα να μεταφέρει διπλάσια ηλεκτρική ενέργεια από ότι ίση ποσότητα χαλκού κατά βάρος, καθιστώντας το ιδανικό για χρήση σε καλώδια ηλεκτρικής μετάδοσης. Το αλουμίνιο υψηλής θερμικής αγωγιμότητας μεταφέρει τη θερμότητα τρεις φορές καλύτερα από την σίδηρο, ωφελώντας τόσο τις εφαρμογές θέρμανσης όσο και ψύξης, δεν είναι επιρρεπές σε θραύση

υπό την επίδραση χαμηλών θερμοκρασιών και έχει υψηλότερη αντοχή και σκληρότητα σε χαμηλές θερμοκρασίες. Επιπλέον το αλουμίνιο είναι ένας εξαιρετικός ανακλαστήρας ακτινοβολίας, για αυτό και χρησιμοποιείται σε ανακλαστήρες θερμότητας, λαμπτήρες και ως μονωτικό. Έχει χαμηλή πυκνότητα ($2,7 \text{ g/cm}^3$) σε σύγκριση με αυτή του σιδήρου ($7,9 \text{ g/cm}^3$) λόγω της χαμηλής ατομικής του μάζας (27). Η ολκιμότητα και η μορφοποίηση του αλουμινίου οφείλονται στην υψηλή συμμετρία και τη θερμοδυναμική σταθερότητα του κυβικού κρυσταλλικού συστήματος (facecentered cubic lattice f.c.c.) και της κατάταξης των ενεργειακών του στοιβάδων στην καθαρή του μορφή.

Το αλουμίνιο έχει χαμηλό μέτρο ελαστικότητας E 70 GPa σε σύγκριση με τον σίδηρο που έχει 211 GPa, και χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό f_y 80 MPa, συγκριτικά με τα 300 MPa του σιδήρου. Ωστόσο, ο ειδικός συντελεστής του, δηλαδή ο συντελεστής διαιρούμενος με την πυκνότητα, είναι σχεδόν ίσος με αυτόν του σιδήρου, του τιτανίου και του μαγνησίου.



Σχήμα 2.1: Αλουμίνιο κατά την εξόρυξη του με την μορφή βωξίτη.

Πηγή: [HOBOTEC](#)

Μια πλεονεκτική χημική ιδιότητα του αλουμινίου είναι η αντιδραστικότητα του με το οξυγόνο, η οποία οδηγεί στο σχηματισμό ενός πυκνού στρώματος Al_2O_3 στην επιφάνεια, το οποίο προστατεύει το βασικό μέταλλο από περαιτέρω περιβαλλοντικές αλληλεπιδράσεις, εμποδίζοντας τη διάβρωση του σε βάθος.

Το καθαρό αλουμίνιο δεν χρησιμοποιείται στο εμπόριο λόγω της χαμηλής αντοχής του, αλλά αυτή η ιδιότητα μπορεί να βελτιωθεί με στοιχεία κράματος, τα οποία επιτρέπουν αλλαγές στις μηχανικές ιδιότητες του σύμφωνα με τη χρήση που προορίζεται. Μια σημαντική μεταλλουργική εξέλιξη σημειώθηκε το 1906 όταν ο Alfred Wilm (1869–1937) ανακάλυψε τη

διαδικασία «τελειωτικής σκλήρυνσης» στα κράματα αλουμινίου. Ο Wilm διεξήγαγε έρευνα με στόχο τη βελτίωση της αντοχής των κραμάτων αλουμινίου. Ήξερε ότι το αλουμίνιο θα μπορούσε να ενισχυθεί εάν οι σωστές συνθέσεις ψύχονταν αρκετά γρήγορα από υψηλές θερμοκρασίες, γι' αυτό, ακολουθώντας αυτή τη μέθοδο, θέρμανε μερικά κράματα αλουμινίου, που περιείχαν 3,5–5,5% κατά βάρος χαλκό και λιγότερο από 1% μαγνήσιο και μαγγάνιο, σε υψηλή θερμοκρασία και τα έψυξε με νερό. Προς απογοήτευσή του, πολλά από τα κράματα που δοκίμασε ήταν πιο μαλακά μετά την ψύξη από ότι πριν από τη θερμική επεξεργασία. Ωστόσο, μετά από λίγες μέρες διαπίστωσε ότι η σκληρότητα και οι ιδιότητες εφελκυσμού τους είχαν αυξηθεί σημαντικά. Ένα από τα κράματα, που ονομάζεται Duralumin, εξακολουθεί να χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα. Πολύ αργότερα, το 1919, οι Merica, Waltenberg και Scott εξήγησαν αυτό το φαινόμενο, το οποίο οφείλεται στη ομαδοποίηση νάνο-μεγέθους και στην καθίζηση ατόμων διαλυμένης ουσίας από το υπερκορεσμένο στερεό διάλυμα. Ωστόσο, αυτά τα νανομικροδομικά χαρακτηριστικά είναι πολύ μικρά για να φανούν με οπτικό μικροσκόπιο, έγιναν αντιληπτά μόνο από τις μελέτες περίθλασης ακτινών X των Guinier και Preston το 1938. Άμεση απόδειξη δεν ελήφθη παρά μόνο η ανάπτυξη της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας μετάδοσης το 1959 Το Duralumin είναι πιθανώς το πρώτο παράδειγμα νανοδομημένου υλικού που αναπτύχθηκε από τον άνθρωπο.

Τα κράματα αλουμινίου ταξινομούνται ως θερμικά επεξεργάσιμα και μη θερμικά επεξεργάσιμα, ανάλογα με το αν υφίστανται ή όχι σκλήρυνση με καθίζηση. Υπάρχουν επίσης δύο διαφορετικές μορφές μορφοποίησης των κραμάτων αλουμινίου, τα σφυρήλατα κράματα που έχουν υποστεί κατεργασία ή παραμόρφωση μετά τη χύτευση και τα χυτά κράματα, τα οποία λαμβάνουν το τελικό τους σχήμα όταν είναι ακόμη σε ρευστή μορφή. Τα



Σχήμα 2.2: Αλουμίνιο στην καθαρή του μορφή.

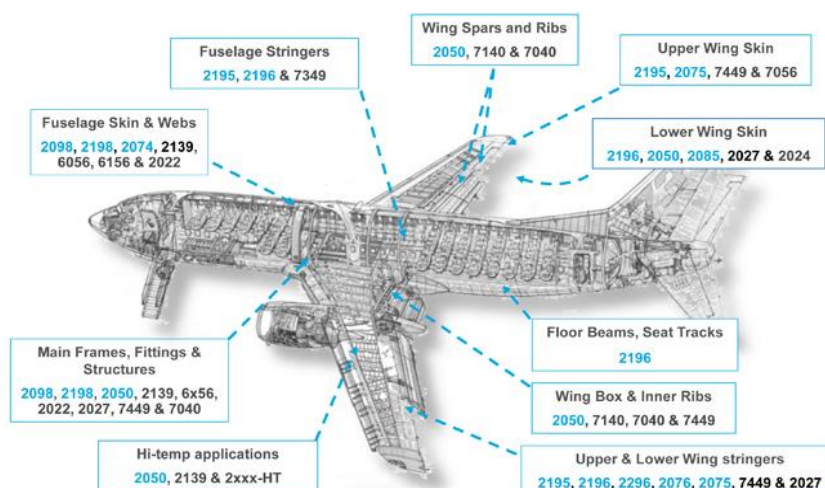
Πηγή: [Alumilblog](#)

σφυρήλατα κράματα αλουμινίου συνήθως χαρακτηρίζονται από ένα τετραψήφιο αριθμητικό σύστημα που αναπτύχθηκε από την Aluminium Association. Η ονοματολογία έχει πλέον γίνει αποδεκτή από τις περισσότερες χώρες και ονομάζεται Διεθνές Σύστημα Ονομασίας Κραμάτων (International Alloy Designation System IADS) Starke Jr, E.A., (2005).

2.3 Χρήσεις Αλουμινίου Σήμερα

Αν και το αλουμίνιο υπάρχει στην καθημερινότητα των ανθρώπων εδώ και χιλιάδες χρόνια, λόγω της ικανότητας του να συνδυάζει έναν οικολογικό χαρακτήρα με υψηλών προδιαγραφών μηχανικές ιδιότητες, οι χρήσεις του αυξάνονται συνεχώς αποτελώντας μέρος της καθημερινής μας ζωής προσφέροντας έτσι έξυπνες λύσεις στις ανάγκες μας.

Ο συνδυασμός υψηλής αντοχής και μικρού βάρους κάνει το αλουμίνιο ιδιαίτερα κατάλληλο σε μεταφορικά μέσα όπως πλοία, τρένα, αυτοκίνητα, αεροσκάφη, φορητά, καθώς και φορητές κατασκευές όπως σκάλες, σκαλωσιές και διάδρομοι. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην αεροναυπηγική, την αυτοκινητοβιομηχανία την ναυπηγική, ακόμη και στην κατασκευή ποδηλάτων. Η χρήση του σε οικοδομικά έργα αφορά νέες κατασκευές αλλά και περιπτώσεις ανακαίνισης ή συντήρησης παλαιών κτιρίων. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αρχιτεκτονικά συστήματα για πόρτες και παράθυρα, συστήματα υαλοπετασμάτων, συστήματα σκίασης, ρολά και περσίδες, γκαραζόπορτες, κάγκελα,



Σχήμα 2.3: Τμήματα αεροσκάφους κατασκευασμένα από κράματα αλουμινίου (οι αριθμοί με μπλε γραμματοσειρά υποδηλώνουν κράματα αλουμινίου).

Πηγή: aircraftaluminum.com

εξωτερικές επικαλύψεις κτιρίων, ψευδοροφές και δάπεδα. Λόγω του χαμηλού τους βάρους και της εξαιρετικής τους αντοχής, χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου το χαμηλό βάρος και οι καλές μηχανικές ιδιότητες σε χαμηλές θερμοκρασίες είναι ζητούμενα.

Επειδή το αλουμίνιο είναι μη τοξικό, χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία συσκευασίας τροφίμων και ποτών, καθώς και σε σωληνώσεις και δοχεία που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία τροφίμων και σε μαγειρικά σκεύη.

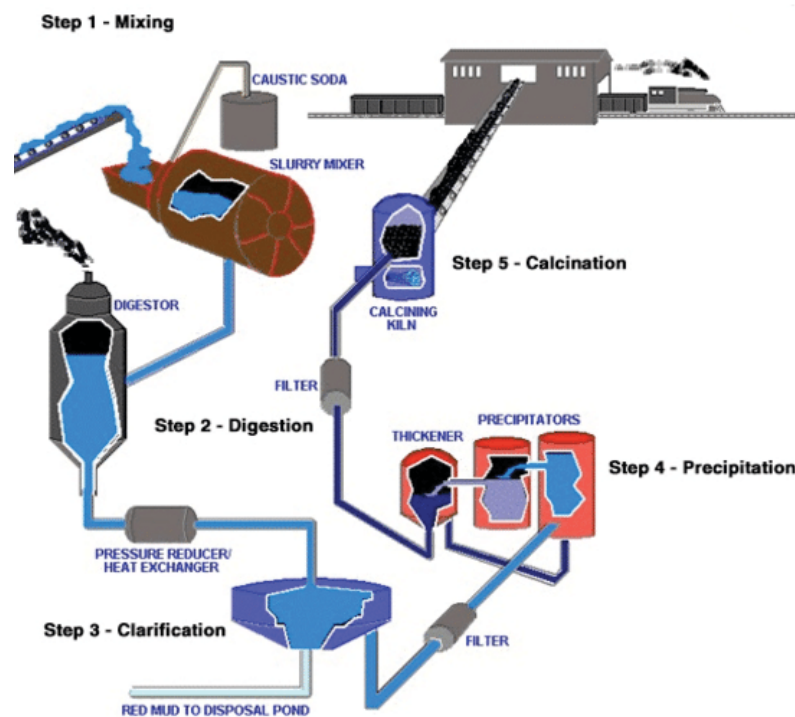
Γενικότερα οι χρήσεις του συναντώνται σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Παρατηρούμε ότι στις περισσότερες εφαρμογές έχει τον ρόλο κελύφους. Τα κελύφη προέρχονται από την επεξεργασία φύλλων αλουμινίου Starke Jr, E.A., (2005).

2.4 Διαδικασία Παρασκευής Αλουμινίου

2.4.1 BAYER PROCESS

Η διαδικασία Bayer (σχήμα 2.4) είναι το κύριο βιομηχανικό μέσο διύλισης βωξίτη για την παραγωγή αλουμίνης (οξείδιο του αλουμινίου) και αναπτύχθηκε από τον Karl Joseph Bayer, όταν ανακάλυψε ότι το ένυδρο αλουμίνιο μπορεί να καταβυθιστεί από το διοξείδιο του άνθρακα CO₂ σε αλκαλικό διάλυμα αργιλικού νατρίου. Το ένυδρο υλικό μπορούσε εύκολα να φιλτραριστεί, να πλυθεί και να στεγνώσει για να παραχθεί κρυσταλλική αλουμίνα υψηλής καθαρότητας (Al₂O₃). Ο βωξίτης είναι μέταλλευμα αλουμινίου το οποίο αποτελείται από οξείδια αλουμινίου κατά 60%, σίδηρο 25%, πυρίτιο 3% τιτάνιο 3% και άλλα χημικά στοιχεία σε μικρή περιεκτικότητα. Το οξείδιο του αλουμινίου πρέπει να καθαριστεί πριν μπορέσει να εξευγενιστεί σε μέταλλο αλουμινίου. Η διαδικασία παραγωγής αλουμινίου μέσω της μεθόδου Bayer process αποτελείται από πέντε στάδια. Πρώτο στάδιο είναι η σύνθλιψη και ανάμιξη του βωξίτη με διάλυμα καυστικού νατρίου. Το μέταλλευμα βωξίτη συνθλίβεται και κοσκινίζεται, στη συνέχεια αναμιγνύεται με ένα καυστικό αλκαλικό διάλυμα υγρού επεξεργασίας. Το υδροξείδιο του νατρίου, που συνήθως ονομάζεται καυστική σόδα και είναι η κύρια χημική ουσία, που χρησιμοποιείται στη διαδικασία για την εξαγωγή του οξειδίου του αργιλίου από τον βωξίτη. Με την χρήση αποθεμάτων βωξιτών και με την ανάμειξη βωξιτών από διαφορετικές πηγές, διασφαλίζεται ομοιομορφία στην τροφοδοσία βωξίτη. Τα κύρια στάδια είναι οι τυπικές ετερογενείς χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται, η ταχύτητα και απόδοση των οποίων εξαρτάται από το μέγεθος της

διεπιφάνειας του ρευστού. Το πρώτο χημικό στάδιο της κατεργασίας είναι η διάσπαση όλου του περιεχομένου σε αυτόν Al_2O_3 σε ισχυρά αλκαλικό διάλυμα NaOH . Στόχος αυτής της διάσπασης είναι η λήψη ενός διαλύματος με την μέγιστη δυνατή περιεκτικότητα σε αλουμίνιο, αφήνοντας το μικρότερο δυνατό ενεργειακό αποτύπωμα. Επόμενο στάδιο της μεθόδου είναι η χώνευση. Σε αυτό το στάδιο το πολτοποιημένο μέταλλευμα βωξίτη κατευθύνεται σε χωνευτές, όπου θερμαίνεται από 145°C έως 250°C και τα ορυκτά που περιέχουν αλουμίνιο στον βωξίτη (γιββσίτη, μποιημίτη) διαλυτοποιούνται επιλεκτικά και εκχυλίζονται ως αργλικό νάτριο ($\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_3$). Τρίτο στάδιο της διαδικασίας είναι η διαύγαση. Το στάδιο αυτό αποσκοπεί στη διάσπαση του αργλικού διαλύματος με την μέγιστη δυνατή απόδοση ανά μονάδα όγκου. Το αδιάλυτο υπόλειμμα βωξίτη πρέπει να διαχωριστεί από το υγρό που περιέχει αργλικό νάτριο με μια διαδικασία γνωστή ως καθίζηση. Το διάλυμα ψύχεται και τα σωματίδια χονδροειδούς άμμου άνω των $100\ \mu\text{m}$ απομακρύνονται σε δεξαμενή καθίζησης ή κυκλώνα και αποστέλλονται για διάθεση. Προστίθενται κροκιδωτικά πολυμερή για να επιταχυνθεί η καθίζηση και η πήξη και να διαχωρίσουν τα στερεά υπορροής (δηλαδή η κόκκινη λάσπη) στην συσκευή συμπύκνωσης. Ο βωξίτης περιέχει από 35 έως 70% αλουμίνια, η οποία εξακολουθεί να αφήνει σημαντική ποσότητα υπολειμμάτων μετά την



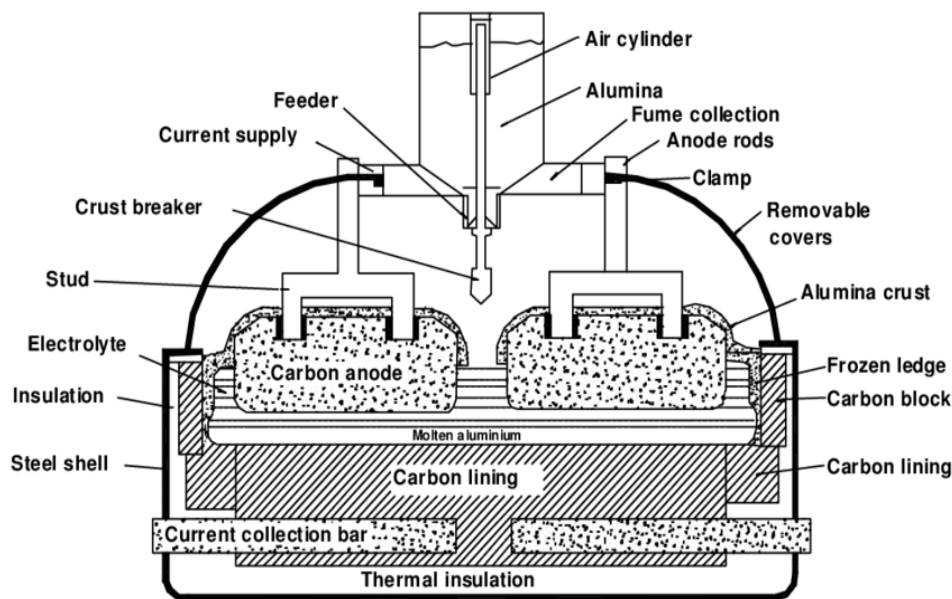
Σχήμα 2.4: Διαδικασία παραγωγής αλουμινίου (Al) μέσω της μεθόδου Bayer.

Πηγή: [Tabereaux, A.T., \(2010\)](#)

επεξεργασία. Το αδιάλυτο υπόλειμμα βωξίτη είναι ένα υποπροϊόν της διαδικασίας. Καθιζάνει ως στερεός πολτός από το καυστικό εναιώρημα κατά τη διαύγαση του τρίτου σταδίου της μεθόδου ή την καθίζηση από αδιάλυτα στερεά που αιωρούνται στο έγκυο υγρό όπως φαίνεται στο (σχήμα 2.4). Ο πολτός υπολειμμάτων βωξίτη στη συνέχεια αντλείται σε μια μεγάλη επιτόπια περιοχή δέσμησης κοινώς γνωστή σαν λίμνη κόκκινης λάσπης. Η κόκκινη λάσπη είναι ένα μείγμα στερεών ακαθαρσιών και καυστικού νερού. Επιπλέον, περιέχει υπολειμματική καυστική σόδα και έτσι έχει pH πάνω από 13 που το καθιστά ιδιαίτερα αλκαλικό. Το υπόλειμμα έχει συνήθως κόκκινο χρώμα που προκαλείται από οξειδωμένο σίδηρο, το οποίο μπορεί να είναι έως και 60% της μάζας της κόκκινης λάσπης. Το υγρό καθαρίζεται όσο το δυνατόν περισσότερο μέσω φίλτρων πριν μεταφερθεί στους καταβυθιστές. Στο τέλος αυτού σταδίου το ίζημα διαχωρίζεται σε ανακυκλώσιμο και μη. Το τέταρτο στάδιο της μεθόδου Bayer είναι η καθίζηση. Στη συνέχεια το κρυσταλλικό τριυδροξείδιο του αργιλίου $Al(OH)_3$, καταβυθίζεται από το ψυχρό υπερκορεσμένο υγρό. Οι πυρήνες κρυστάλλων προστίθενται στο υγρό για να αναπτυχθούν μεγαλύτεροι συσσωματωμένοι κρύσταλλοι. Το ίζημα φιλτράρεται και στη συνέχεια συμπυκνώνεται με εξάτμιση καταλήγοντας σε μία πλάκα υδροξειδίου του αργιλίου. Πέμπτο και τελικό στάδιο είναι η πύρωση της ένυδρης αλουμίνης. Κύριο αντικείμενο αυτού του σταδίου είναι η διάσπαση της αλουμίνης και του νερού. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της θέρμανσης της αλουμίνης περίπου στους $1000^{\circ}C$. Έτσι παράγεται αλουμίνη ικανή να πληρεί τις προδιαγραφές για μεταλλουργική χρήση Tabereaux, A.T., (2010).

2.4.2 HALL- HEROULT PROCESS

Η εμπορική παραγωγή του μεταλλικού αλουμινίου ξεκίνησε το 1889 με την μέθοδος Hall- Héroult Process ή αλλιώς μέθοδος ηλεκτρόλυσης τήγματος αλουμίνας. Εκτός από τις τεχνολογικές βελτιώσεις που έγιναν έκτοτε, η διαδικασία ηλεκτρολυτικού αλουμινίου



Σχήμα 2.5: Τομή βιομηχανικής κυψέλης ανοδίων Hall- Héroult.

Πηγή: [Prasad S. \(2000\)](#)

παραμένει η ίδια, όπως ήταν πριν από 130 χρόνια. Όλα αυτά τα χρόνια έχουν εξεταστεί πολυάριθμες εναλλακτικές λύσεις στη διαδικασία Hall- Héroult, προσπαθώντας να μειώσουν το κόστος του μετάλλου, αλλά κανείς δεν μπόρεσε να το αντικαταστήσει λόγω τεχνικών προβλημάτων. Οι μεταβαλλόμενες οικονομικές συνθήκες καθιστούν την ανάπτυξη κυψελών χαμηλού κόστους ζωτικής σημασίας για τη βιομηχανία. Η ηλεκτρόλυση γίνεται σε μία χαλύβδινη δεξαμενή επενδυμένη με πυρίμαχα θερμομονωτικό και άνθρακα. Η βάση της δεξαμενής είναι επενδυμένη με προψημένα ανθρακονήματα και τα πλαϊνά με μερικώς γραφτισμένο ανθρακίτη σε πίσσα λιθανθράκων. Στην μέθοδο αυτή, η αλουμίνα διαλύεται μέσα αυτές τις δεξαμενές στις οποίες υπάρχει λιωμένο κρυόλιθο (το κρυόλιθο είναι μείγμα Na_3AlF_6) που έχει τον ρόλο του ηλεκτρολύτη, σε συνδυασμό με ορισμένες προσθήκες. Ένα τυπικό μέσο ηλεκτρόλυσης περιέχει περίσσεια AlF_3 (10-12%) και CaF_2 (4-6%) μαζί με την αλουμίνα. Τα πρόσθετα αυξάνουν την αγωγιμότητα του μέσου και μειώνουν το σημείο τήξης

του κρυόλιθου από 1011°C σε 920-970°C με αποτέλεσμα τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Όμως τα πρόσθετα προκαλούν μείωση της διαλυτότητας της αλουμίνιας (από 15% κατά βάρος σε περίπου 6% κατά βάρος) και αυτό περιορίζει τη συνολική συγκέντρωση. Η αλουμίνια προστίθεται στο στοιχείο περιοδικά επειδή κατά τη διάρκεια της ηλεκτρόλυσης η συγκέντρωσή της πέφτει και εάν αφηθεί να πέσει κάτω από περίπου 2%, η κυψέλη ηλεκτρόλυσης υφίσταται μια ξαφνική και μεγάλη λειτουργική αστοχία γνωστή ως «φαινόμενο ανόδου». Η προσθήκη κρυόλιθου δεν απαιτείται, καθώς επανασχηματίζεται μέσω δευτερογενών αντιδράσεων. Μέσω της διαδικασίας Hall- Héroult παράγεται καθαρό αλουμίνιο 99,5–99,8%. Επίσης παράγονται στερεά υγρά και αέρια απόβλητα και έχει εξαιρετικά μεγάλο χρηματικό και ενεργειακό κόστος. Ευθύνεται σε μεγάλο βαθμό για την κλιματική αλλαγή λόγω των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Το ανακυκλωμένο αλουμίνιο δεν απαιτεί ηλεκτρόλυση, επομένως δεν σχηματίζεται με αυτή τη διαδικασία. Το αλουμίνιο ανακυκλώνεται εύκολα, περίπου το 30% της παραγωγής αλουμινίου στις ΗΠΑ προέρχεται από ανακυκλωμένο υλικό. Το αλουμίνιο που προέρχεται από ανακύκλωση απαιτεί μόνο το 5% της ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή αλουμινίου από βωξίτη Prasad, S., (2000).

2.5 Ιδιότητες Αλουμινίου

2.5.1 ΦΥΣΙΚΕΣ

Οι φυσικές ιδιότητες περιλαμβάνουν όλες τις ιδιότητες εκτός από τις μηχανικές. Οι φυσικές ιδιότητες, που είναι σημαντικές για τον σχεδιασμό, είναι η πυκνότητα, το σημείο τήξης, η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η θερμική αγωγιμότητα και ο συντελεστής θερμικής διαστολής. Αυτές οι ιδιότητες ποικίλλουν μεταξύ των κραμάτων και των σκληρύνσεων.

Η πιο σημαντική φυσική του ιδιότητα είναι η πυκνότητα, η οποία δεν διαφέρει σε μεγάλο βαθμό ανάμεσα στα κράματα (καθώς τα στοιχεία κράματος αποτελούν ένα τόσο μικρό μέρος της σύνθεσης) που κυμαίνεται από 2.547 έως 2.851 g/cm³ και κατά μέσο όρο λαμβάνει την τιμή 2.7 g/cm³. Αυτό συγκρίνεται με 1.799 για το μαγνήσιο, 4.429 για το τιτάνιο και 7.833 για τον χάλυβα g/cm³. Η πυκνότητα υπολογίζεται ως ο σταθμισμένος μέσος όρος των πυκνοτήτων των στοιχείων που αποτελούν το κράμα. Τα κράματα της σειράς 5xxx και 6xxx (το σύστημα ονοματολογίας των κραμάτων αναλύεται στην ενότητα 2.8) είναι τα

ελαφρύτερα από τα κοινά κράματα, καθώς το μαγνήσιο είναι το ελαφρύτερο από τα κραματικά στοιχεία. Η θεωρητική πυκνότητα ενός χυτού κράματος είναι μικρότερη από την πραγματική, αυτό συμβαίνει επειδή δεν μπορεί να αποφευχθεί κάποιο πορώδες κατά την παραγωγή του. Η πυκνότητα των χυτών κραμάτων είναι συνήθως περίπου 95-100% της θεωρητικής.

Η δεύτερη πιο σημαντική ιδιότητα είναι η καλή αντοχή στη διάβρωση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το αλουμίνιο και τα κράματα αλουμινίου αντιδρούν με οξυγόνο και υδρατμούς στον αέρα για να παράγουν ένα λεπτό, συμπαγές φιλμ οξειδίου που προστατεύει το υποκείμενο μέταλλο από περαιτέρω προσβολή. Έτσι, το αλουμίνιο και τα περισσότερα από τα κράματα χωρίς χαλκό αποδεικνύονται πολύ ανθεκτικά στη διάβρωση εάν η τιμή pH οποιουδήποτε υγρού επαφής κυμαίνεται μεταξύ 5 και 8. Σε αυτό το εύρος υπάγονται οι περισσότερες ατμοσφαιρικές και περιβαλλοντικές συνθήκες.

Το σημείο τήξης επίσης ποικίλλει ανάλογα με το κράμα. Ενώ το καθαρό αλουμίνιο τήκεται σε περίπου 660°C, η προσθήκη στοιχείων κράματος μειώνει το σημείο τήξης μεταξύ 500 και 650°C και παράγει ένα εύρος τήξης, αφού τα διαφορετικά στοιχεία κράματος λιώνουν σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Οι μηχανικές ιδιότητες των περισσότερων κραμάτων αλουμινίου υποβαθμίζονται σημαντικά πολύ κάτω από το σημείο τήξης τους. Λίγα κράματα χρησιμοποιούνται πάνω από 200°C, αν και ορισμένα, όπως το 2219, έχουν εφαρμογές σε κινητήρες μέχρι περίπου 300°C.

Η θερμική και η ηλεκτρική αγωγιμότητα ποικίλλουν ευρέως ανάλογα με το κράμα. Οι καθαρότερες ποιότητες αλουμινίου έχουν την υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα 234 W/m·K και ηλεκτρική αγωγιμότητα το 62% του Διεθνούς Προτύπου Ανοπτημένου Χαλκού (IACS) στους 20°C για ίσο όγκο ή 204% του IACS για ίσο βάρος.

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής, είναι ο ρυθμός με τον οποίο το υλικό διαστέλλεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του, είναι ο ίδιος για όλες τις θερμοκρασίες, όντας ελαφρώς υψηλότερος σε αρκετά μεγάλες θερμοκρασίες. Οι μέσες τιμές χρησιμοποιούνται για ένα εύρος θερμοκρασίας, συνήθως από τη θερμοκρασία δωματίου 20°C έως το σημείο βρασμού του νερού 100°C. Ένας αριθμός που χρησιμοποιείται συνήθως για αυτό το εύρος είναι $23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ και είναι διπλάσιος από αυτό του χάλυβα. Αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη για πολλές κατασκευές, όπου είναι απαραίτητη μια ελεύθερη θερμική

διαστολή. Όπου η διαστολή είναι περιορισμένη, οι τάσεις που προκύπτουν οφείλονται στο μικρότερο μέτρο ελαστικότητας (2/3 συγκριτικά με τον χάλυβα) Randolph, J. etc (2004).

2.5.2 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ

Οι μηχανικές ιδιότητες είναι αυτές που σχετίζονται με τη συμπεριφορά του υλικού όταν αυτό υπόκειται σε καταπονήσεις. Οι μηχανικές ιδιότητες είναι συνάρτηση του κράματος και της σκλήρυνσης και σε ορισμένες περιπτώσεις της μορφής του τελικού προϊόντος. Για παράδειγμα, το κράμα 6061-T6 έχει αντοχή εφελκυσμού 260 MPa, ενώ το φύλλο και η πλάκα από 6061-T6 έχουν 290 MPa.

Η αντοχή του αλουμινίου κυμαίνεται σε ένα πολύ μεγάλο εύρος και διαφέρει ανάλογα με τον τρόπο τελικής διαμόρφωσης και το κραματικά στοιχεία που εμπεριέχει. Στον Ευρωκώδικα 9 μέρος 1-1, 3.2.2&3 (EN 1999-1-1, 3.2.2&3) παρουσιάζονται αναλυτικά οι τιμές για κράματα διαμόρφωσης και χύτευσης. Σε επόμενη ενότητα θα ασχοληθούμε εκτενέστερα με το κράμα που αφορά την παρούσα έρευνα.

Το μέτρο ελαστικότητας (E) ή αλλιώς μέτρο Young είναι η κλίση της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης στην ελαστική περιοχή πριν συμβεί η διαρροή. Ο συντελεστής είναι το μέτρο της δυσκαμψίας ενός υλικού (ή της αντίστασης στην ελαστική παραμόρφωση) και της αντοχής του σε λυγισμό, ποικίλλει ελαφρώς ανάλογα με το κράμα, καθώς είναι συνάρτηση των στοιχείων του κράματος. Μπορεί να υπολογιστεί με τον μέσο όρο των συντελεστών των στοιχείων κράματος σύμφωνα με την αναλογία τους στο κράμα, αν και το μαγνήσιο και το λίθιο τείνουν να έχουν δυσανάλογη επίδραση. Μερικές φορές χρησιμοποιείται μια κατά προσέγγιση τιμή 70.000 MPa, αλλά οι συντελεστές κυμαίνονται από 70.000 MPa για καθαρό αλουμίνιο (σειρά 1xxx), μαγγάνιο (σειρά 3xxx) και κράματα μαγνησίου-πυριτίου (σειρά 6xxx) έως 75.000 MPa, για τα κράματα αλουμινίου-χαλκού 77.200 MPa.

Ο λόγος Poisson (ν) είναι το αρνητικό του λόγου της εγκάρσιας τάσης που συνοδεύει τη διαμήκη καταπόνηση που προκαλείται από αξονικό φορτίο στην ελαστική περιοχή. Ο λόγος Poisson είναι περίπου 0,33 για τα κράματα αλουμινίου, παρόμοια με αυτόν του χάλυβα. Ενώ ποικίλλει ελαφρώς ανάλογα με το κράμα και μειώνεται ελαφρά καθώς μειώνεται η θερμοκρασία, τέτοιες διακυμάνσεις είναι ασήμαντες για τις περισσότερες εφαρμογές. Ο λόγος Poisson μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συσχετίσει το μέτρο διάτμησης

(G) και το μέτρο ελαστικότητας (E) μέσω της εξίσωσης 2.1 Gehring, A., Saal, H., (2006), Randolph, J. etc (2004).

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2.1)$$

2.6 Κράτυνση Αλουμινίου

2.6.1 ΚΡΑΤΥΝΣΗ ΚΑΘΑΡΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

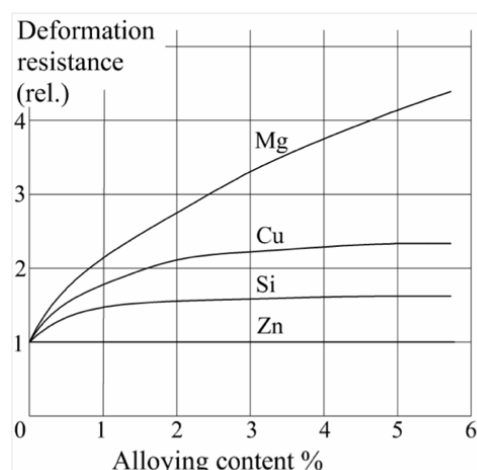
Το καθαρό αλουμίνιο είναι ένα μέταλλο με σχετικά χαμηλή αντοχή. Το αλουμίνιο στην πιο καθαρή του μορφή έχει αντοχή εφελκυσμού περίπου 40 MPa και τάση διαρροής περίπου 10 MPa. Για τις περισσότερες τεχνικές εφαρμογές του αυτά τα όρια είναι ιδιαίτερα χαμηλά. Ωστόσο, έχουν αναπτυχθεί κράματα αλουμινίου με μηχανικές ιδιότητες πολύ μεγαλύτερες από εκείνες του καθαρού αλουμινίου. Σε όλα τα στερεά μέταλλα η πλαστική ροή στα άτομα του υλικού λαμβάνει χώρα κατά μήκος συγκεκριμένων επιπέδων ολίσθησης. Αυτά τα επίπεδα ολίσθησης προσφέρουν τη χαμηλότερη αντίσταση στις εσωτερικές διατμητικές τάσεις και σε ατομικό επίπεδο πραγματοποιείται διατμητική κίνηση κατά μήκος αυτών των επιπέδων χωρίς διαχωρισμό του υλικού. Εάν ένα μέταλλο παραμορφωθεί με τάσεις που ξεπερνούν το όριο ελαστικότητας του, αρχίζει να διαρρέει και εμφανίζει τοπικά πλαστικές παραμορφώσεις. Όταν το δοκίμιο υποβάλλεται σε φορτία μεγαλύτερα από το όριο ελαστικότητας του υλικού, γίνεται μακρύτερο και λεπτότερο. Στο αλουμίνιο εμφανίζονται πολλά τέτοια επίπεδα διάτμησης. Δεδομένου ότι τα εμπορικά κράματα, όταν εξετάζονται μακροσκοπικά, αποτελούνται από λεπτές ίνες και είναι σχετικά ισότροπα, τα επίπεδα διάτμησης έχουν κλίση περίπου σαράντα πέντε μοίρες και αντιστοιχούν στο επίπεδο με την υψηλότερη διατμητική τάση. Για τον μηχανικό, σκεπτόμενος με τεχνικούς όρους, μπορεί να θεωρηθεί πως μια βελτίωση της διατμητικής αντοχής θα βελτιώσει τη γενική μηχανική αντοχή του αλουμινίου. Το σκεπτικό αυτό μπορεί να προσομοιωθεί με τη χρήση κατασκευών που λειτουργούν ως πείροι διάτμησης ώστε να προσεγγίσουν τις διάφορες μεθόδους σκλήρυνσης του αλουμινίου. Η βασική αρχή είναι ότι όλοι οι τύποι ατελειών μπορούν να συμβάλλουν στην αύξηση της διατμητικής αντοχής Gitter R. (2008).

2.6.2 ΚΡΑΤΥΝΣΗ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Ένα πολύ αποτελεσματικό μέσο για την αντιμετώπιση ατελειών του πλέγματος είναι η εισαγωγή συμβατών χημικών στοιχείων στην μήτρα του αλουμινίου. Σε κάποιο βαθμό η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται από τη διαφορά στις ατομικές ακτίνες μεταξύ του πρόσθετου χημικού στοιχείου και του αλουμινίου. Η σχέση μεταξύ φαινομένου σκλήρυνσης και της περιεκτικότητας του προστιθέμενου στοιχείου δεν είναι γραμμική, όπως φαίνεται από το σχήμα 2.6

Ένα από τα στοιχεία που ταιριάζει καλύτερα στην ανάγκη βελτίωσης της αντοχής του, είναι το μαγνήσιο (Mg). Ως εκ τούτου, τα κράματα αλουμινίου-μαγνησίου ήταν η κυρίαρχη επιλογή για κατασκευές αλουμινίου πριν από 100 χρόνια. Υψηλές τιμές αντοχής παρατηρούνταν σε κράματα με έως και 10 τοις εκατό μαγνήσιο. Ωστόσο, παρουσιάστηκαν προβλήματα κατά την θερμή και ψυχρή έλαση των κραμάτων με πολύ υψηλά επίπεδα μαγνησίου και η συμπεριφορά διάβρωσης αποκτούσε έντονο χαρακτήρα, συνεπώς οδηγήθηκαν στη σταδιακή υιοθέτηση κραμάτων με χαμηλότερες ποσότητες μαγνησίου και με προσθήκες μαγγανίου.

Στο σχήμα 2.6 η καμπύλη για το μαγγάνιο, δεν φαίνεται. Το ίδιο το μαγγάνιο ως μια προσθήκη έχει περιορισμένη σημασία όσον αφορά τη κράτυνση. Σε συνδυασμό με μαγνήσιο όμως είναι πολύ πιο αποτελεσματικό. Επιπλέον, η συμπεριφορά διάβρωσης βελτιώνεται Gitter R. (2008).



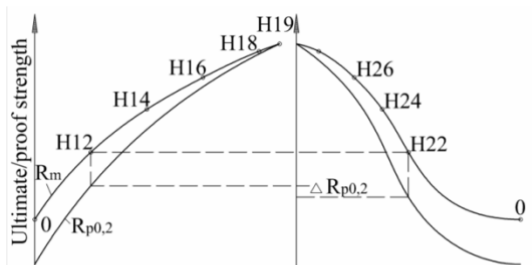
Σχήμα 2.6: Φαινόμενο κράτυνσης ως συνάρτηση της περιεκτικότητας του κάθε στοιχείου κράματος.

Πηγή: [Gitter R. \(2008\)](#)

2.6.3 ΕΝΔΟΤΡΑΧΥΝΣΗ (WORK HARDENING)

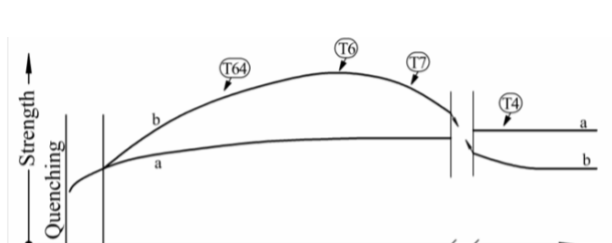
Η πλαστική παραμόρφωση προκαλεί ατέλειες στο πλέγμα αυξάνοντας μαζικά τον αριθμό των λεγόμενων «διαταραχών» ιδιαίτερα κατά μήκος των επιπέδων ολίσθησης. Με την αύξηση του φορτίου και της παραμόρφωσης, αναπτύσσονται συνεχώς πρόσθετα επίπεδα ολίσθησης, έτσι ώστε με την προκύπτουσα αύξηση της πυκνότητας διαταραχής, το υλικό να αναπτύσσει αυξημένη μηχανική αντοχή. Παράλληλα με αυτή την αύξηση της αντοχής, η ολκιμότητα μειώνεται μέχρι να σταματήσει τελικά η διαδικασία παραμόρφωσης. Κατά την έλαση εν ψυχρώ, η οποία λέγεται και ενδοτράχυνση ή σκλήρυνση με ψυχρή κατεργασία συνεχίζεται έως ότου το υλικό αρχίσει να δημιουργεί ρωγμές (συνήθως στις άκρες του). Ωστόσο αυτή η διαδικασία σκλήρυνσης μπορεί να αντιστραφεί με τη χρήση θερμότητας. Εξαρτώμενα από τη θερμοκρασία και το χρόνο η αύξηση στην αντοχή του υλικού μπορεί να αντιστραφεί και να επιστρέψει στο αρχικό του επίπεδο πριν από την ψυχρή έλαση. Το υλικό επιστρέφει επίσης στην αρχική του ολκιμότητα. Αυτή η θερμική διαδικασία για να φτάσει στη λεγόμενη «κατάσταση 0» το υλικό περιγράφεται ως αναδιαταγμένο. Από αυτήν την μαλακή κατάσταση 0 οι διαδικασίες ψυχρής έλασης μπορούν να πραγματοποιηθούν εκ νέου. Στη βιομηχανική παραγωγή η διαδικασία μπορεί επαναλαμβάνεται αρκετές φορές για να παραχθεί πολύ λεπτό υλικό από το αρχικό, κοινώς φύλλο αλουμινίου, το οποίο προήλθε από μια πλάκα μετάλλου μεγάλου πάχους Τριανταφυλλίδης, Γ.Κ., (2014).

Το Σχ. 2.7 δείχνει τη διαδικασία ψυχρής επεξεργασίας και αναδιάταξης, εδώ ως συνάρτηση του χρόνου σε σταθερή θερμοκρασία. Είναι χαρακτηριστικό για το φαινόμενο έλασης εν ψυχρώ ότι τα πρώτα στάδια της έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στην αντοχή του υλικού.



Σχήμα 2.8: Η αντοχή του βαθμού ψυχρής κατεργασίας σε συνάρτηση με την θερμοκρασία.

Πηγή: [Gitter R. \(2008\)](#)



Σχήμα 2.7: Αντοχή συνάρτησή του χρόνου σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και σε ανεβασμένη θερμοκρασία.

Πηγή: [Gitter R. \(2008\)](#)

2.6.4 ΤΕΛΕΙΩΤΙΚΗ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ (PRECIPITATION HARDENING)

Η επίδραση της τελειωτικής σκλήρυνσης χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά πρακτικά το 1906 από τον Wilm. Το φαινόμενο προκαλείται όταν ένα ή περισσότερα συμβατά στοιχεία είναι ικανά να σχηματίσουν ενώσεις μεταξύ τους και με το αλουμίνιο, τις λεγόμενες διαμεταλλικές ενώσεις, στις οποίες τα δομικά τους στοιχεία συγκρατούνται με διαμεταλλικούς δεσμούς. Αποτελούν επίσης ένα ατελές πλέγμα και ανάλογα με το μέγεθος των στοιχείων που το αποτελούν και την ομοιόμορφη κατανομή τους επιφέρουν, αξιοσημείωτη αύξηση της αντοχής. Η όλη διαδικασία ξεκινά με μια θερμική επεξεργασία διαλύματος, δηλαδή όλα τα κραματικά στοιχεία βρίσκονται σε διάλυμα (στερεό διάλυμα). Μετά από αυτό είναι απαραίτητο να ψυχθούν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για να επιτευχθεί η ομοιόμορφη κατανομή τους. Έπειτα τα εμπλεκόμενα στοιχεία αρχίζουν να κινούνται στη μήτρα αλουμινίου, ενοποιούνται σε διαμεταλλικές ενώσεις και αναπτύσσονται. Αυτό συμβαίνει σε θερμοκρασία δωματίου αλλά με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες (φυσική γήρανση και τεχνητή γήρανση). Αξίζει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα σκλήρυνσης λόγω των καθιζήσεων μπορεί να μειωθούν εάν επιδρά πολύ υψηλή θερμοκρασία για μικρό χρονικό διάστημα στο υλικό ή εάν η θερμοκρασία είναι μέτρια και επιδρά για μεγάλο χρονικό διάστημα Χρυσουλάκη, Γ.Δ., Παντελή, Δ.Ι., (2004).

2.7 Κράμα Γενικά

Κράμα ονομάζεται το υλικό που αποτελείται από διαφορετικές χημικές ουσίες. Όταν αυτό είναι στερεό χαρακτηρίζεται από την συμμετοχή όλων των ουσιών στο κρυσταλλικό πλέγμα. Ένα αντικείμενο που αποτελείται από κράμα μπορεί να εμπεριέχει άτομα διαφορετικών χημικών στοιχείων όμως τα άτομα ή τα μόρια των συστατικών που βρίσκονται στον κρύσταλλο είναι διαταγμένα στον χώρο σαν άτομα του ίδιου είδους. Τα κράματα παρασκευάζονται με στόχο τον συνδυασμό των ιδιοτήτων από τα επιμέρους στοιχεία που το αποτελούν, δημιουργώντας έτσι ένα νέο υλικό Randolph, J. etc. (2004).

2.7.1 ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Το αλουμίνιο χρησιμοποιείται σε αρκετά μικρό βαθμό στην καθαρή του μορφή. Η προσθήκη ενός ή περισσότερων στοιχείων, έχει ως αποτέλεσμα ένα κράμα με σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες, από το μη κραματικό υλικό. Η προσθήκη στοιχείων κράματος στο αλουμίνιο σε κάποιες περιπτώσεις υποβαθμίζει ορισμένα χαρακτηριστικά του καθαρού μετάλλου (όπως αντίσταση διάβρωσης ή ηλεκτρική αγωγιμότητα), αυτό είναι αποδεκτό για ορισμένες εφαρμογές επειδή άλλες ιδιότητες (όπως η αντοχή) μπορούν να βελτιωθούν σημαντικά. Περίπου 15 στοιχεία κράματος χρησιμοποιούνται με το αλουμίνιο, αν και συνήθως αποτελούν λιγότερο από το 10% του κράματος κατά βάρος, μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τις ιδιότητες του υλικού. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μεμονωμένα στοιχεία αλλά και σε συνδυασμούς.

Τα κράματα αλουμινίου χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τα κράματα διαμόρφωσης ή αλλιώς σφυρήλατα κράματα, είναι αυτά που επεξεργάζονται για να διαμορφωθούν και τα χυτά κράματα, αυτά που χύνονται σ' ένα καλούπι, το οποίο καθορίζει το τελικό τους σχήμα, ενώ βρίσκονται σε ρευστή κατάσταση. Η Aluminium Association (Η Aluminium Association είναι η κύρια πηγή πληροφοριών, προτύπων και στατιστικών στοιχείων σχετικά με τη βιομηχανία αλουμινίου των ΗΠΑ και η ύπαρξη της υφίσταται από το 1993) διατηρεί ένα ευρέως αναγνωρισμένο σύστημα ονομασίας για κάθε κατηγορία, που περιγράφεται στο ANSI H35.1, Alloy and Temper Definition for Aluminum και αναλύεται παρακάτω Randolph, J. etc (2004).

2.7.2 ΚΡΑΜΑΤΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ (WROUGHT ALLOYS)

Στο σύστημα χαρακτηρισμού της Aluminium Association για κράματα αλουμινίου, εκχωρείται ένας τετραψήφιος αριθμός σε κάθε κράμα που είναι καταχωρισμένο σε αυτή. Σήμερα το πιο γενικά χρησιμοποιούμενο σύστημα και τα ευρωπαϊκά πρότυπα ακολουθούν αυτήν την ονοματολογία. Ο πρώτος αριθμός του κράματος δηλώνει το κύριο στοιχείο κράματος, το οποίο παράγει μια ομάδα κραμάτων με παρόμοιες ιδιότητες. Το δεύτερο ψηφίο υποδηλώνει μια τροποποίηση ενός κράματος. Τα δύο τελευταία ψηφία εκχωρούνται διαδοχικά από τη Aluminium Association.

Πίνακας 2.1: Σύστημα ονοματολογίας κραμάτων διαμόρφωσης και χαρακτηριστικά.Πηγή: [Randolph, J. etc \(2004\)](#)

Αριθμός σειράς	Κύριο στοιχείο κράματος	Σχετική αντοχή στη διάβρωση	Σχετική αντοχή	Θερμική επεξεργασία
1xxx	Καθαρό αλουμίνιο	Εξαιρετική	Μέτρια	Μη θερμικά επεξεργάσιμο
2xxx	Χαλκός	Μέτρια	Εξαιρετική	Θερμικά επεξεργάσιμο
3xxx	Μαγγάνιο	Καλή	Μέτρια	Μη θερμικά επεξεργάσιμο
4xxx	Πυρίτιο	-	-	Μη θερμικά επεξεργάσιμο
5xxx	Μαγνήσιο	Καλή	Καλή	Μη θερμικά επεξεργάσιμο
6xxx	Μαγνήσιο & Πυρίτιο	Καλή	Καλή	Θερμικά επεξεργάσιμο
7xxx	Ψευδάργυρος	Μέτρια	Εξαιρετική	Θερμικά επεξεργάσιμο

1xxx Αυτή η σειρά αναφέρεται στο καθαρό αλουμίνιο, που ορίζεται στη βιομηχανία ως τουλάχιστον 99% αλουμίνιο. Οι αριθμοί κράματος στη σειρά 1xxx αναφέρονται στις διακυμάνσεις της καθαρότητας και στα στοιχεία που εμπεριέχονται, με τα επικρατέστερα να είναι ο σίδηρος και το πυρίτιο. Οι κύριες χρήσεις για τα κράματα αυτής της σειράς είναι ηλεκτρικοί αγωγοί και αποθήκευση ή επεξεργασία χημικών, επειδή οι καλύτερες ιδιότητες των κραμάτων αυτής της σειράς είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η αντίσταση στη διάβρωση. Τα δύο τελευταία ψηφία του αριθμού του κράματος, δηλώνουν τα δύο ψηφία μετά την υποδιαστολή του ποσοστού του υλικού που είναι αλουμίνιο. Για παράδειγμα, το 1055 υποδηλώνει ένα κράμα που είναι 99,55% αλουμίνιο. Η αντοχή του καθαρού αλουμινίου είναι σχετικά χαμηλή.

2xxx Το κύριο στοιχείο κράματος για αυτήν την ομάδα είναι ο χαλκός, ο οποίος παράγει υψηλή αντοχή αλλά μειωμένη αντοχή στη διάβρωση. Αυτά τα κράματα ήταν από τα πρώτα κράματα αλουμινίου που αναπτύχθηκαν και ονομάζονταν duralumin. Το κράμα 2024 είναι ίσως το πιο γνωστό και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο κράμα στα αεροσκάφη. Τα αρχικά κράματα αλουμινίου-χαλκού δεν ήταν ιδιαίτερα συγκολλησίμα, αλλά οι σχεδιαστές έχουν ξεπεράσει αυτό το εμπόδιο, σε κράματα αυτής της σειράς που αναπτύχθηκαν στη συνέχεια.

3xxx Το μαγγάνιο είναι το κύριο στοιχείο κράματος για τη σειρά 3xxx, αυξάνοντας την αντοχή του 20 % συγκριτικά με το καθαρό αλουμίνιου. Η αντοχή στη διάβρωση και η δυνατότητα κατεργασίας των κραμάτων αυτής της ομάδας, η οποία αποτελείται κυρίως από τα κράματα 3003, 3004 και 3105, είναι καλές. Τα κράματα της σειράς 3xxx είναι κατάλληλα για αρχιτεκτονικά προϊόντα επικάλυψης κτηρίων, υπόστεγα και στέγες, κελύφη μεταλλικών βιομηχανικών κτηρίων.

4xxx Το πυρίτιο προστίθεται σε κράματα της σειράς 4xxx για μείωση του σημείου τήξης σε εφαρμογές συγκόλλησης. Το πυρίτιο παρέχει επίσης καλά χαρακτηριστικά ροής, τα οποία στην περίπτωση σφυρηλάτησης παρέχουν πληρέστερη πλήρωση πολύπλοκων σχημάτων μήτρας.

5xxx Τα κράματα της σειράς 5xxx περιέχουν μαγνήσιο, με αποτέλεσμα την υψηλή αντοχή του υλικού και την αντοχή στη διάβρωση. Τα κράματα αυτής της ομάδας χρησιμοποιούνται σε κύτους πλοίων και άλλες θαλάσσιες εφαρμογές, σύρματα συγκόλλησης και συγκολλημένα δοχεία αποθήκευσης. Η αντοχή των κραμάτων αυτής της σειράς είναι ευθέως ανάλογη με την περιεκτικότητα σε μαγνήσιο, η οποία κυμαίνεται έως και περίπου 6%.

6xxx Τα κράματα αυτής της ομάδας περιέχουν μαγνήσιο και πυρίτιο σε αναλογίες που σχηματίζουν πυριτικό μαγνήσιο (Mg_2Si). Αυτά τα κράματα έχουν καλή αντοχής και αντίσταση στη διάβρωση. Το κράμα 6061 είναι ένα από τα πιο δημοφιλή από όλα τα κράματα αλουμινίου και έχει αντοχή διαρροής συγκρίσιμη με τον ήπιο ανθρακούχο χάλυβα. Τα κράματα της σειράς 6xxx εξωθούνται επίσης πολύ εύκολα, επομένως αποτελούν την πλειοψηφία των εξωθήσεων που παράγονται και χρησιμοποιούνται εκτενώς σε οικοδομικές, κατασκευές και άλλες δομικές εφαρμογές.

7xxx Το κύριο στοιχείο κράματος αυτής της σειράς είναι ο ψευδάργυρος. Η σειρά 7xxx περιλαμβάνει δύο τύπους κραμάτων, τα κράματα αλουμινίου–ψευδάργυρου–μαγνησίου (όπως το 7005) και τα κράματα αλουμινίου–ψευδάργυρου–μαγνησίου–χαλκού (όπως 7075 και 7178). Τα κράματα αυτής της σειράς περιλαμβάνουν μερικά από τα ισχυρότερα κράματα αλουμινίου όπως το 7178, το οποίο έχει υψηλή εφελκυστική αντοχή (580 MPa) και χρησιμοποιείται σε σκελετούς αεροσκαφών και δομικά εξαρτήματα. Ωστόσο, η αντοχή σε διάβρωση των κραμάτων της σειράς 7xxx, είναι μικρότερη από τις σειρές 1xxx, 3xxx, 5xxx και

6xxx. Τα κράματα 7xxx χωρίς χαλκό είναι ανθεκτικά στη διάβρωση και ορισμένα (όπως τα 7008 και 7072) χρησιμοποιούνται ως επένδυση για την προστασία των λιγότερο ανθεκτικών κραμάτων αλουμινίου σε διάβρωση.

8xxx Η σειρά 8xxx εμπεριέχει κραματικά στοιχεία όπως ο σίδηρος και το νικέλιο και χρησιμοποιούνται για την αύξηση της αντοχής χωρίς σημαντική απώλεια στην ηλεκτρική αγωγιμότητα.

9xxx Αυτή η σειρά δεν χρησιμοποιείται πλέον.

Αυτό είναι το επικρατέστερο σύστημα συμβολισμού των σφυρήλατων κραμάτων αλουμινίου. Διαφοροποιείται σε κάποιες χώρες αλλά η κεντρική ιδέα πηγάζει ή βασίζεται πάνω σε αυτό.

Οι σειρές 2xxx και 7xxx αναφέρονται μερικές φορές ως κράματα αεροσκαφών, αλλά χρησιμοποιούνται και σε άλλες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των συνδέσμων σε μεταλλικά κτίρια. Τα κράματα της σειράς 1xxx, 3xxx και 6xxx αναφέρονται μερικές φορές ως "μαλακά", ενώ τα κράματα της σειράς 2xxx, 5xxx και 7xxx ονομάζονται "σκληρά". Αυτή η περιγραφή αναφέρεται στην ευκολία εξώθησης των κραμάτων, τα σκληρά κράματα είναι πιο δύσκολο να εξωθηθούν, απαιτούν πρέσες μεγαλύτερης χωρητικότητας, επομένως είναι πιο ακριβά Kaufman, J.G., (2000).

2.7.3 ΚΡΑΜΑΤΑ ΧΥΤΕΥΣΗΣ (CASTING ALLOYS)

Τα κράματα χύτευσης περιέχουν μεγαλύτερες αναλογίες στοιχείων κράματος από τα σφυρήλατα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια ετερογενή δομή όπου σε γενικές γραμμές είναι



Σχήμα 2.9: Πλίνθωμα (ingot) καθαρού αλουμινίου.

Πηγή: [TehranTimes](#)

λιγότερο όλκιμη από την πιο ομοιογενή δομή των σφυρήλατος κραμάτων. Τα χυτά κράματα περιέχουν επίσης περισσότερο πυρίτιο από τα σφυρήλατα ώστε να έχουν την απαιτούμενη ρευστότητα για την χύτευση τους.

Το σύστημα χαρακτηρισμού κραμάτων χύτευσης της Aluminium Association χρησιμοποιεί τέσσερα ψηφία όπως και στο σύστημα σφυρήλατων κραμάτων, οι περισσότερες ομοιότητες όμως τελειώνουν εκεί. Το σύστημα χαρακτηρισμού του χυτών κραμάτων έχει τρία ψηφία, ακολουθούμενα από μια υποδιαστολή και ένα άλλο ψηφίο μετά από αυτή. Το πρώτο ψηφίο υποδεικνύει το κύριο στοιχείο κράματος. Τα δύο επόμενα ψηφία δηλώνουν το κράμα, ή στην περίπτωση εμπορικά καθαρών κραμάτων χύτευσης, το επίπεδο καθαρότητας. Το τελευταίο ψηφίο υποδεικνύει τη μορφή του προϊόντος, παίρνει την τιμή 0 για χυτό (casting) ή 1-2 για πλίνθωμα (ingot) (ανάλογα με το επίπεδο καθαρότητας. Μια τροποποίηση του αρχικού κράματος ορίζεται με ένα γράμμα πρόθεμα (A, B, C, κ.λπ.) στον αριθμό του κράματος. Τα κύρια στοιχεία κραμάτων είναι:

1xx.x Αυτά είναι τα εμπορικά καθαρά κράματα χυτού αλουμινίου. Ένα παράδειγμα χρήσης τους είναι οι ρότορες χυτού κινητήρα.

2xx.x Η χρήση του χαλκού ως κύριου στοιχείου κράματος παράγει τα ισχυρότερα χυτά κράματα. Τα κράματα αυτής της ομάδας χρησιμοποιούνται για εργαλειομηχανές, αεροσκάφη και εξαρτήματα κινητήρα. Το κράμα 203.0 έχει την υψηλότερη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και είναι κατάλληλο για συντήρηση στους 200°C.

3xx.x Σε αυτή τη σειρά χρησιμοποιείται πυρίτιο, με χαλκό και/ή μαγνήσιο. Αυτά τα κράματα έχουν εξαιρετική ρευστότητα και αντοχή και είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα κράματα χυτού αλουμινίου. Το κράμα 356.0 και οι τροποποιήσεις του είναι πολύ δημοφιλής και χρησιμοποιούνται συναντάται σε πάρα πολλές χρήσεις. Τα κράματα με υψηλή περιεκτικότητα σε πυρίτιο έχουν καλή αντοχή στη φθορά και χρησιμοποιούνται για μπλοκ κινητήρα και έμβολα αυτοκινήτων.

4xx.x Η χρήση πυριτίου σε αυτή τη σειρά παρέχει εξαιρετική ρευστότητα στα κράματα χύτευσης όπως και στα σφυρήλατα κράματα, έτσι και αυτά είναι κατάλληλα για περίπλοκα υλικά χύτευσης όπως τα πλαίσια γραφομηχανών και έχουν σχετικά καλή αντοχή στη διάβρωση. Το κράμα A444.0 έχει μέτρια αντοχή αλλά καλή όλκιμότητα.

5xx.x Τα χυτά κράματα με μαγνήσιο έχουν καλή αντοχή στη διάβρωση, ειδικά σε παραθαλάσσιες περιοχές (π.χ., 514.0), έχουν καλή μηχανική επεξεργασία με δυνατότητα κατασκευής λεπτομερειών. Ωστόσο, είναι πιο δύσκολο να χυτευθεί συγκριτικά με τις σειρές 200, 300 και 400.

6xx.x Αυτή η σειρά δεν χρησιμοποιείται.

7xx.x Αυτή η σειρά περιέχει ψευδάργυρο, είναι δύσκολο να χυτευθεί για αυτό και χρησιμοποιείται όπου τα χαρακτηριστικά της ή η μηχανικές της ιδιότητες κρίνονται αναγκαίες. Αυτά τα κράματα έχουν καλή αντοχή και καλή αντοχή στη διάβρωση, αλλά δεν είναι κατάλληλα για υψηλές θερμοκρασίες.

8xx.x Αυτή η σειρά αφορά κράματα με περίπου 6% κασσίτερο και χρησιμοποιείται κυρίως σε ρουλεμάν, υπερτερώντας από τα περισσότερα άλλα υλικά για αυτή τη χρήση. Αυτά τα κράματα χρησιμοποιούνται σε μεγάλα ρουλεμάν ελασμάτων, μπιέλες και ρουλεμάν στροφαλοθαλάμου που βρίσκονται σε κινητήρες εσωτερικής καύσης με καύσιμο το πετρέλαιο.

9xx.x Αυτή η σειρά προορίζεται για προϊόντα χύτευσης με κραματικά στοιχεία διαφορετικά από αυτά που χρησιμοποιούνται στις άλλες σειρές Randolph, J. etc (2004).

2.8 Σύστημα Σχεδιασμού Θερμικών Κατεργασιών Κραμάτων Αλουμινίου

Τα κράματα αλουμινίου σκληρύνονται με θερμική επεξεργασία ή σκλήρυνση μέσω παραμόρφωσης με στόχο την αύξηση της αντοχής τους πέρα από την ενίσχυση που προσδίδει η προσθήκη στοιχείων κράματος.

Πίνακας 2.2: Μέθοδοι ενίσχυσης της σκληρότητας των κραμάτων.

Πηγή: [Randolph, J. etc \(2004\)](#)

Καθαρό Αλουμίνιο 1xxx	Κράμα 2xxx – Cu 6xxx – Mg, Si 7xxx – Zn	Θερμική Κατεργασία Φυσική ή τεχνίτη παλαίωση	Σκλήρυνση μέσω Παραμορφώσεων (Σφυρηλάτηση)	T
	Κράμα 3xxx – Mn 5xxx – Mg	Σκλήρυνση μέσω Παραμορφώσεων (Σφυρηλάτηση)		H

Τα κράματα χωρίζονται σε δύο ομάδες με βάση το αν η αντοχή τους μπορεί να αυξηθεί με θερμική επεξεργασία ή όχι. Τόσο τα θερμικά επεξεργάσιμα όσο και τα μη θερμικά επεξεργασμένα κράματα μπορούν να ενισχυθούν με σκλήρυνση μέσω παραμόρφωσης, που ονομάζεται ψυχρή έλαση. Τα κράματα που δεν είναι θερμικά επεξεργάσιμα μπορούν να ενισχυθούν μόνο με ψυχρή έλαση. Το αν ένα κράμα είναι θερμικά επεξεργάσιμο ή όχι εξαρτάται από τα κραματικά στοιχεία που εμπεριέχει. Κράματα στα οποία η ποσότητα του κραματικού στοιχείου σε στερεή κατάσταση προσ αυξάνεται μέσα στο αλουμίνιο με την αύξηση της θερμοκρασίας, είναι θερμικά επεξεργάσιμα. Τα σφυρήλατα κράματα της σειράς 1xxx, 3xxx, 4xxx και 5xxx δεν είναι θερμικά επεξεργασμένα, ενώ τα σφυρήλατα κράματα 2xxx, 6xxx και 7xxx είναι, με λίγες εξαιρέσεις. Οι μέθοδοι ενίσχυσης συνοψίζονται στον πίνακα 2.2.

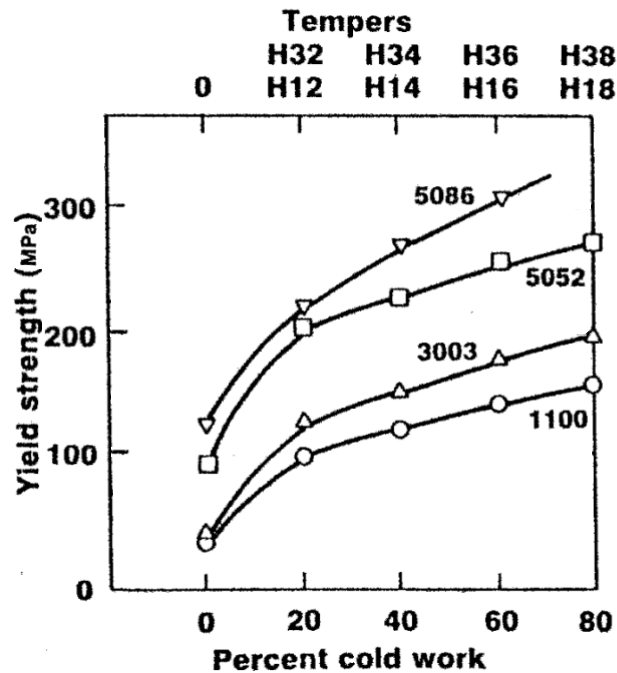
Τα μη θερμικά επεξεργάσιμα κράματα μπορούν επίσης να υποστούν θερμική επεξεργασία, αλλά αυτή η επεξεργασία χρησιμοποιείται μόνο για τη σταθεροποίηση των ιδιοτήτων, έτσι ώστε οι αντοχές να μην μειώνονται με την πάροδο του χρόνου (συμπεριφορά που ονομάζεται αποσκλήρυνση της ηλικίας) και απαιτείται μόνο για κράματα με σημαντική ποσότητα μαγνησίου (σειρά 5xxx). Η θέρμανση στους 110–180°C αποσκληραίνει το υλικό ενώ ταυτόχρονα χρησιμοποιείται ως θερμική επεξεργασία σταθεροποίησης.

Πριν από τη σκλήρυνση, τα κράματα βρίσκονται στην κατάσταση ανόπτησης, την πιο αδύναμη αλλά πιο όλκιμη κατάσταση. Η σκλήρυνση, ενώ αυξάνει την αντοχή, μειώνει την όλκιμότητα επομένως μειώνει την ευπλαστότητα. Για να αναδιαταχθεί το υλικό στην κατάσταση ανόπτησης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι τυπικές μέθοδοι ανόπτησης.

Η σκλήρυνση με παραμόρφωση επιτυγχάνεται με μηχανική παραμόρφωση του υλικού σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Για την κατασκευή φύλλου ή πλακιδίου αλουμινίου, τοποθετούνται κομμάτια αλουμινίου ενδιάμεσα από δύο κυλίνδρους με ελεγχόμενη απόσταση μεταξύ τους και μέσω της κύλισης επιτυγχάνεται η μείωση του πάχους. Καθώς το υλικό δουλεύεται, γίνεται ανθεκτικό σε περαιτέρω παραμόρφωση και η αντοχή του

αυξάνεται. Η επίδραση αυτής της εργασίας στην αντοχή διαρροής ορισμένων κοινών μη θερμικά επεξεργάσιμων κραμάτων φαίνεται στο σχήμα 2.10.

Μπορούν να εφαρμοστούν δύο θερμικές επεξεργασίες σε θερμικά επεξεργασμένα κράματα ανόπτησης. Πρώτον, το υλικό μπορεί να υποστεί θερμική επεξεργασία διαλύματος.



Σχήμα 2.10: Επίδραση ψυχρής έλασης στην αντοχή διαρροής.

Πηγή: [Randolph, J. etc \(2004\)](#)

Αυτό επιτρέπει στα διαλυτά κράματα να εισέλθουν σε στερεό διάλυμα. Διατηρούνται σε υπερκορεσμένη κατάσταση κατά την σβέση. Η ελεγχόμενη ταχεία ψύξη συνήθως γίνεται με την χρήση αέρα ή νερού. Στη συνέχεια, το υλικό μπορεί να υποβληθεί σε θερμική επεξεργασία καθίζησης, που ονομάζεται τεχνητή γήρανση, με την οποία τα συστατικά κατακρημνίζονται από στερεό διάλυμα για να αυξηθεί η αντοχή.

Ένα κράμα αλουμινίου θερμικά επεξεργασμένο μπορεί να υποστεί φυσική γήρανση. Η φυσική γήρανση, όπως και η τεχνητή γήρανση, είναι η καθίζηση στοιχείων κράματος από στερεό διάλυμα, αλλά επειδή συμβαίνει σε θερμοκρασία δωματίου, πραγματοποιείται πολύ πιο αργά (σε διάστημα ημερών ακόμη και μηνών αντί για μερικές ώρες) από την τεχνητή γήρανση. Και οι δύο διαδικασίες γήρανσης προκαλούν αύξηση της αντοχής και αντίστοιχη μείωση της ολκιμότητας. Υλικό που θα υποβληθεί σε σοβαρές κατεργασίες διαμόρφωσης, σχηματίζεται και στη συνέχεια παλαιώνεται τεχνητά ή αφήνεται να παλαιωθεί φυσικά.

Πρέπει να ληφθεί μέριμνα για το σχηματισμό του υλικού πριν περάσει πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα, διαφορετικά η φυσική γήρανση του υλικού θα το κάνει να σκληρύνει και θα μειωθεί η ευπλαστότητα του.

Το σύστημα χαρακτηρισμού θερμοκρασίας είναι το ίδιο τόσο για τα σφυρήλατα όσο και για τα χυτά κράματα, αν και τα χυτά κράματα υφίστανται μόνο θερμική επεξεργασία και δεν σκληρύνονται με παραμόρφωση. Ο χαρακτηρισμός temper ακολουθεί τον χαρακτηρισμό του κράματος, με τα δύο να διαχωρίζονται με μια παύλα (π.χ., 3005-H28). Οι βασικοί χαρακτηρισμοί σκλήρυνσης είναι γράμματα. Οι υποδιαίρεσεις των βασικών χαρακτηριστικών δίνονται από έναν ή περισσότερους αριθμούς μετά το γράμμα.

Οι βασικοί χαρακτηρισμοί σκλήρυνσης είναι:

F Αυτή η ονομασία χρησιμοποιείται για σφυρήλατα ή χυτά κράματα που κατασκευάζονται με κάποια διαδικασία διαμόρφωσης όπως έλαση, εξώθηση, σφυρηλάτηση, έλξη ή χύτευση και δεν υπάρχει ειδικός έλεγχος των θερμικών συνθηκών κατά τη διάρκεια της εργασίας ή των διεργασιών σκλήρυνσης, ώστε να επιτευχθούν συγκεκριμένες ιδιότητες. Δεν υπάρχουν καθορισμένα όρια για μηχανικών ιδιοτήτων οποιουδήποτε προϊόντος κατηγορίας F. Εκτός από την περίπτωση των χυτών εξαρτημάτων, τα οποία μπορεί να είναι στην τελική διαμόρφωση, τα περισσότερα κράματα F είναι "ημικατεργασμένα" προϊόντα που θα χρησιμοποιηθούν σε κάποια μεταγενέστερη διαμόρφωση, φινιρίσμα ή θερμική διεργασία για την επίτευξη άλλων τελικών μορφών.

O Αυτή η ονομασία χρησιμοποιείται για σφυρήλατα ή χυτά προϊόντα που διαμορφώνονται με έλαση, εξώθηση, σφυρηλάτηση, το έλξη ή χύτευση και σε κάποιο σημείο της διαδικασίας γίνεται ανόπτηση (δηλαδή, έχει υποβληθεί σε επεξεργασία ανακρυστάλλωσης σε υψηλή θερμοκρασία, επαρκή για την εξάλειψη των επιπτώσεων οποιασδήποτε προηγούμενης διεργασίας ή θερμικής επεξεργασίας και συνήθως καταλήγουν σε πλήρη ανακρυστάλλωση του υλικού). Η επεξεργασία ανόπτησης χρησιμοποιείται για απομείωση της αντοχής στο κράμα που επεξεργάζεται. Ο κύριος λόγος χρήσης μιας τέτοιας επεξεργασίας σε σφυρήλατα κράματα γενικά είναι η μεγιστοποίηση της ολκιμότητας. Το O μπορεί να ακολουθείται από έναν αριθμό διαφορετικό από το μηδέν.

H Αυτή η ονομασία χρησιμοποιείται για μη θερμικά επεξεργασμένα σφυρήλατα κράματα, των οποίων η αντοχή έχει αυξηθεί μέσω σκλήρυνσης λόγω παραμόρφωσης (π.χ.

κύλιση, έλξη) συνήθως σε θερμοκρασία δωματίου. Αυτή η ονομασία μπορεί, αλλά όχι απαραίτητα να ισχύει και σε κράματα που έχουν υποβληθεί σε συμπληρωματικές θερμικές επεξεργασίες ώστε να επιτευχθεί κάποια σταθεροποίηση στο επίπεδο αντοχής τους, καθώς ορισμένα κράματα αλουμινίου θα αποσκληρυνθούν ελαφρώς με την πάροδο του χρόνου μετά την σφυρηλάτιση. Το H ακολουθείται πάντα από δύο ή περισσότερα ψηφία, σκοπός των οποίων είναι να υποδείξουν την κατά προσέγγιση ποσότητα ψυχρής έλασης και τη φύση τυχόν θερμικών επεξεργασιών που ακολούθησαν. Η αρίθμηση τους αναφέρεται παρακάτω.

W Αυτή η ονομασία είναι περιορισμένη στη χρήση της και ισχύει μόνο για κράματα που παλαιώνονται φυσικά μετά από θερμική επεξεργασία (διατήρηση σε υψηλή θερμοκρασία ακολουθούμενη από σβήσιμο ή σχετικά γρήγορη ψύξη σε θερμοκρασία δωματίου). Μπορούν να προστεθούν ψηφία για να χαρακτηρίσουν πιο συγκεκριμένα τον χρόνο που έχει παρέλθει από τότε που έλαβε χώρα η ψύξη, αυτό όμως δεν είναι απαραίτητο και έχει περιορισμένη σημασία, καθώς ο χρόνος μπορεί να συνεχίσει να αυξάνεται, αλλά είναι χρήσιμο σε οποιαδήποτε μεταγενέστερη επεξεργασία να γνωρίζουμε τον χρόνο που έχει παρέλθει από την κατασκευή του και τις επιπτώσεις του. Δεν υπάρχουν δημοσιευμένα τυπικά όρια ιδιοτήτων για τα σφυρήλατα κράματα που να σχετίζονται με την W και σπάνια είναι ολοκληρωμένη (δηλ. πωλείται σε αυτήν την κατάσταση και βρίσκεται "σε εξέλιξη", θα επακολουθήσουν μηχανικές ή θερμικές επεξεργασίες).

T Αναφέρεται σε κράματα με θερμική επεξεργασία διαφορετική από τις προηγούμενες. Η ονομασία T είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη για κράματα που υποβάλλονται σε θερμική επεξεργασία και ισχύει για οποιαδήποτε μορφή κράματος θερμικά επεξεργάσιμου που έχει υποβληθεί σε θερμική επεξεργασία διαλύματος με κατάλληλο σβήσιμο είτε φυσικό (δηλαδή στον αέρα) είτε τεχνητό (δηλαδή σε κλίβανο) παλαίωση. Το T ακολουθείται πάντα από ένα ή περισσότερα ψηφία που ορίζουν τις επόμενες επεξεργασίες του.

Για σκληρύνσεις μέσω παραμόρφωσης το πρώτο ψηφίο που ακολουθείται μετά το H δηλώνει:

H1 Σκλήρυνση μέσω παραμόρφωσης μόνο. Ισχύει για προϊόντα που σκληρύνονται με παραμόρφωση για να αποκτήσουν την επιθυμητή αντοχή χωρίς συμπληρωματική θερμική

επεξεργασία. Ο αριθμός που ακολουθεί αυτή την ονομασία υποδεικνύει το βαθμό σκλήρυνσης. Παράδειγμα: 1300-H14.

H2 Σκλήρυνση με παραμόρφωση και μερική ανόπτηση. Ισχύει για κράματα, τα οποία έχουν σκληρυνθεί με παραμόρφωση σε μεγαλύτερο βαθμό από τον επιθυμητό και στη συνέχεια αναδιατάσσεται η αντοχή στο επιθυμητό επίπεδο με μερική ανόπτηση. Για τα κράματα που παλαιώνονται σε θερμοκρασία δωματίου, η σκλήρυνση H2 έχει την ίδια αντοχή σε εφελκυσμό με την αντίστοιχη σκλήρυνση H3. Για άλλα κράματα, η σκλήρυνση H2 έχει την ίδια αντοχή σε εφελκυσμό με την αντίστοιχη H1 και ελαφρώς μεγαλύτερη επιμήκυνση. Ο αριθμός που ακολουθεί αυτή την ονομασία υποδεικνύει τη σκλήρυνση που απομένει μετά τη μερική ανόπτηση του προϊόντος. Παράδειγμα: 3005-H28.

H3 Σκλήρυνση με παραμόρφωση και σταθεροποίηση. Εφαρμόζεται σε κράματα τα οποία έχουν σκληρυνθεί με παραμόρφωση και οι μηχανικές ιδιότητες τους σταθεροποιούνται είτε με θερμική επεξεργασία σε χαμηλή θερμοκρασία είτε ως θερμότητα που εισάγεται στην φάση της κατασκευής. Η σταθεροποίηση συνήθως βελτιώνει την ολκιμότητα. Αυτή η ονομασία ισχύει μόνο για εκείνα τα κράματα τα οποία εκτός από σταθεροποίηση, αποσκληρύνονται σταδιακά σε θερμοκρασία δωματίου. Ο αριθμός που ακολουθεί αυτή την ονομασία υποδεικνύει τον βαθμό σκλήρυνσης σε παραμόρφωση που απομένει μετά τη σταθεροποίηση. Παράδειγμα: 5005-H34.

H4 Σκλήρυνση με παραμόρφωση και λακάρισμα ή βαφή. Ισχύει για κράματα που έχουν σκληρυνθεί με τάσεις και υποβάλλονται σε θερμοκρασιακή μεταβολή κατά τη διάρκεια της βαφής ή του λακαρίσματος. Ο αριθμός που ακολουθεί μετά το 4 υποδεικνύει τον βαθμό σκλήρυνσης που απομένει μετά τη θερμική επεξεργασία του προϊόντος ως μέρος της σκλήρυνσης βαφής ή λάκας. Ισχύουν τα αντίστοιχα όρια μηχανικών ιδιοτήτων H2X ή H3X.

Το ψηφίο που ακολουθεί την ονομασία H1, H2, H3 ή H4 υποδεικνύει το βαθμό σκλήρυνσης από την παραμόρφωση. Ο αριθμός 8 αντιστοιχεί στην υψηλότερη αντοχή εφελκυσμού που παράγεται. Ο αριθμός 4 αντιστοιχεί σε τιμές τάσης εφελκυσμού, που βρίσκονται μεταξύ της σκλήρυνσης O και της HX8. Ο αριθμός 2 είναι για σκληρύνσεις των οποίων η εφελκυστική αντοχή τους είναι περίπου στο μέσον της σκλήρυνσης O και της HX4. Ο αριθμός 6 είναι για σκλήρυνση όπου η τελική αντοχή βρίσκεται περίπου στο μέσο της HX4 και της HX8. Οι αριθμοί 1, 3, 5 και 7 δηλώνουν παρομοίως ενδιάμεσες αντοχές μεταξύ αυτών

που ορίζονται παραπάνω. Ο αριθμός 9 δηλώνει θερμοκρασίες των οποίων η ελάχιστη τελική αντοχή σε εφελκυσμό υπερβαίνει αυτή των θερμοκρασιών HX8 κατά 15 MPa ή περισσότερο.

Το τρίτο ψηφίο, όταν χρησιμοποιείται, υποδεικνύει μια διακύμανση του βαθμού της σκλήρυνσης ή των μηχανικών ιδιοτήτων μιας διψήφιας σκλήρυνσης. Ένα παράδειγμα είναι το καλούπι ή το ανάγλυφο φύλλο που κατασκευάζεται από τις σκληρύνσεις H12, H22 ή H32 σε αυτά προστίθεται τρίτο ψηφίο σκληρότητας H124, H224 ή H324 αντίστοιχα, καθώς η πρόσθετη σκλήρυνση από την κοίλανση προκαλεί μια μικρή αλλαγή στις μηχανικές ιδιότητες Kaufman, J.G., (2000).

Αντίστοιχη αρίθμηση χαρακτηρισμών σκλήρυνσης υπάρχει και για το γράμμα T, όμως δεν θα επεκταθούμε στην σημασία τους, καθώς δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας έρευνας. Στη συνέχεια αναλυθεί επεξήγηση της ονομασία του κράματος ENAW-3005-H28 που αποτελεί υλικό κατασκευής του φύλλου που μελετάμε.

2.8.1 ΚΡΑΜΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ EN AW-3005 (ALMN1MG0.5 H28)

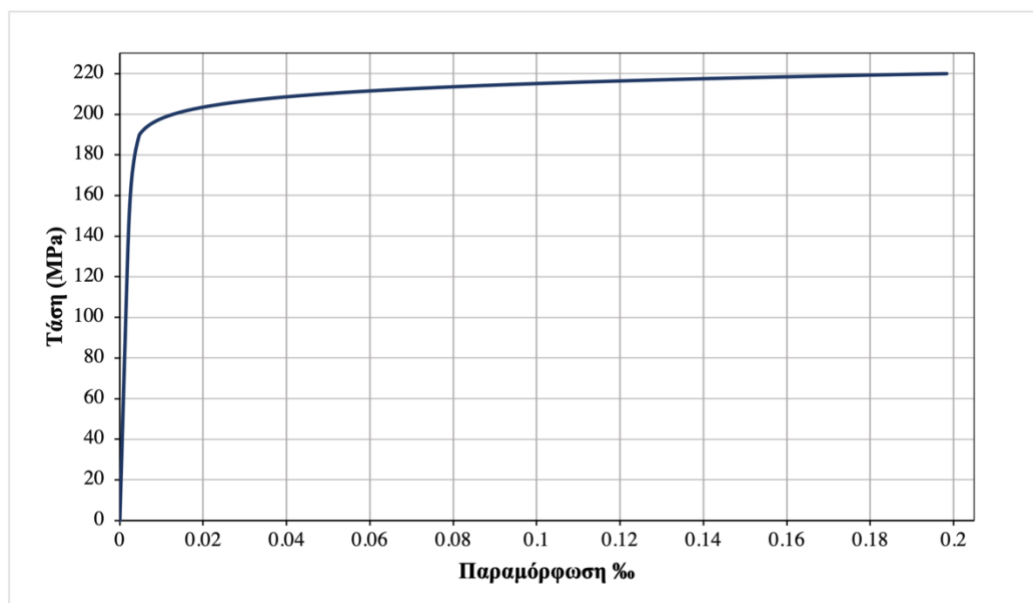
Το φύλλο που μελετάμε κατασκευάζεται από κράμα αλουμινίου, το οποίο αποτελείται από αλουμίνιο (Al) κατά 95.7-98.8%, μαγγάνιο (Mn) κατά 1-1.5%, μαγνήσιο (Mg) κατά 0.2-0.7% και άλλα μέταλλα των οποίων η περιεκτικότητα είναι τόσο μικρή που θεωρείται αμελητέα, επομένως αναγράφονται τα τρία κύρια στοιχεία που προαναφέρθηκαν. Τα κράματα αλουμινίου-μαγγανίου έχουν μέτρια αντοχή, καλή αντοχή στη διάβρωση, αρκετά μεγάλη ικανότητα μορφοποίησης και είναι ικανά να χρησιμοποιηθούν σε υψηλές θερμοκρασίες.

Το 3 στην ονομασία του συμβολίζει την ύπαρξη μαγγανίου ως κύριο κραματικό στοιχείο, το οποίο έχει την ιδιότητα αύξησης της αντοχής του. Επιπροσθέτως έχει καλή αντοχή στη διάβρωση και ευνοϊκό στην κατεργασία του. Το πρώτο μηδενικό δείχνει πως δεν υπάρχουν διαφορές από το αρχικό κράμα, ενώ το 05 την ύπαρξη μαγνησίου. Το μέτρο ελαστικότητας του κράματος είναι περίπου 72.000 MPa ανάλογα την περιεκτικότητα των στοιχείων, ο λόγος Poisson είναι ίσος με 0.33, συνεπώς το μετρό διάτμησης προκύπτει 27.000 MPa από την εξίσωση (2.1).

Από το γράμμα Η συμπεραίνεται πως είναι μη θερμικά επεξεργασμένο σφυρήλατο κράμα το οποίο έχει αυξημένη αντοχή μέσω σκλήρυνσης με παραμόρφωση, συνήθως σε θερμοκρασία δωματίου αλλά και με συμπληρωματικές θερμικές επεξεργασίες.

Το Η στη συγκεκριμένη περίπτωση ακολουθείται από το 2 που αντιπροσωπεύει σκλήρυνση παραμόρφωσης, που ακολουθείται από μερική θερμική επεξεργασία ανακρυστάλλωσης σε υψηλή θερμοκρασία (δηλαδή, μερική ανόπτηση) για να επαναφέρει τις ιδιότητες σε κάποιο σταθερό επίπεδο μικρότερο από αυτό που επιτυγχάνεται με την ψυχρή έλαση. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται σκόπιμα καθώς το κράμα έχει σκληρυνθεί με παραμόρφωση μεγαλύτερη από την επιθυμητή με αποτέλεσμα να έχει ψαθυρό χαρακτήρα, που το καθιστά ακατάλληλο να διαμορφωθεί. Το 8 υποδηλώνει πως έχει εναπομείνει η μεγαλύτερη δυνατή σκληρότητα μετά τη διαδικασία μερικής ανόπτησης.

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 9 μέρος 1-4 πίνακας 3.1 (EN 1999-1-4 table 3.1) το κράμα αλουμινίου EN AW-3005 έχει τα ακόλουθα όρια: τάση διαρροής (proof strength $f_{0.2}$ 190 MPa) και εφελκιστική αντοχή (ultimate tensile strength f_u 220 MPa). Βάση του Ευρωκώδικα 9 μέρος 1-1 παράρτημα Ε υποπαράγραφος Ε2.2.2 (EN 1999-1-1 Annex E, E2.2.2) από τις εξισώσεις Ε.10 Ε.11 Ε.12 λαμβάνουμε το διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων (stress strain $\epsilon=\epsilon(\sigma)$) του σχήματος 2.11.



Σχήμα 2.11: Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων (stress-strain) βάσει του EN 1999-1-1 Annex E, E2.2.2.

3 Περιγραφή του Προβλήματος

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται το πρόβλημα που αποτελεί αντικείμενο ενασχόλησης της παρούσας εργασίας. Παρουσιάζεται το τραπεζοειδές φύλλο αλουμινίου, εξετάζεται ο τύπος της καταπόνησης που υφίσταται και επισημαίνονται τα φαινόμενα που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών.

3.1 Φυσικό Πρόβλημα

Το πρόβλημα που μελετάται στην εργασία αυτή, είναι η μη γραμμική υπολογιστική διερεύνηση της καμπτικής συμπεριφοράς τραπεζοειδών φύλλων αλουμινίου υπό την επίδραση συγκεντρωμένης δύναμης στο μέσον τους (σχήμα 3.1). Η αριθμητική επίλυση του προβλήματος γίνεται μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, ενώ παράλληλα πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές στο εργαστήριο τεχνολογίας και κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης των δοκιμών παρατηρείται σταδιακή βύθιση στο



Σχήμα 3.1: Φύλλο αλουμινίου υπό συγκεντρωμένη φόρτιση (στιγμιότυπο από το εργαστήριο τεχνολογίας και κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος).

μέσον του τραπεζοειδούς φύλλου σε συνδυασμό με το ανασήκωμα των άκρων του από τα σημεία των στηρίξεων και μετά.

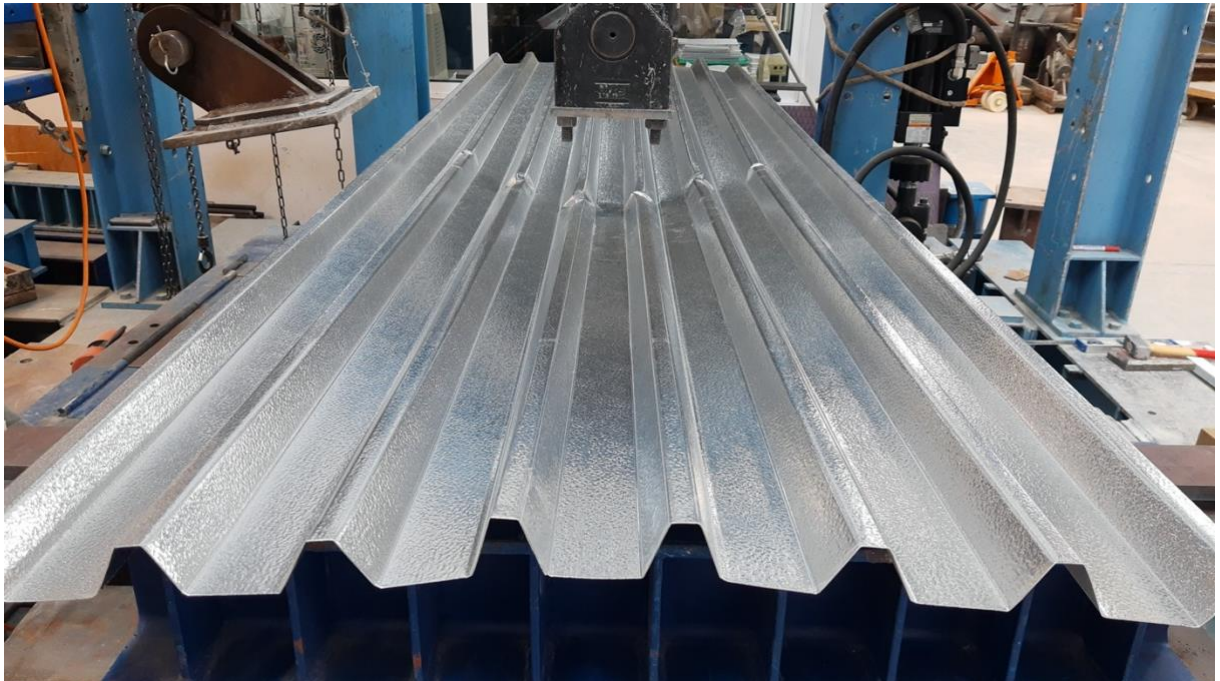
Με την παρέλευση ενός χρονικού διαστήματος φόρτισης τα κεντρικά άνω πέλματα λυγίζουν ξαφνικά (σχήμα 3.2) φέρνοντας ως αποτέλεσμα μεγάλη βύθιση στο μέσον. Έπειτα το φύλλο αλουμινίου ισορροπεί στη νέα παραμορφωμένη κατάσταση και συνεχίζει να παραλαμβάνει φόρτιση, μέχρι να ξανά επαναληφθεί το ίδιο φαινόμενο, σ' ένα σύντομο χρονικό διάστημα, αλλά αυτή τη φορά στα επόμενα άνω πέλματα. Παρά τις βλάβες το φύλο αλουμινίου ισορροπεί για ακόμη μία φορά, ώσπου το φαινόμενο αυτό εμφανιστεί ξανά και επέλθει η κατάρρευση του (σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.2: Πρώτη εμφανή παραμόρφωση στο φορέα. Εμφάνιση τοπικού λυγισμού στα κεντρικά άνω πέλματα (στιγμιότυπο από το εργαστήριο τεχνολογίας και κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος).

Όπως είναι αντιληπτό το φύλλο αλουμινίου δεν έφτασε στα όρια της αντοχής του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο, δηλαδή οι αναπτυσσόμενες τάσεις στην επιφάνεια του φύλλου στα κρίσιμα σημεία δεν έλαβαν την κρίσιμη τιμή αστοχίας του υλικού (Material failure). Αστόχησε λόγω της αδυναμίας του να ισορροπήσει στην παραμορφωμένη κατάσταση που βρισκόταν, δηλαδή λόγω φαινομένων αστάθειας (instability failure). Αυτό συνέβη εξαιτίας ενός φαινομένου που ονομάζεται τοπικός λυγισμός και συναντάται σε στοιχεία όπως οι δοκοί, τα υποστυλώματα, τα κελύφη και άλλα μέλη που λειτουργούν ως φέροντες οργανισμοί σε μία κατασκευή παραλαμβάνοντας θλιπτικά φορτία. Γενικότερα είναι ένα σύνηθες πρόβλημα στις κατασκευές πολιτικού μηχανικού. Ο τοπικός λυγισμός αντιμετωπίζεται ως πρόβλημα αστάθειας. Ο φορέας ή το δομικό στοιχείο αδυνατεί να

ισορροπήσει με αποτέλεσμα να λυγίσει εμφανίζοντας έντονες παραμορφώσεις. Μετά τον τοπικό λυγισμό είναι δυνατόν να επέλθει η πλήρη απώλεια της ικανότητας του στοιχείου, εφόσον αυτό έχει καταρρεύσει και δεν καταφέρει να ισορροπήσει σε μία νέα θέση. Συνεπώς η αποτροπή του φαινομένου δεν επιτυγχάνεται με την αύξηση της αντοχής, αλλά με την αύξηση της δυσκαμψίας.



Σχήμα 3.3: Κατάρρευση φορέα λόγω φαινομένων αστάθειας (τοπικός λυγισμός), (στιγμιότυπο από το εργαστήριο τεχνολογίας και κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος).

Ο τοπικός λυγισμός είναι αποτέλεσμα θλίψης, κάμψης ή και των δύο και αποτελεί ένα είδος λυγισμού. Ο λυγικός είναι η γενικότερη μορφή αστοχίας και διαχωρίζεται ανάλογα με τον τρόπο φόρτισης στις ακόλουθες μορφές: καμπτικό, πλευρικό (στρεπτο-καμπτικό), τοπικό και διατμητικό. Στο μελετώμενο πρόβλημα όπως προαναφέρθηκε το είδος του λυγισμού που συναντάται είναι τοπικός καθώς συναντάται σε μικρά τμήματα του φορέα, στα οποία τα πέλματα της διατομής λυγίζουν ενώ οι διαμήκης πλευρές παραμένουν σταθερές. Στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει επεξήγηση αυτών των όρων και των φαινομένων.

4 Ευστάθεια

4.1 Λυγισμός

4.1.1 ΘΕΜΕΛΙΩΔΗΣ ΟΡΙΣΜΟΙ

Στο παρών κεφάλαιο θα αναφερθούμε στους ορισμούς της ευστάθειας, της αστάθειας, του φορτίου λυγισμού και του μέγιστου φορτίου. Όλοι οι ορισμοί αναφέρονται στην κατάσταση ισοροπίας, στην οποία το μηχανικό σύστημα βρίσκεται σε ηρεμία. Η διαμόρφωση ενός μηχανικού συστήματος είναι η γεωμετρική περιγραφή της ταυτόχρονης θέσης όλων των σωματιδίων ή «υλικών σημείων» που αποτελούν το σύστημα. Οποιαδήποτε κίνηση υλικών σημείων ενός μηχανικού συστήματος, δηλ. οποιαδήποτε αλλαγή στη διαμόρφωση επιφέρει μετατόπιση. Η πλήρης περιγραφή των μετατοπίσεων περιλαμβάνει επίσης την έννοια ενός περιορισμού μετακίνησης στο σύστημα, όπως στα άκρα μιας ράβδου ή στις άκρες μιας πλάκας ή κελύφους, δηλαδή στα όρια του μηχανικού συστήματος ή γενικότερα οπουδήποτε στο μηχανικό σύστημα. Αυτοί οι περιορισμοί αποτελούν τις συνοριακές συνθήκες του συστήματος. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στους περιορισμούς λειτουργούν ως αντιδράσεις στήριξης. Για να περιγράψουν όλα τα παραπάνω είναι απαραίτητο ένα σύστημα συντεταγμένων ή ένα σύστημα αναφοράς Jones, R.M., (2006).

4.1.2 ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ

Ευστάθεια, είναι η κατάσταση ισοροπίας ενός δομικού στοιχείου ή μηχανικού συστήματος που είναι σταθερή, δηλαδή εάν μία «μικρή» διαταραχή του συστήματος οδηγεί σε μία μόνο «μικρή» απόκριση, μετά την οποία η δομή επιστρέφει πάντα στην αρχική κατάσταση ισοροπίας. Ο όρος «μικρή» είναι ένας σχετικός όρος που διασφαλιστεί ότι η κατάσταση ισοροπίας επέρχεται άμεσα.



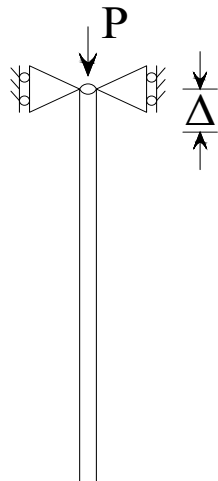
Σχήμα 4.1: Σφαίρα που ισορροπεί σε τμήμα κύκλου.

Πηγή: [Κουνάδης, Α.Ν., \(1997\)](#)

Το απλούστερο παράδειγμα ενός ευσταθούς μηχανικού συστήματος είναι μια άκαμπτη σφαίρα που ισορροπεί στο εσωτερικό ενός κυκλικού τμήματος όπως στο σχήμα 4.1. Η σφαίρα μπορεί να διαταραχθεί ελαφρώς με ένα χτύπημα, αλλά πάντα επιστρέφει στην αρχική κατάσταση ισορροπίας. Ωστόσο, αν δώσουμε μεγάλη διαταραχή στην σφαίρα, τότε δεν μπορούμε πούμε ακριβώς τι θα συμβεί από το σχήμα 4.1, θα μπορούσε ακόμη και να εκτοπιστεί από το κυκλικό τμήμα.

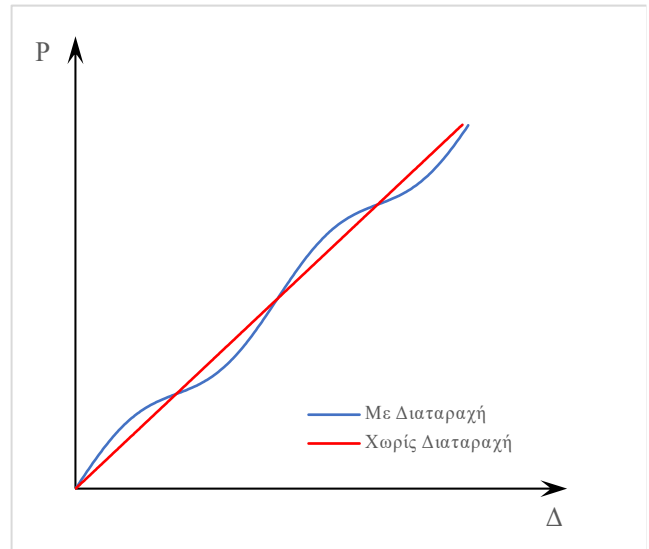
Το απλούστερο παράδειγμα ευσταθούς δομικού στοιχείου είναι μια ευθύγραμμη ράβδος η οποία φορτίζεται αξονικά με ένα φορτίο P (σχήμα 4.2). Στο κάτω άκρο της δεσμεύεται με μία άρθρωση ενώ στο άνω άκρο απαγορεύεται η οριζόντια μετακίνηση μέσω δύο κυλίσεων, για πολύ μικρή αύξηση του φορτίου σε συνάρτηση με το χρόνο, δηλαδή σχεδόν στατική φόρτιση, η ράβδος παραμένει ευθύγραμμη αλλά στην αξονική διεύθυνση παρατηρούμε μία μικρή βράχυνση. Ωστόσο, αυτή η σταθερή συμπεριφορά της ράβδου κατά την οποία παραμένει ευθύγραμμη συμβαίνει μόνο εάν το φορτίο είναι αρκετά μικρό.

Το φορτίο P , έναντι της αξονικής βράχυνσης Δ έχει την συμπεριφορά που φαίνεται στο σχήμα 4.3. Στην περίπτωση ύπαρξης διαταραχής, συμπεριφέρεται σαν να ασκείται μία περιοδική πλευρική δύναμη (μπλε γραμμή στο σχήμα 4.3). Κάθε σημείο σε κάθε καμπύλη αντιπροσωπεύει μια κατάσταση ισορροπίας, επομένως οι καμπύλες είναι μονοπάτια ισορροπίας. Όταν εφαρμόζεται κάποια μορφή μικρής πλευρικής διαταραχής στη ράβδο εκτός από το στατικά αυξανόμενο αξονικό φορτίο, η συμπεριφορά φορτίου-βύθισης είναι μια διαδρομή ισορροπίας κοντά στη συμπεριφορά καθαρού αξονικού φορτίου (κόκκινη γραμμή στο σχήμα 4.3). Δηλαδή, η επίδραση των πλευρικών διαταραχών είναι μόνο μια μικρή διαταραχή στη φύση της μη διαταρασσόμενης συμπεριφοράς του αξονικού φορτίου εκτροπής. Η αξονικά φορτισμένη ράβδος είναι σταθερή και επιστρέφει στην αρχική της κατάσταση, ακριβώς όπως η σφαίρα στο σχήμα 4.1 Κουνάδης, Α.Ν., (1997).



Σχήμα 4.3: Αξονικά φορτιζόμενη ράβδος.

Πηγή: [Jones R.M. \(2006\)](#)



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα φορτίου-βύθισης ράβδου υπό αξονική φόρτιση με και χωρίς διαταραχές.

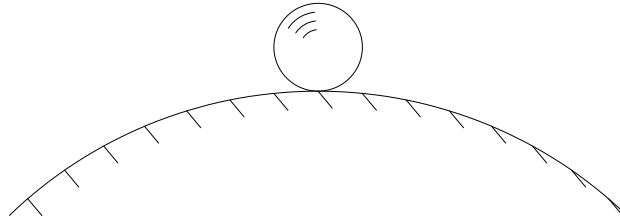
Πηγή: [Jones R.M. \(2006\)](#)

4.1.3 ΑΣΤΑΘΕΙΑ

Η αστάθεια είναι ένα φαινόμενο, κατά το οποίο η ισορροπία ενός δομικού στοιχείου ή ενός συστήματος δομικών στοιχείων, για οποιαδήποτε «μικρή» διαταραχή παρουσιάζεται μια ξαφνική αλλαγή στον τρόπο παραμόρφωσης ή στην τιμή της μετατόπισης και το σύστημα δεν επανέρχεται ξανά στην αρχική του κατάσταση.

Το απλούστερο παράδειγμα ασταθούς μηχανικού συστήματος είναι μια άκαμπτη σφαίρα που ισορροπεί στην κορυφή ενός τμήματος κύκλου όπως στο σχήμα 4.4. Εάν η σφαίρα διαταραχθεί ελαφρά (μια απειροελάχιστη ενόχληση αρκεί), αμέσως θα κυλήσει προς τα κάτω και δεν θα επιστρέψει ποτέ στην αρχική της θέση. Έτσι, η σφαίρα βρίσκεται σε κατάσταση ασταθούς ισορροπίας στην κορυφή του τμήματος κύκλου. Εάν η σφαίρα βρισκόταν σε ισορροπία στο εσωτερικό τμήμα του κύκλου και αυτό περιβάλλεται από όμοια τμήματα των οποίων η καμπυλότητα εναλλάσσεται όπως στο σχήμα 4.5, τότε η σταθερότητα της σφαίρας εξαρτάται από το μέγεθος της πλευρικής διαταραχής που εφαρμόζεται. Εάν η διαταραχή είναι αρκετά μεγάλη (δηλαδή, μια κίνηση μεγαλύτερη από τη διάσταση d στο σχήμα 4.5), τότε προφανώς η σφαίρα είναι ασταθής. Εάν η διαταραχή είναι αρκετά μικρή

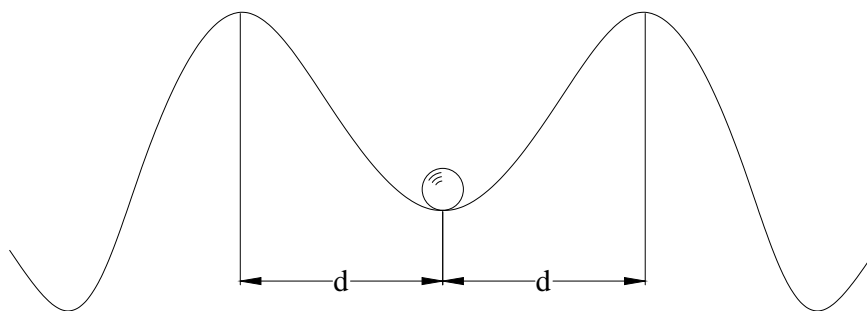
(δηλαδή, μια κίνηση μικρότερη από τη διάσταση d στο σχήμα 4.5), τότε η σφαίρα είναι ευσταθής και επιστρέφει στη θέση ισορροπίας της.



Σχήμα 4.4: Σφαίρα σε επισφαλή θέση ισορροπίας στο άνω μέρος τμήματος κύκλου.

Πηγή: [Κουνάδης, Α.Ν. \(1997\)](#)

Το απλούστερο παράδειγμα ασταθούς δομικού στοιχείου είναι η αξονικά φορτισμένη ράβδος στο σχήμα 4.2. Όταν το φορτίο λάβει μία υψηλή τιμή η κατασκευή η ράβδος θα συνεχίσει να βραχύνεται. Δηλαδή, η ράβδος θα μπορούσε να παραμορφώνεται στην ευθεία διατηρώντας την ισορροπία της τον κατακόρυφο άξονα, αλλά η παραμικρή διαταραχή θα αναγκάσει τη ράβδο να λυγίσει ξαφνικά και τώρα θα είναι λυγισμένη αλλά σε νέα θέση, όπως ακριβώς η σφαίρα στο σχήμα 4.5 κυλά από την κορυφή του τμήματος κύκλου στο επόμενο κοίλο τμήμα ισορροπώντας εκεί Κουνάδης, Α.Ν., (1997).

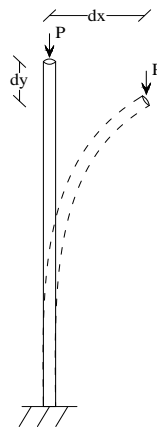


Σχήμα 4.5: Σφαίρα με αρχικά ασφαλή θέση.

Πηγή: [Jones R.M. \(2006\)](#)

4.1.4 ΦΟΡΤΙΟ ΛΥΓΙΣΜΟΥ

Το φορτίο λυγισμού είναι το φορτίο στο οποίο η τρέχουσα κατάσταση ισορροπίας ενός δομικού στοιχείου ή μίας κατασκευής αλλάζει ξαφνικά από ευσταθές σε ασταθές και ταυτόχρονα το φορτίο στο οποίο η τρέχουσα κατάσταση ισορροπίας παύει να ισχύει και ισορροπεί σε μια νέα. Έτσι, το φορτίο λυγισμού είναι το μεγαλύτερο φορτίο για το οποίο υπάρχει ισορροπία ενός δομικού στοιχείου ή μίας κατασκευής στην αρχική κατάσταση ισορροπίας του.

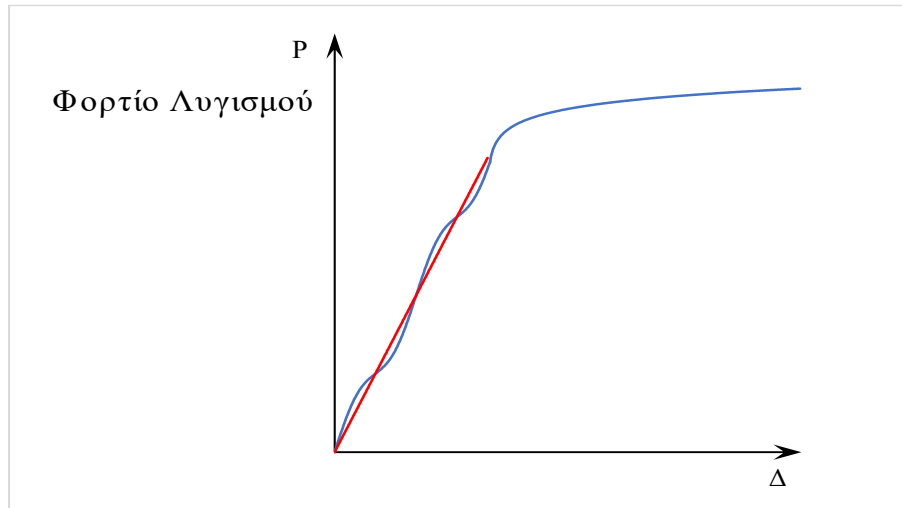


Σχήμα 4.6: Ράβδος στη νέα θέση ισορροπίας μετά το λυγισμό.

Πηγή: [Jones R.M. \(2006\)](#)

Ένα παράδειγμα είναι η αξονική φόρτιση μίας ράβδου με ένα κατακόρυφο φορτίο στη στέψη της (σχήμα 4.6), η οποία βραχύνεται κατά την αξονική διεύθυνση. Καθώς αυξάνεται το φορτίο, για απειροστή αύξηση παρουσιάζεται μία μεγάλη και απότομη πλευρική και αξονική απόκριση, έχει επέλθει δηλαδή το φορτίο λυγισμού (σχήμα 4.6 παρατηρούμε πολύ μεγάλη μετατόπιση για ελάχιστη αύξηση του φορτίου). Η ισορροπία της ράβδου γίνεται ασταθής, επομένως πρέπει να αναζητήσει μια νέα θέση ισορροπίας. Αυτή η ισορροπία θα επέλθει σε μία θέση εκτός του άξονα της ράβδου, καθώς η στέψη της έχει μετακινηθεί και στους δύο άξονες και η ράβδος έχει λυγισμένη μορφή. Σε αυτή την νέα θέση η ράβδος μπορεί να συνεχίσει να παραλαμβάνει φορτίο. Αυτή η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί κι άλλες φορές μέχρι να καταρρεύσει ο φορέας. Η αλλαγή αυτή δεν είναι αποτέλεσμα του υπερκερασμού της αντοχής του υλικού αλλά συμβαίνει εξαιτίας της αστάθειας του φορέα και εξαρτάται κυρίως από την γεωμετρία. Αυτή η συμπεριφορά είναι αρκετά παρόμοια με εκείνη της σφαίρας στην κοιλάδα, μόλις η δύναμη που της ασκηθεί είναι

τέτοια ώστε να υπερπηδήσει τον λόφο, κυλά στην επόμενη κοιλάδα που πρόκειται να ισορροπήσει ή να την περάσει και εκείνη. Η γεωμετρία των λόφων και των κοιλάδων καθορίζουν το μέτρο της δύναμης που πρέπει να ασκηθεί ώστε η σφαίρα να υπερπηδήσει έναν ή περισσότερους λόφους Jones, R.M., (2006).



Σχήμα 4.7: Ποιητικό διάγραμμα φορτίου-μετακίνησης ράβδου κατά τη διάρκεια αυξανόμενης φόρτισης με τη συμβολή διαταραχής. (Παρατηρούμε ότι η δυσκαμψία της ράβδου μειώνεται ραγδαία και σιγά σιγά αρχίζει να παραλαμβάνει ξανά φορτίο στη νέα θέση ισορροπίας).

4.1.5 ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ

Το μέγιστο φορτίο μιας κατασκευής ή δομικού στοιχείου είναι το μεγαλύτερο φορτίο που δύναται να παραλάβει η κατασκευή χωρίς να επέλθει αστοχία είτε λόγω φαινομένων αστάθειας είτε λόγω υπερκερασμού της αντοχής του υλικού.

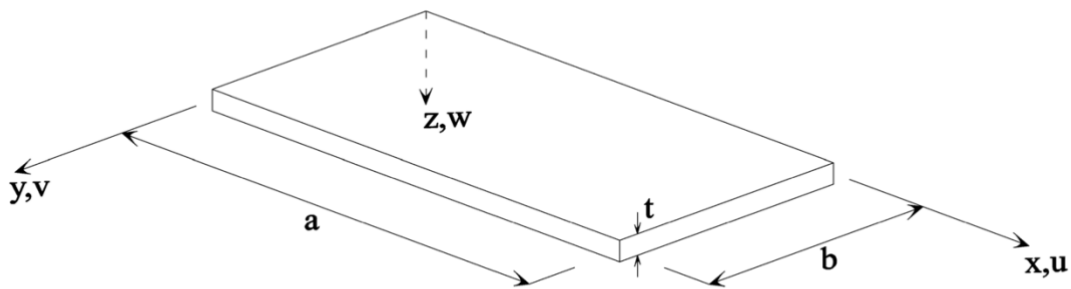
Η έννοια του μέγιστου φορτίου είναι μείζονος σημασίας στον δομικό σχεδιασμό. Στο σχεδιασμό επιδιώκουμε να διαμορφώσουμε μια κατασκευή, ώστε να φέρει ένα συγκεκριμένο φορτίο με προδιαγεγραμμένο συντελεστή ασφάλειας έναντι αστοχίας. Ωστόσο, μια προφανώς σχετική έννοια είναι ο προσδιορισμός του πόσο φορτίο θα φέρει μια συγκεκριμένη κατασκευή, χωρίς οποιαδήποτε αστοχία. Αυτές οι έννοιες συνδέονται στενά, γιατί πρέπει να είμαστε σε θέση να αναλύσουμε μια δομή προτού μπορέσουμε να τη σχεδιάσουμε.

Η μέγιστη ικανότητα παραλαβής φορτίου ενός δομικού στοιχείου, δεν καθορίζεται απαραίτητα από το φορτίο λυγισμού, επειδή ο λυγισμός είναι μόνο ένας από τους πολλούς

πιθανούς τρόπους αστοχίας. Η αστοχία θα μπορούσε να συμβεί με θραύση (αστοχία υλικού λόγω υπερβολικών τάσεων) ή με διαρροή (μεγάλη ή ελεγχόμενη βλάβη). Διαφορετικά, μπορεί οι παραμορφώσεις της κατασκευής, να είναι πολύ μεγάλες ώστε να είναι εφικτή η χρήση της. Για παράδειγμα, ένας κινούμενος βραχίονας σε ένα μηχάνημα μπορεί να λυγίσει τόσο πολύ, ώστε ο βραχίονας να έρθει σε επαφή με ένα άλλο μέρος του μηχανήματος και να μπλοκάρει με αποτέλεσμα το μηχάνημα να σταματήσει. Έτσι, η λειτουργία του συστήματος απέτυχε παρόλο που δεν έσπασε Jones, R.M., (2006).

4.1.6 ΛΥΓΙΣΜΟΣ ΠΛΑΚΙΔΙΩΝ

Το πλακίδιο (σχήμα 4.8) είναι ένα επίπεδο δομικό στοιχείο με δύο μεγάλες διαστάσεις a και b στο επίπεδό του και μία πολύ μικρότερη κάθετη στο επίπεδο αυτό, το λεγόμενο πάχος (t). Το πλακίδιο φορτίζεται μόνο στο επίπεδο του. Στις προσομοιώσεις και στις αναλύσεις λυγισμού μοντελοποιείται ως ένα τέλει επίπεδο στοιχείο, δηλαδή η εγκάρσια αρχική



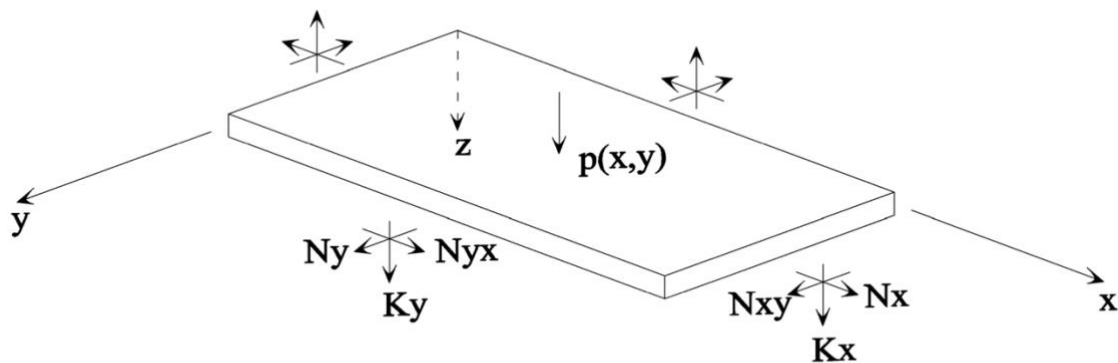
Σχήμα 4.8: Γεωμετρία πλακιδίου, λόγος πλευρών a/b .

Πηγή: [Jones R.M. \(2006\)](#)

απόκλιση w είναι μηδενική καθ' όλη την επιφάνεια του πλακιδίου. Επομένως οι κλίσεις w_x και w_y και οι καμπυλότητες w_{xx} , w_{xy} και w_{yy} είναι αρχικά μηδενικές. Στο επίπεδο u και v δεν τίθενται τέτοιου είδους περιορισμοί μετακινήσεων. Οι παραμορφώσεις εντός του επιπέδου είναι δυνατές για φορτία που ασκούνται κάθετα στο επίπεδο του πλακιδίου, τα φορτία που ασκούνται εγκάρσια στο πλακίδιο δεν προκαλούν λυγισμό. Καθώς το φορτίο εντός του επιπέδου αυξάνεται, αυξάνονται και οι παραμορφώσεις μέχρις ότου να εμφανιστεί ξαφνικά μία απόκλιση στην επιπεδότητα με κλίση στην διεύθυνση z . Στη συνέχεια η εγκάρσια απόκλιση, οι κλίσεις και οι καμπυλότητες γίνονται μη τετριμμένες, δηλαδή αποκτούν μη μηδενικές τιμές. Γενικότερα, το πλακίδιο υφίσταται μια απόκλιση από μία επίπεδη

κατάσταση ισορροπίας, σε μια κατάσταση που είναι υπόκλιση κατά την z διεύθυνση. Αυτό το ονοεί στατικό φορτίο στο οποίο παρατηρείται αυτή η καμπύλωση είναι το φορτίο λυγισμού.

Οι δυνάμεις και οι ροπές που αναπτύσσονται σ' ένα πλακίδιο ορίζονται στα σχήματα 4.9 και 4.10. Οι αναλύσεις της παρούσας εργασίας πραγματοποιούνται με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method F.E.M.) η οποία είναι μια ισχυρή αριθμητική μέθοδος, μέσω της οποίας υπολογίζονται οι τάσεις σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο μέσω των μετακινήσεων στους κόμβους του. Για αυτό το λόγο δεν εμβαθύνουμε στα εντατικά μεγέθη του πλακιδίου. Στο σχήμα 4.11 φαίνονται οι δυνάμεις θλίψης N_x και N_y που προκαλούν λυγισμό. Προφανώς σε τέτοιες εφαρμογές πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι συνοριακές συνθήκες.

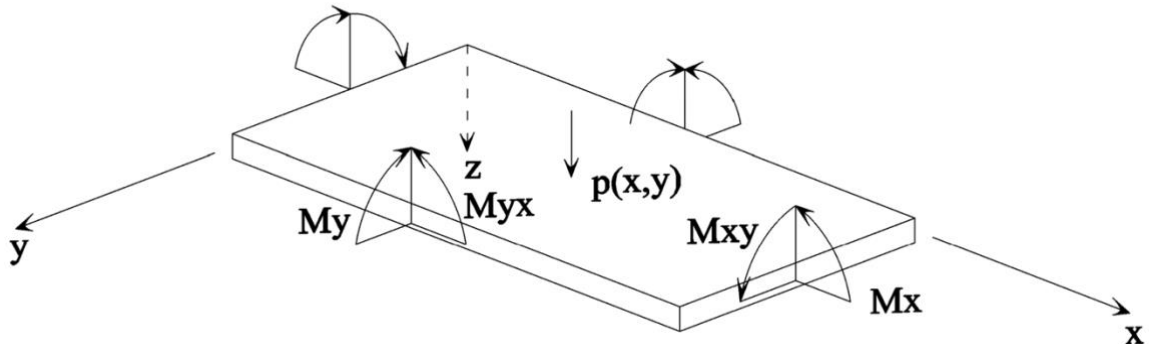


Σχήμα 4.9: Διατμητικές δυνάμεις πλακιδίου υπό συγκεντρωμένη φόρτιση.

Πηγή: [Jones R.M. \(2006\)](#)

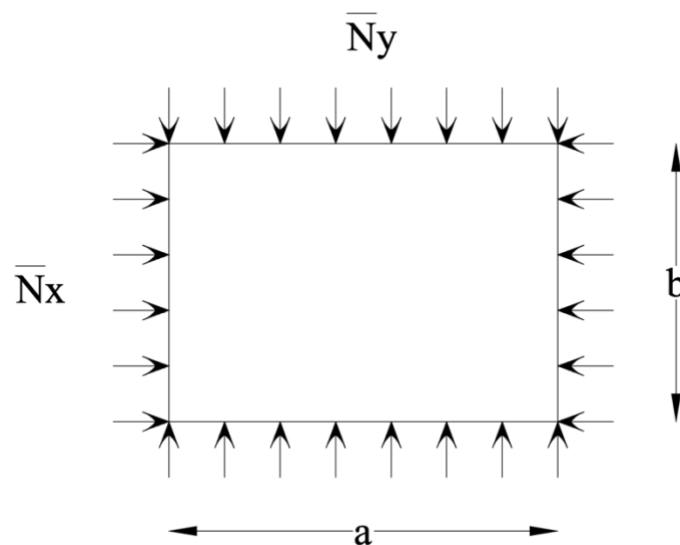
Ένα συγκεκριμένο είδος λυγισμού είναι ο τοπικός λυγισμός, ο οποίος αποτελεί μία κύρια μορφή αστάθειας και προκαλείται λόγω θλίψης, κάμψης ή του συνδυασμού και των δύο. Ο τοπικός λυγισμός συμβαίνει όταν, σε ένα μικρό τμήμα ενός φορέα, η μία ή και οι δύο διαμήκεις πλευρές του παραμένουν ευθείες και τα τοιχώματα της διατομής λυγίζουν (κυρτώνονται). Ευαίσθητα σε τοπικό λυγισμό είναι συγκεκριμένα τμήματα της διατομής δομικών στοιχείων ανάλογα το είδος τους. Τα τμήματα αυτά μπορούν να είναι τα πέλματα, ο κορμός αλλά και τα δύο συνδυαστικά. Στον σχεδιασμό η διαστασιολόγηση γίνεται

σύμφωνα με τις αναλύσεις λυγισμού μιας και αποτελεί την κυριότερη μορφή αστοχίας σε μεταλλικές διατομές Brush, D.O, Almroth, B.O, (1978).



Σχήμα 4.11: Ροπές πλακιδίου υπό συγκεντρωμένη φόρτιση.

Πηγή: [Jones R.M. \(2006\)](#)



Σχήμα 4.10: Τμήμα πλακιδίου που υπόκειται σε δυνάμεις εντός του επιπέδου.

Πηγή: [Jones R.M. \(2006\)](#)

4.1.6.1 Θεμελιώδης Εξισώσεις

Η κλασική ανάλυση του λυγισμού των πλακιδίων εξηγείται καλύτερα σε ένα παράδειγμα ορθογώνιου πλακιδίου που υποβάλλεται σε θλιπτική φόρτιση προς μία διεύθυνση. Το πλακίδιο στηρίζεται κατά μήκος και των τεσσάρων άκρων του. Οι συνοριακές συνθήκες στήριξης ισχύουν για την εξάλειψη των εγκάρσιων παραμορφώσεων και τις κανονικές ροπές κάμψης.

$$w = 0 \text{ στις μικρές του πλευρές} \quad (4.1\alpha)$$

$$M_n = 0 \text{ στις μεγάλες του πλευρές} \quad (4.1\beta)$$

Θα πρέπει να ορίζεται ξεχωριστή συνοριακή συνθήκη εντός του επιπέδου στην κανονική και την εφαπτομενική διεύθυνση:

$$(N_n - \bar{N}_n)\delta_{u_n} = 0 \quad (4.2\alpha)$$

$$(N_t - \bar{N}_t)\delta_{u_t} = 0 \quad (4.2\beta)$$

Στην περίπτωση του ορθογώνιου πλακιδίου οι εξισώσεις 4.1 ανάγονται στην εξής μορφή:

$$\left. \begin{aligned} (N_{xx} - \bar{N}_{xx})\delta_{u_x} &= 0 \\ (N_{xy} - \bar{N}_{xy})\delta_{u_y} &= 0 \end{aligned} \right\} \text{στις μικρές του πλευρές} \quad (4.3)$$

$$\left. \begin{aligned} (N_{yy} - \bar{N}_{yy})\delta_{u_y} &= 0 \\ (N_{xy} - \bar{N}_{xy})\delta_{u_x} &= 0 \end{aligned} \right\} \text{στις μεγάλες του πλευρές}$$

Στο παρών πρόβλημα οι συνοριακές συνθήκες τάσεων εφαρμόζονται ως εξωτερικές δυνάμεις σύμφωνα με τον ακόλουθο ταυισμό:

$$\bar{N}_{\alpha\beta} = \begin{vmatrix} \bar{N} & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}, \quad N_{\alpha\beta} = \begin{vmatrix} N & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (4.4)$$

Με το παραπάνω πεδίο μεμβρανικών δυνάμεων οι εξισώσεις ισορροπίας ικανοποιούνται πανομοιότυπα. Από τις καταστατικές εξισώσεις:

$$N_{xx} = C(\epsilon_{xx} + \nu\epsilon_{yy}) \quad (4.5\alpha)$$

$$0 = C(\epsilon_{yy} + \nu\epsilon_{xx}) \quad (4.5\beta)$$

Συνεπώς $\epsilon_{yy} = -\nu\epsilon_{xx}$ έτσι $N_{xx} = E\epsilon_{xx}$. Άρα η μετατόπιση υπολογίζεται λύνοντας δύο εξισώσεις:

$$\epsilon_{xx} = \frac{du_x}{dx} \quad (4.6\alpha)$$

$$\epsilon_{yy} = \frac{du_y}{dy} \quad (4.6\beta)$$

Τοποθετώντας την αρχή του συστήματος συντεταγμένων στην κάτω αριστερή άκρη του πλακιδίου η λύση είναι:

$$u_x = u_0 \left(1 - \frac{x}{a}\right), \quad u_y = \nu u_0 \frac{y}{a}, \quad N = \frac{Eh}{\alpha} u_0 \quad (4.7)$$

Σημειώνεται ότι το \bar{N} έχει οριστεί ως θετικό στη θλίψη. Επομένως το πλακίδιο βραχύνεται λόγω της θλιπτικής καταπόνησης κατά την διεύθυνση x και επιμηκύνεται πλευρικά στην διεύθυνση y λόγω της επίδρασης του λόγου Poisson. Κατά τη ρύθμιση του πειράματος ή την δημιουργία του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, το πλακίδιο πρέπει να αφήνεται ελεύθερο στην διεύθυνση z δηλαδή εντός του επιπέδου Stephen P. Timoshenko, James M. Gere, (2009).

4.1.6.2 Λυγισμός Απλώς Εδραζόμενου Πλακιδίου

Η ανεπτυγμένη μορφή της κύριας εξίσωσης που αντιστοιχεί στον θεωρητικό τρόπο φόρτισης είναι:

$$D \left[\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right] + \bar{N} \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (4.8)$$

Η λύση της παραπάνω γραμμικής μερικής διαφορικής εξίσωσης με σταθερό συντελεστή αναζητείται ως γινόμενο δύο αρμονικών συναρτήσεων:

$$w(x, y) = \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (4.9)$$

όπου m και n είναι ο αριθμός μισών κυμάτων στη διαμήκη και εγκάρσια διεύθυνση, αντίστοιχα. Η συνάρτηση $w(x, y)$ ικανοποιεί την συνοριακή συνθήκη μετατόπισης. Η ροπή κάμψης M_n :

$$M_n = M_{xx} = D[\kappa_{xx} + \nu \kappa_{yy}] = -D \left[\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \nu \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \right] \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (4.10)$$

Εξαφανίζεται για $x = 0$ και $x = a$. Επίσης για $y = 0$ και $y = b$ $M_n = M_{yy} = 0$. Επομένως η εξίσωση 4.10 ικανοποιεί την συνοριακή συνθήκη απλής έδρασης και στα τέσσερα άκρα του πλακιδίου. Αντικαθιστώντας τη συνάρτηση $w(x, y)$ (4.9) στην κύρια εξίσωση (4.10), λαμβάνουμε:

$$\left\{ D \left[\left(\frac{m\pi}{a}\right)^4 + 2 \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \nu \left(\frac{n\pi}{b}\right)^4 \right] - \bar{N} \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 \right\} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (4.11)$$

Η διαφορική εξίσωση ικανοποιείται για όλες τις τιμές του (x, y) εάν οι συντελεστές ικανοποιούν την σχέση:

$$\bar{N} = D \left(\frac{\pi\alpha}{m} \right)^2 \left[\left(\frac{m}{\alpha} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right]^2 \quad (4.12)$$

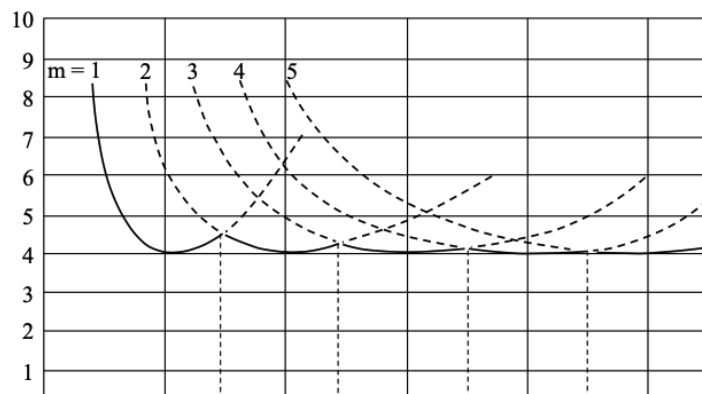
Φαίνεται πως η μικρότερη τιμή του \bar{N} για όλες τις τιμές των α , b και m λαμβάνονται όταν $n = 1$. Αυτό σημαίνει ότι μόνο μισό κύμα θα σχηματιστεί κάθετα στη διεύθυνση εφαρμογής του φορτίου. Στη συνέχεια η εξ. 4.10 μπορεί να διατυπωθεί στην απλούστερη μορφή:

$$\bar{N}_c = k_c \frac{\pi^2 D}{b^2} \quad (4.13)$$

Όπου ο συντελεστής λυγισμού K_c εξαρτάται τόσο από τον λόγο των πλευρών του πλακιδίου a/b όσο και της παραμέτρου μήκους κυματισμού:

$$K_c = \left(\frac{mb}{a} + \frac{a}{mb} \right)^2 \quad (4.14)$$

Η παράμετρος m είναι ακέραιος αριθμός και καθορίζει πόσα μισά κύματα θα χωρέσουν στο μήκος της πλάκας. Ο λόγος διαστάσεων a/b είναι γνωστός, αλλά η παράμετρος του μήκους κύματος παραμένει άγνωστη. Η τιμή του πρέπει να βρεθεί με επιθεώρηση, δηλ. σχεδιάζοντας



Σχήμα 4.12: Σχεδίαση του συντελεστή λυγισμού για απλώς εδραζόμενο πλακίδιο ως συνάρτηση του λόγου των πλευρών του πλακιδίου a/b και των διαφορετικών αριθμών κυμάτων.

Πηγή: [MIT Prof. Wierzbicki's course notes of Structural Mechanics: Buckling of Plates and Sections](#)

τον συντελεστή λυγισμού σε συνάρτηση με το a/b για τις επόμενες τιμές της παραμέτρου m οι συναρτήσεις φαίνονται στο σχήμα 4.12.

Για παράδειγμα, ο συντελεστής λυγισμού που αντιστοιχεί στις πέντε πρώτες ιδιόμορφες λυγισμού για λόγο πλευρών $a/b = 2$ φαίνεται στον πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1:

m	1	2	3	4	5
K_c	6.2	4	4.7	6.2	8.4

Το χαμηλότερο φορτίο λυγισμού $k_c = 4$ εμφανίζεται για $m = 2$ δηλαδή όταν υπάρχουν δύο μισά κύματα κατά μήκος του πλακιδίου.

Θεωρήστε τώρα ένα μεγάλο πλακίδιο με πλευρές a και b , όπου $a \gg b$ για την οποία η παράμετρος m μπορεί να αντιμετωπιστεί ως συνεχής μεταβλητή. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει ένα ελάχιστο όριο του συντελεστή λυγισμού.

$$\frac{dK_c}{dm} = 0 \rightarrow a = mb \quad (4.15)$$

Το παραπάνω αποτέλεσμα σημαίνει ότι η πλάκα διαιρείται σε έναν ακέραιο αριθμό τετραγώνων με εναλλασσόμενα κυρτά και κοίλα τμήματα.

Όταν το ορθογώνιο πλακίδιο περιορίζεται πλευρικά έχει ως αποτέλεσμα τη διαστολή:

$$u_y(y=0) = u_y(y=b) = 0 \quad (4.16)$$

Χωρίς τάση στη διεύθυνση y , $\epsilon_{yy} = 0$ οι καταστατικές εξισώσεις 4.4 αναδιατάσσονται:

$$N_{xx} = C \nu \epsilon_{xx} \quad (4.17\alpha)$$

$$N_{yy} = C \nu \epsilon_{xx} \quad (4.17\beta)$$

Αυτό σημαίνει ότι μια δύναμη αντίδρασης $N_{yy} = \nu N_{xx}$ αναπτύσσεται στην εγκάρσια διεύθυνση. Το λυγισμένο σχήμα του πλακιδίου και η εξίσωση επίλυσης εξακολουθούν να ισχύουν, αλλά η έκφραση για τον συντελεστή λυγισμού αλλάζει και γίνεται:

$$k_c = \frac{\left[\left(\frac{mb}{a} \right)^2 + n^2 \right]}{\left(\frac{mb}{a} \right)^2 + \nu n^2} \quad (4.18)$$

Η ελάχιστη τιμή του συντελεστή λυγισμού μπορεί να βρεθεί μέσω ελέγχου. Παίρνοντας πάλι ως παράδειγμα $a/b = 2$, οι τιμές του συντελεστή λυγισμού που αντιστοιχούν στους εννέα πρώτους τρόπους λυγισμού είναι

Πίνακας 4.2:

n \ m	1	2	3
1	10.7	3	4.09
2	3.8	10.7	10.9
3	26	25	24.1

Η χαμηλότερη τιμή του συντελεστή λυγισμού $k_c = 3$ αντιστοιχεί σε δύο μισά κύματα στην κατεύθυνση φόρτισης και ένα μισό κύμα στην εγκάρσια διεύθυνση. Φαίνεται ότι ο περιορισμός της παραμόρφωσης στο επίπεδο δεν αλλάζει τον τρόπο λυγισμού αλλά μειώνει το φορτίο λυγισμού στο 75% του αρχικού. Η αντίδραση της θλιπτικής δύναμης κάνει το πλακίδιο να λυγίζει πιο εύκολα. Αυτό το παράδειγμα υπογραμμίζει τη σημασία του σωστού καθορισμού των συνοριακών συνθηκών όχι μόνο στην διεύθυνση εκτός επιπέδου αλλά και στις διευθύνσεις εντός του επιπέδου Teng, J.G., Rotter, J.M., (2004).

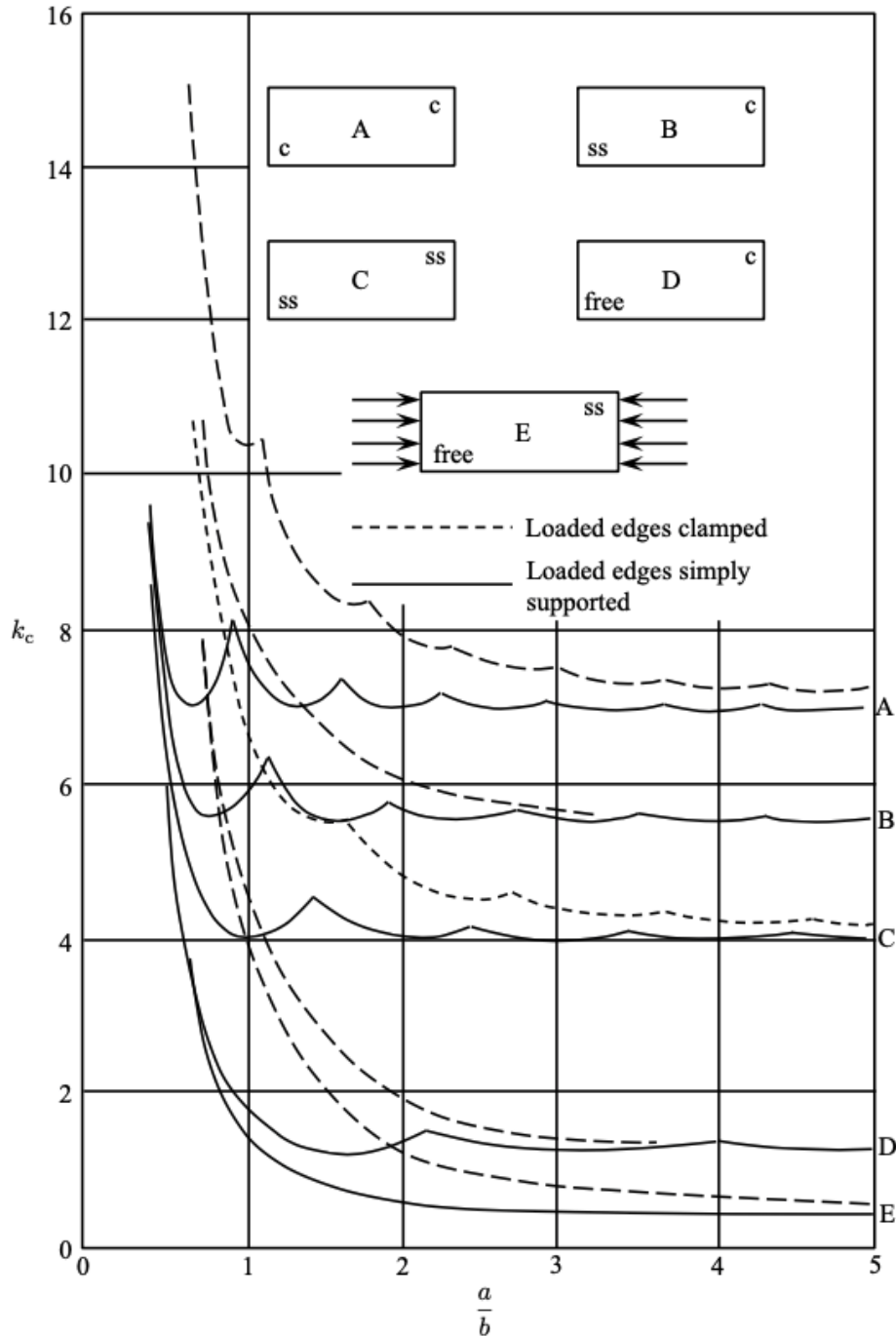
4.1.6.3 Επίδραση Συνοριακών Συνθηκών

Τα αφόρτιστα άκρα των ορθογώνιων πλακιδίων μπορούν είτε να στηρίζονται απλά (simply support), να συσφίγγονται (clamped) είτε να είναι ελεύθερα. (Οι συνοριακές συνθήκες ολίσθησης θα μετατρέψουν το πρόβλημα των ιδιοτιμών σε πρόβλημα ισορροπίας επομένως δεν λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση λυγισμού των πλακιδίων). Τα φορτιζόμενα άκρα θα μπορούσαν είτε απλά να στηρίζονται, είτε να σφίγγονται. Αυτό οδηγεί σε δέκα διαφορετικούς συνδυασμούς. Ο συντελεστής λυγισμού απεικονίζεται σε γραφική παράσταση με την αναλογία διαστάσεων πλάκας a/b για όλους αυτούς τους συνδυασμούς στο σχήμα 4.13. Φαίνεται ότι ο χαμηλότερος συντελεστής λυγισμού με $m = 1$ αντιστοιχεί σε ένα απλά εδραζόμενο πλακίδιο στα τρία άκρα και το τέταρτο άκρο ελεύθερο Reissener, E., (1945).

Μια κατά προσέγγιση αναλυτική λύση προέκυψε από τον Timoshenko και τον Gere στη μορφή

$$k_c = 0.456 + \left(\frac{b}{a}\right)^2 \quad (4.19)$$

Για ένα τετραγωνικό πλακίδιο ο συντελεστής λυγισμού είναι 9.35 ενώ για ένα πλακίδιο δυσανάλογου μήκους πλευρών δηλαδή με την μία πλευρά πολύ μεγαλύτερη της άλλης $a \gg b$ μειώνεται σε 5.35 Reissener, E., (1945).



Σχήμα 4.13: Επίδραση συνοριακών συνθηκών στον συντελεστή λυγισμού ορθογώνιων πλακιδίων.

Πηγή: [Engineering Library](#)

4.1.6.4 Μέγιστη Αντοχή Πλακιδίων

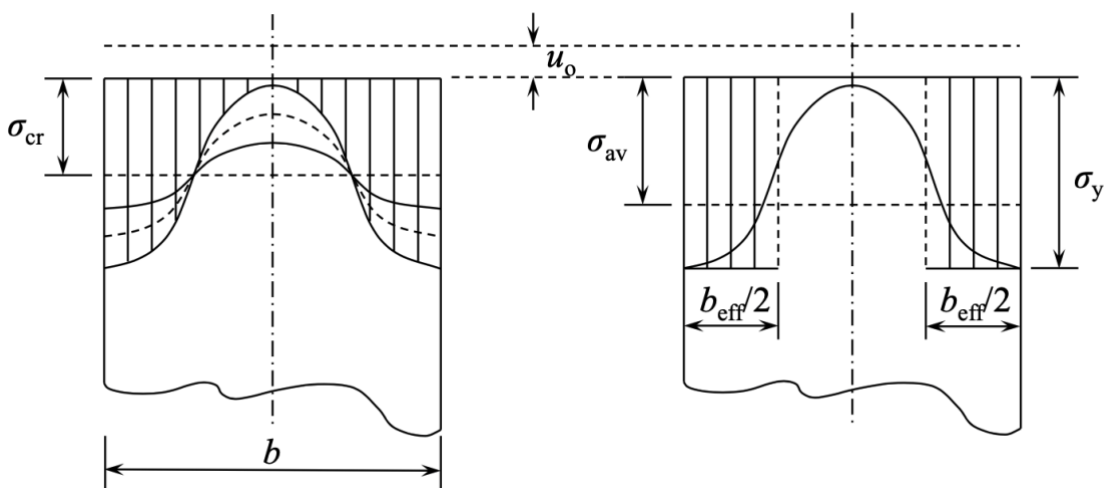
Μετά τον λυγισμό το πλακίδιο συνεχίζει να δέχεται επιπλέον φορτίο αλλά με το 50% της αρχικής δυσκαμψίας. Για να καταλάβουμε τι θα συμβεί στη συνέχεια θα εξετάσουμε την κατανομή των ενδοεπίπεδων θλιπτικών τάσεων σ_{xx} στο $x = a$. Από τις Εξισώσεις 4.17α και β τα ο συνδυασμός τάσεων σ_{xx} είναι

$$\sigma_{xx}(y) = \frac{N_{xx}}{h} = \frac{E}{1 - \nu^2} \left[-(1 - \nu^2) \frac{u_0}{a} + \frac{\pi^2}{2} \left(\frac{w_0}{a} \right)^2 \sin^2 \frac{\pi y}{a} \right] \quad (4.20)$$

Ο πρώτος όρος αντιπροσωπεύει την αρνητική θλιπτική τάση, η οποία είναι ομοιόμορφη κατά το πλάτος της πλάκας. Ο δεύτερος όρος περιγράφει την τάση εφελκυσμού που παράγεται από την πεπερασμένη περιστροφή.

Με την αύξηση της θλίψης της πλάκας υπάρχει μια ανακατανομή των τάσεων κατά μήκος της φορτισμένης ακμής $x = 0$ και $x = a$. Η τάση στο μη φορτιζόμενο άκρο $y = 0$ και $y = a$ συνεχίζει να αυξάνεται ενώ η τάση στο επίπεδο συμμετρίας της πλάκας $y = a/2$ μειώνεται έως το μηδέν.

Το 1932 ο Γερμανός επιστήμονας και μηχανικός Theodore von Karman έκανε χρήση της παρατήρησης που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.17. Υπέθεσε ότι το κεντρικό αφόρτιστο τμήμα του πλακιδίου φέρει μηδενική τάση ενώ οι ακραίες ίνες σε απόσταση $b_{eff}/2$ από τα άκρα, λαμβάνουν την τιμή διαρροής, την στιγμή που το φορτίο λάβει την τελική του τιμή. Ο von Karman ως σημείο εκκίνησης χρησιμοποίησε την έκφραση για το κρίσιμο φορτίο



Σχήμα 4.14: Ανακατανομή των θλιπτικών τάσεων κατά μήκος του φορτισμένου άκρου και απλή προσέγγιση κατά von Karman.

Πηγή: [MIT Prof. Wierzbicki's course notes of Structural Mechanics: Buckling of Plates and Sections](#)

λυγισμού N_c και εξέτασε τη σχέση μεταξύ της τάσης του φορτισμένου άκρου σ_e και του πλάτους του πλακιδίου b .

$$\sigma_e = \frac{N_e}{h} = \frac{N_c}{h} = \frac{4\pi^2 D}{hb^2} = \frac{4\pi^2 E h^2}{12(1-\nu^2)b^2} = 1.9^2 E \left(\frac{h}{b}\right)^2 \quad (4.21)$$

Κανονικά το b είναι μία γνωστή παράμετρος και η τάση σ_e ένα άγνωστο μέγεθος. Η ευρηματικότητα του von Karman ήταν ότι ανέτρεψε την γνωστή από την άγνωστη μεταβλητή (εξίσωση 4.21). Αναρωτήθηκε ποιο πρέπει να είναι το πλάτος της πλάκας b_{eff} έτσι ώστε η τάση των άκρων να φτάσει την τάση διαρροής. Έτσι έχουμε:

$$\sigma_y = 1.9^2 E \left(\frac{h}{b_{eff}}\right)^2 \quad (4.22)$$

Επιλύοντας την εξίσωση 4.22 ως προς το b_{eff} έχουμε:

$$b_{eff} = 1.9h \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} \quad (4.23)$$

Λαμβάνοντας για παράδειγμα μέτρο ελαστικότητας $E = 200000$ MPa, τάση διαρροής $\sigma_y = 320$ MPa, το ενεργό πλάτος γίνεται:

$$b_{eff} = 1.9h\sqrt{625} = 47.5h \quad (4.24)$$

Το ενεργό πλάτος εξαρτάται από το μέτρο ελαστικότητας ή αλλιώς μέτρο Young και η τάση διαρροής είναι ανάλογη με το πάχος του πλακιδίου. Περίπου 40-50 φορές το πάχος του πλακιδίου από τα ελεύθερα άκρα φέρει το φορτίο, το υπόλοιπο κεντρικό τμήμα δεν είναι αποτελεσματικό. Το συνολικό φορτίο στην πλάκα μπορεί να εκφραστεί με δύο τρόπους:

$$P_{ult} = b_{eff} \cdot \sigma_y = b \cdot \sigma_{av} \quad (4.25)$$

όπου $\sigma_{av} = \sigma_{ult}$ είναι η μέση τάση του φορτιζόμενου άκρου στο σημείο τελικής αντοχής,

$$\frac{\sigma_{av}}{\sigma_{ult}} = \frac{b_{eff}}{b} = 1.9 \frac{h}{b} \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} \quad (4.26)$$

Οι παράμετροι συγκεντρώνονται ως:

$$\beta = \frac{b}{h} \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} \quad (4.27)$$

Αναφέρεται ως ο λόγος λυγηρότητας του πλακιδίου. Σημειώνεται ότι αυτή είναι μια διαφορετική έννοια από την αναλογία λυγηρότητας του στύλου I/r . Χρησιμοποιώντας την

παράμετρο β , η τελική αντοχή του πλακιδίου κανονικοποιημένη από την τάση διαρροής είναι:

$$\frac{\sigma_{ult}}{\sigma_y} = \frac{1.9}{\beta} \quad (4.28)$$

Η κανονικοποιημένη τάση λυγισμού του ελαστικού πλακιδίου είναι:

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} = \left(\frac{1.9}{\beta}\right)^2 \quad (4.29)$$

Με την εξάλειψη της παραμέτρου β μεταξύ των Εξισώσεων 4.28 και 4.29, η τελική τάση θεωρείται ότι είναι ο γεωμετρικός μέσος όρος μεταξύ της τάσης διαρροής και της κρίσιμης τάσης λυγισμού

$$\sigma_{ult} = \sqrt{\sigma_{cr} \cdot \sigma_y} \quad (4.30)$$

Για παράδειγμα η συνεχής φόρτιση μιας πλάκας με λόγο λυγηρότητας β_1 θα συναντήσει πρώτα την καμπύλη λυγισμού και μετά την καμπύλη τελικής αντοχής, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.22. Η παραπάνω ανάλυση ίσχυε για πλακίδια που απλώς στηρίζονται κατά μήκος και των τεσσάρων άκρων, για τα οποία ο συντελεστής λυγισμού είναι $k_c = 4$. Για άλλο τύπο στηρίξεων ισχύει ακόμα η εξίσωση 4.23 με το συντελεστή 1.9 να αντικατασταθεί με $1.9k_c/4$.

Στο παρελθόν έχει καταβληθεί μεγάλη προσπάθεια για να επικυρωθεί πειραματικά η πρόβλεψη της θεωρίας του ενεργού πλάτους von Karman. Διαπιστώθηκε ότι μια μικρή διόρθωση στην Εξίσωση 4.26 παρέχει καλή προσαρμογή των περισσότερων δεδομένων δοκιμής Elishakoff I. etc (1988).

$$\frac{\sigma_{ult}}{\sigma_y} = \frac{b_{eff}}{b} = \frac{1.9}{\beta} - \frac{1.9}{\beta} \quad (4.31)$$

4.1.6.5 Επίδραση Αρχικών Ατελειών

Τα πλακίδια μπορεί να είναι γεωμετρικά ατελή λόγω της διαδικασίας κατασκευής, της παραμόρφωσης της συγκόλλησης ή του κακού χειρισμού κατά τη μεταφορά. Το σχήμα του ατελούς πλακιδίου μπορεί να μετρηθεί όπως ορίζεται από τη συνάρτηση $\bar{w}(x, y)$. Γενικά, το αρχικό σχήμα εκτός επιπέδου μπορεί να επεκταθεί σε μια σειρά Fourier. Ο πρώτος όρος της σειράς αναπτύσσεται γρηγορότερα. Επομένως αρκεί να θεωρηθεί πως οι ατέλειες κατανέμονται στο αρχικό όρο:

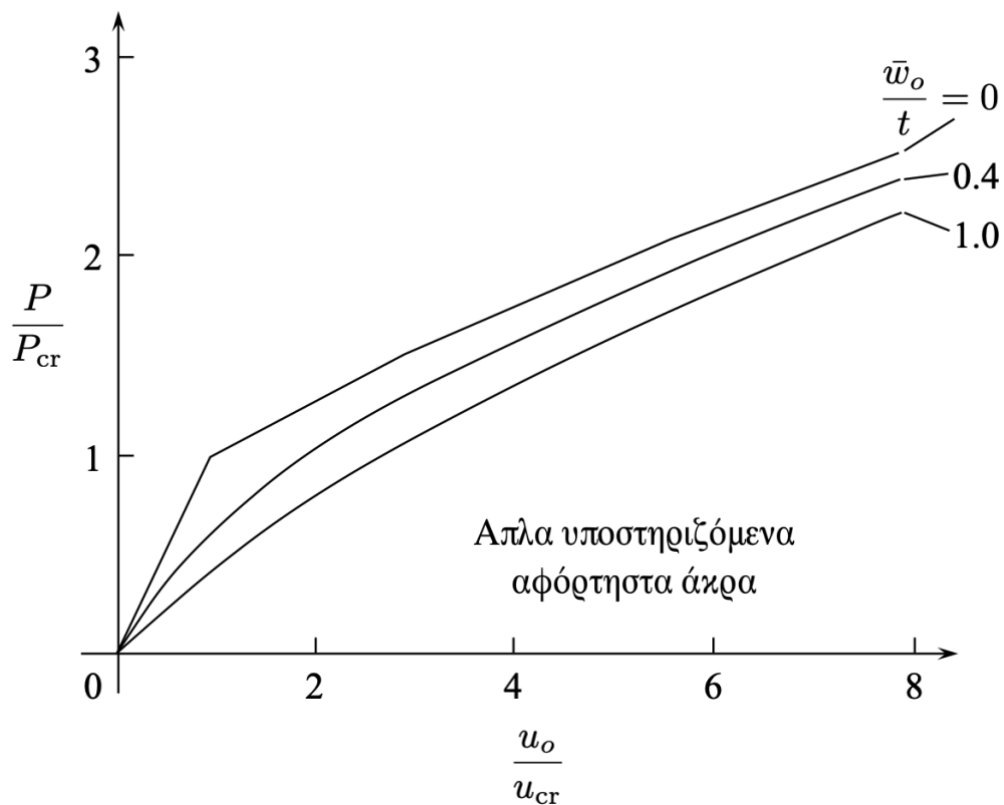
$$\bar{w}(x, y) = \bar{w}_0 \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{a} \tag{4.33}$$

Η αρχική ατέλεια ορίζεται μέσω των καμπυλοτήτων και των μεμβρανικών παραμορφώσεων:

$$\kappa_{\alpha\beta} = -(w - \bar{w})_{,\alpha\beta} \tag{4.34}$$

$$\epsilon_{\alpha\beta} = \frac{1}{2}(u_{\alpha,\beta} + u_{\beta,\alpha}) + \frac{1}{2}w_{,\alpha}w_{,\beta} - \frac{1}{2}\bar{w}_{,\alpha}\bar{w}_{,\beta} \tag{4.35}$$

που ανάγονται στις εξισώσεις 4.14 και 4.3 αντίστοιχα, όταν $\bar{w}(x, y) = 0$.



Σχήμα 4.15: Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για τέλει και ατελείς απλά υποστηριζόμενες πλάκες.

Πηγή: [MIT Prof. Wierzbicki's course notes of Structural Mechanics: Buckling of Plates and Sections](#)

Η παραγωγή εξακολουθεί να ισχύει και η έκφραση για τη συνολική δυναμική ενέργεια είναι η ίδια, εκτός από όλους τους όρους που περιλαμβάνουν w_0 , πρέπει τώρα να αντικατασταθούν με $(w_0 - \bar{w}_0)$. Οι δομικές ατέλειες είναι συνήθως μικρές και συγκρίσιμες με το πάχος του πλακιδίου. Ένα διάγραμμα με τη καμπύλη φορτίου-μετατόπισης για το γεωμετρικά τέλει πλακίδιο και το πλακίδιο με δύο μεγέθη αρχικών ατελειών φαίνεται στο σχήμα 4.16. Το φορτίο έχει κανονικοποιηθεί με το κρίσιμο φορτίο λυγισμού και οι μετατοπίσεις με την κρίσιμη μετατόπιση λυγισμού Timoshenko, S.P., Gere, J.M., (2009).

5 Περιγραφή Πειραμάτων και Προσομοίωσης

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστεί η διαδικασία διεξαγωγής των πειραμάτων κάμψης τριών σημείων, που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο τεχνολογίας και κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος του πανεπιστημίου και αφορά φύλλα αλουμινίου EL T 39 896 κατασκευασμένα από κράμα αλουμινίου ποιότητας EN AW 3005 AlMn1Mg0.5/H28. Θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τις πειραματικές δοκιμές. Θα παρατεθούν οι αναλυτικές λύσεις βάση του Ευρωκώδικα 9 (EC-9). Επιπλέον θα γίνει περιγραφή της δημιουργίας του μοντέλου προσομοίωσης μέσω πεπερασμένων στοιχείων. Στη συνέχεια θα αναλυθούν οι μέθοδοι προσομοίωσης που ακολουθήθηκαν.

5.1 Διεξαγωγή Πειραμάτων

5.1.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Σκοπός του πειράματος αποτέλεσε ο προσδιορισμός της αντοχής υπό συγκεντρωμένη δύναμη των αυτοφερόμενων τραπεζοειδών φύλλων αλουμινίου με τη διατομή του σχήματος 5.1. Το συνολικό μήκος ήταν 3m και το ονομαστικό πάχος ήταν 1 mm. Πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές σε συνολικά 3 ομοειδείς λαμαρίνες.



Σχήμα 5.1: Διατομή λαμαρίνας (στιγμιότυπο από το εργαστήριο τεχνολογίας και κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος).

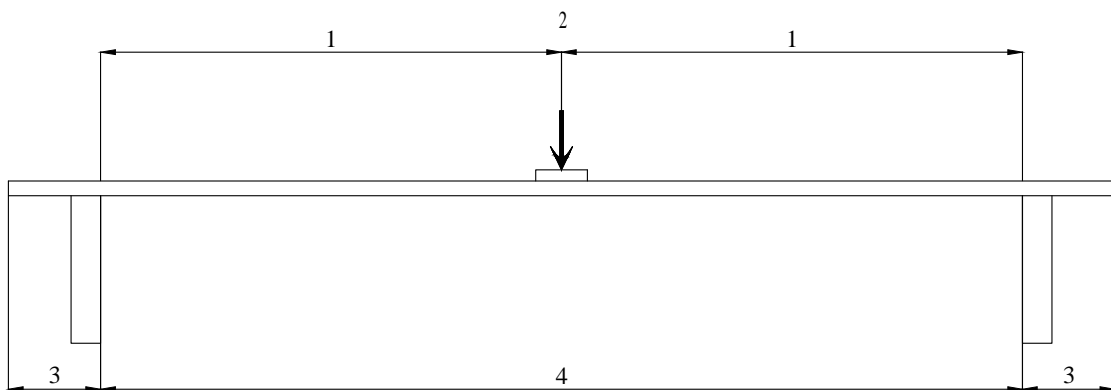
5.1.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Οι πειραματικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τα όσα ορίζει το Παράρτημα Β του προτύπου EN14782:2006. Όλες οι λαμαρίνες υποβλήθηκαν σε κάμψη 3

σημείων με συγκεντρωμένη δύναμη στο μέσον του ανοίγματος και με τις στηρίξεις να είναι κυλήσεις (βλ. σχήμα 5.2 και σχήμα 5.3). Τα βασικά γεωμετρικά στοιχεία όπως παρουσιάζονται στο σχήμα 2 παρακάτω, ήταν κοινά για τις δύο σειρές δοκιμών.

Συγκεκριμένα:

- το καθαρό άνοιγμα μεταξύ των στηρίξεων (βλ. 4 στο σχήμα 5.3) ήταν 2500 mm
- το μήκος προεξοχής των άκρων (βλ. 3 στο σχήμα 5.2) ήταν 250 mm
- το συγκεντρωμένο φορτίο (βλ. 2 στο σχήμα 5.2) ήταν τοποθετημένο στο μέσο του ανοίγματος



Σχήμα 5.3: Βασική γεωμετρία πειραματικής διάταξης.

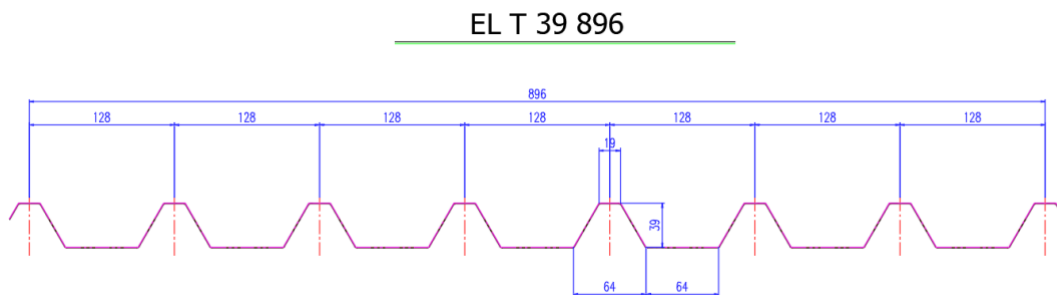


Σχήμα 5.2: Πλαϊνή όψη πειραματικής διάταξης (στιγμιότυπο από το εργαστήριο τεχνολογίας και κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος).

5.2 Υπολογισμός Αντοχής Σύμφωνα με τον EC 9

5.2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το τραπεζοειδές φύλλο αλουμινίου EL T 39 896, που παράγεται από την εταιρία ΕΛΑΣΤΡΟΝ Α.Ε.Β.Ε. έχει ύψος 39mm, πλάτος επαναλαμβανόμενου φατνώματος 896 mm και πάχος ελάσματος 1mm. Κατασκευάζεται από κράμα αλουμινίου ποιότητας 3005 AlMn1Mg0.5 /H28, με τάση διαρροής σχεδιασμού (proof strength $f_0 = 190MPa$ (σχήμα 5.4). Στον Πίνακα 5.1 δίνονται τα αδρανειακά του χαρακτηριστικά που αντιστοιχούν σε πλήρη διατομή (gross cross-section) πλάτους 1m ενώ στον Πίνακα 5.2 δίνονται βασικές τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών του υλικού.



Σχήμα 5.4: Διατομή τραπεζοειδούς φύλλου αλουμινίου EL T 39 896.

Πίνακας 5.1: Γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά τραπεζοειδούς φύλλου αλουμινίου EL T 39 896 για πλήρη διατομή πλάτους 1m.

Πάχος	t (mm)	1.00
Βάρος	G (kg/m)	3.65
Επιφάνεια	A(cm ²)	13.52
Ροπή αδράνειας	I _y (cm ⁴)	30.00
Ροπή αντίστασης	W _y (cm ³)	11.95

Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικές τιμές αλουμινίου σύμφωνα με τον Ευρωκώδικά 9-Μέρος 1.4 (EN 1999.01.04).

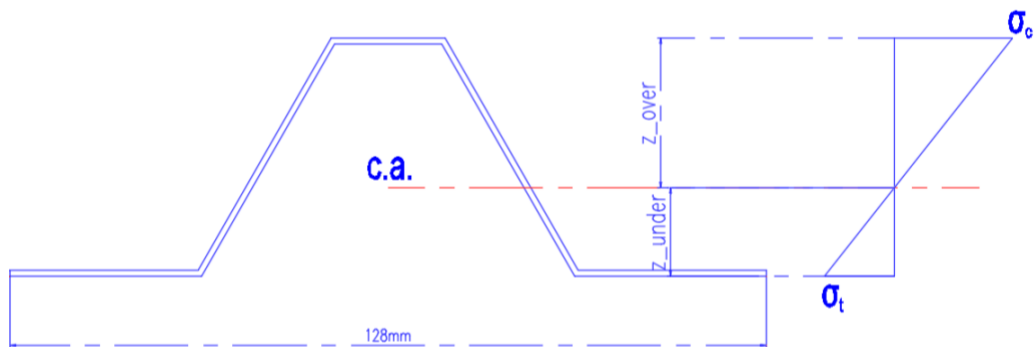
Ποιότητα Υλικού	3005 AlMn1Mg0.5-H28	
Πυκνότητα	ρ (kg/m ³)	2700
Μέτρο ελαστικότητας	E (MPa)	70000
Μέτρο διάτμησης	G (MPa)	27000
Λόγος Poisson	ν	0.3
Τάση διαρροής σχεδιασμού (proof strength)	f ₀ (MPa)	190Mpa

5.2.2 ΑΝΤΟΧΕΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΟΥΣ ΦΥΛΛΟΥ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ELT 39 896 ΕΝΑΝΤΙ ΚΑΜΠΤΙΚΩΝ ΡΟΠΩΝ (BENDING MOMENT CROSS-SECTION RESISTANCE)

Η δράση κατακόρυφων φορτίων, σε συνεχή συστήματα πλακών αποτελούμενα από τραπεζοειδές φύλλο αλουμινίου EL T 39 896, καταπονεί τις διατομές των ανοιγμάτων σε θετικές ροπές κάμψης (περιοχή θετικού διαγράμματος ροπών κάμψης), ενώ τις διατομές των στηριγμάτων (περιοχή αρνητικού διαγράμματος ροπών κάμψης) σε αρνητικές ροπές κάμψης. Οι δρώσες ροπές κάμψης, οδηγούν στην ανάπτυξη ορθών εκ κάμψεως τάσεων, στα πλακίδια που συνθέτουν την διατομή με αποτέλεσμα αυτά που βρίσκονται υπό εντατική κατάσταση ομοιόμορφης θλίψης (uniform compression) ή θλίψης και κάμψης (stress gradient) να κινδυνεύουν να αστοχήσουν από φαινόμενα τοπικού λυγισμού (local buckling). Ως εκ τούτου, η αντοχή της διατομής σε κάμψη βασίζεται στον έλεγχο έναντι εμφάνισης τοπικού λυγισμού στα πλακίδια και κατ' επέκταση στον προσδιορισμό της ενεργού διατομής βάση της οποίας υπολογίζεται στη συνέχεια η ελαστική ροπή αντίστασης και η καμπτική ροπή αντοχής. Στη συνέχεια, στις παραγράφους 5.2.2.1 και 5.2.2.2 προσδιορίζεται η καμπτική ροπή αντοχής σχεδιασμού της διατομής έναντι θετικών και αρνητικών ροπών κάμψης, σύμφωνα με την παράγραφο 5.5 (Local and distortional buckling) και την παράγραφο 6.1(Resistance of Cross Sections) του Ευρωκώδικα 9-Μέρος 1.4 (EN 1999.01.04).

5.2.2.1 Ροπή Αντοχής Έναντι Θετικής Κάμψης

Στις διατομές των ανοιγμάτων όπου αναπτύσσεται θετική ροπή κάμψης το άνω πέλμα της διατομής θλίβεται και βρίσκεται υπό ομοιόμορφη θλίψη κινδυνεύοντας από φαινόμενα τοπικού λυγισμού, ενώ το κάτω πέλμα είναι πλήρως ενεργό μιας και βρίσκεται εξ' ολοκλήρου υπό εφελκυσμό. Ο κορμός βρίσκεται υπό κάμψη και θλίψη οπότε υπάρχει πιθανότητα το τμήμα που θλίβεται να μην είναι πλήρως ενεργό. Για τον υπολογισμό της ενεργού διατομής θεωρούμε το φάτνωμα πλάτους 128mm του σχήματος 5.6.



Σχήμα 5.5: Διατομή υπολογισμού σε θετική ροπή κάμψης.

Γεωμετρικά δεδομένα-παραδοχές υπολογισμού

Επειδή:

- για θλιβόμενα μέλη (άνω πέλμα) : $\frac{b_p}{t} = \frac{64}{1} = 64 < 300$, όπου b_p μήκος θλιβόμενου πλακιδίου (εδώ λαμβάνεται ως προς το δυσμενέστερο το κάτω πέλμα).
- για κορμούς: $\frac{s_w}{t} = \frac{45.025}{1} = 45.025 < 0.5 \frac{E}{f_0} = 184$, όπου s_w το μήκος κορμού,

σύμφωνα με την παράγραφο 5.1.6 του EN 1999.01.04 ο υπολογισμός των αντοχών δύναται να πραγματοποιηθεί με υπολογισμούς που ορίζονται από το συγκεκριμένο κανονιστικό κείμενο.

Επιπρόσθετα, σύμφωνα με την παράγραφο 5.1.3 του EN 1999.01.04, επειδή:

$$r = 2.5mm \leq 10t = 10 \times 1 = 10mm, \text{ όπου } r \text{ η ακτίνα καμπυλότητας των γωνιών της διατομής.}$$

και $r = 2.5 \leq 15b_p = 0.15 \times 28 = 4.2$ όπου b_p εδώ λαμβάνεται το μήκος του κάτω πέλματος ως προς το δυσμενέστερο,

η διατομή μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από επίπεδα ελάσματα με ευθύγραμμες γωνίες (δύναται να αμεληθούν οι καμπυλότητες στις γωνίες της διατομής).

Άνω θλιβόμενο πέλμα υπό ομοιόμορφη θλίψη

Με βάση την γεωμετρία προσδιορίζεται το κέντρο βάρους της διατομής και οι αποστάσεις:

$$z_{over} = 25.1358 \text{ mm}$$

$$z_{under} = 14.8642 \text{ mm}$$

Τότε, από τα όμοια τρίγωνα της γραμμικής καθ' ύψους κατανομής των ορθών τάσεων προκύπτει:

$$z_{over} = 25.1358 \text{ mm}$$

$$z_{under} = 14.8642 \text{ mm}$$

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_t} = \frac{z_{over}}{z_{under}} = \frac{25.1358}{14.8642} = 1.691 \Rightarrow \sigma_c > \sigma_t$$

Άρα διαρρέει πρώτα το θλιβόμενο πέλμα. Ως εκ τούτου, ο υπολογισμός του ενεργού του πλάτους βασίζεται στις παρακάτω σχέσεις:

$$\sigma_{com,Ed} = \frac{f_0}{\gamma_{M1}} = \frac{190}{1.10} = 172.72 \text{ Mpa}$$

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}_p &= \sqrt{\frac{f_0}{\sigma_{cr}}} = \frac{b_p}{t} \sqrt{\frac{12 \times (1 - \nu^2) f_0}{\pi^2 E k_\sigma}} = \frac{18.7112}{1} \sqrt{\frac{12 \times (1 - 0.3^2) 190}{3.14159^2 \times 70000 \times 4}} = \\ &= 18.7112 \times \sqrt{\frac{2074.8}{2763484.564}} = 0.5127 \end{aligned}$$

Επειδή $\bar{\lambda}_p = 0.5127 < \bar{\lambda}_{lim} = 0.517 \Rightarrow \rho = 1.0$, το θλιβόμενο πέλμα δεν κινδυνεύει από τοπικό λυγισμό και είναι όλο ενεργό.

Άρα,

$$t_{eff} = \rho \times t = 1.0 \times 1mm = 1mm$$

Κορμός υπό θλίψη και κάμψη

Είναι:

$$\psi = -\frac{\sigma_t}{\sigma_c} = -\frac{z_{under}}{z_{over}} = \frac{14.8642}{25.1358} = -0.591$$

Επειδή $0 \geq \psi = -0.591 \geq -1$ θα είναι:

$$k_\sigma = 7.81 - 6.26 \times \psi + 9.78 \times \psi^2 = 7.81 - 6.26 \times (-0.591) + 9.78 \times (-0.591)^2 = 14.926$$

Το υπό θλίψη τμήμα του κορμού έχει μήκος $b_p = 28.4417mm$, οπότε είναι:

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}_p &= \frac{b_p}{t} \sqrt{\frac{12 \times (1 - \nu^2) f_0}{\pi^2 E k_\sigma}} = \frac{28.4417}{1} \sqrt{\frac{12 \times (1 - 0.3^2) 190}{3.14159^2 \times 70000 \times 14.926}} = \\ &= 28.4417 \times \sqrt{\frac{2074.8}{10311942.65}} = 0.40343 \end{aligned}$$

Επειδή $\bar{\lambda}_p = 0.40343 < \bar{\lambda}_{lim} = 0.517 \Rightarrow \rho = 1.0$, το θλιβόμενο τμήμα του κορμού δεν κινδυνεύει από τοπικό λυγισμό, άρα όλος ο κορμός είναι ενεργός.

Καμπτική ροπή αντοχής ενεργού διατομής

Με βάση τα ανωτέρω, όλη η διατομή είναι ενεργή, συνεπώς η ροπή αντοχής προσδιορίζεται από την πλήρη διατομή. Από την γεωμετρία της πλήρους διατομής του σχήματος 5.6, πλάτους 128mm προσδιορίζονται:

- Ροπή αδράνειας περί τον κεντροβαρικό οριζόντιο άξονα της κάμψης:

$$I_{Y-Y} = 38431.9mm^4 = 3.84319cm^4$$

- Μέγιστη απόσταση ακραίας ίνας από κεντροβαρικό άξονα:

$$z_{\max} = z_{\text{over}} = 25.1358\text{mm} = 2.51358\text{cm}$$

Σύμφωνα με την παράγραφο 6.1.4 του EN 1999.01.04, επειδή η γωνία που σχηματίζει ο κορμός με το κάτω πέλμα είναι $\varphi = 60^0$ δεν λαμβάνεται υπόψη πλαστική απόκριση της διατομής και ο υπολογισμός της ροπής αντοχής βασίζεται στην ελαστική της απόκριση σύμφωνα με τα παρακάτω

$$w_{Y-Y}^{el} = \frac{I_{Y-Y}}{z_{\max}} = \frac{3.84319}{2.51358} = 1.53\text{cm}^3 \text{ (ελαστική ροπή αντίστασης διατομής)}$$

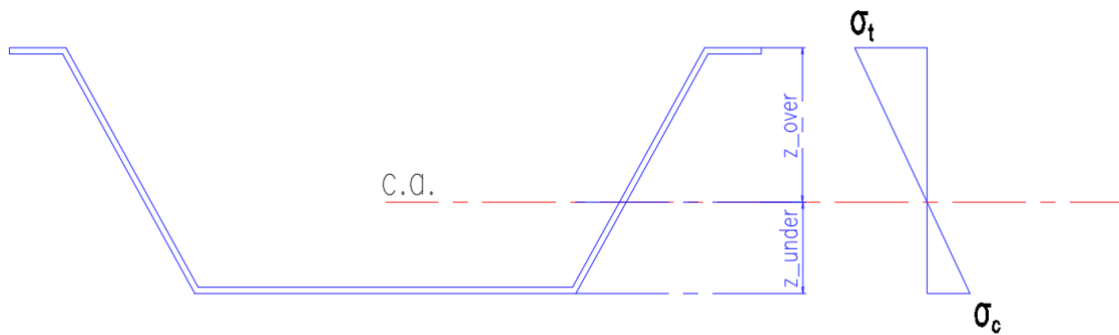
$$M_{c,Rd}^+ = w_{Y-Y}^{el} \times \frac{f_0}{\gamma_{M1}} = 1.53\text{cm}^3 \times \frac{19\text{kN/cm}^2}{1.10} = 26.41\text{kNcm} = 0.2641\text{kNm} \text{ (για πλάτος διατομής 128mm)}$$

Προφανώς η ανά μέτρο πλάτους διατομής καμπτική ροπή αντοχής είναι:

$$M_{c,Rd}^+ / m = \frac{0.2641}{0.128} = 2.063 \text{ kNm / m}$$

5.2.2.2 Ροπή Αντοχής Έναντι Αρνητικής Ροπής Κάμψης

Στις διατομές πλησίον των στηριγμάτων όπου αναπτύσσεται αρνητική ροπή κάμψης το κάτω πέλμα της διατομής θλίβεται και βρίσκεται υπό ομοιόμορφη θλίψη κινδυνεύοντας από φαινόμενα τοπικού λυγισμού, ενώ το άνω πέλμα είναι πλήρως ενεργό μιας και βρίσκεται εξ' ολοκλήρου υπό εφελκυσμό. Ο κορμός βρίσκεται υπό εντατική κατάσταση κάμψης και θλίψης οπότε υπάρχει πιθανότητα το τμήμα που θλίβεται να μην είναι πλήρως ενεργό. Για τον υπολογισμό της ενεργού διατομής σε αυτή την περίπτωση θεωρούμε το φάτνωμα πλάτους 128mm του σχήματος 5.7.



Σχήμα 5.6: Αρχική διατομή υπολογισμού σε αρνητική ροπή κάμψης.

Κάτω θλιβόμενο πέλμα υπό ομοιόμορφη θλίψη

Από τα όμοια τρίγωνα της γραμμικής καθ' ύψος κατανομής των ορθών τάσεων που αναπτύσσονται στην διατομή προκύπτει:

$$z_{over} = 25.1358 \text{ mm}$$

$$z_{under} = 14.8642 \text{ mm}$$

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_c} = \frac{z_{over}}{z_{under}} = \frac{25.1358}{14.8642} = 1.691 \Rightarrow \sigma_t > \sigma_c$$

Άρα διαρρέει πρώτα το εφελκυτό πέλμα. Ως εκ τούτου, ο υπολογισμός του ενεργού του πλάτους βασίζεται στις παρακάτω σχέσεις:

$$\sigma_{com,Ed} = \frac{\sigma_t}{1.691} = \frac{1.10}{1.691} = 102.15 \text{ Mpa} < \frac{f_0}{\gamma_{M1}} = \frac{190}{1.10} = 172.72 \text{ Mpa}$$

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \times \sqrt{\frac{\sigma_{com.Ed}}{f_0}} = \frac{b_p}{t} \sqrt{\frac{12 \times (1 - \nu^2) f_0}{\pi^2 E k_\sigma}} \times \sqrt{\frac{\sigma_{com.Ed}}{f_0}} =$$

$$= \frac{64.2888}{1} \sqrt{\frac{12 \times (1 - 0.3^2) 190}{3.14159^2 \times 70000 \times 4}} \times \sqrt{0.5914} = 1.3547$$

Επειδή:

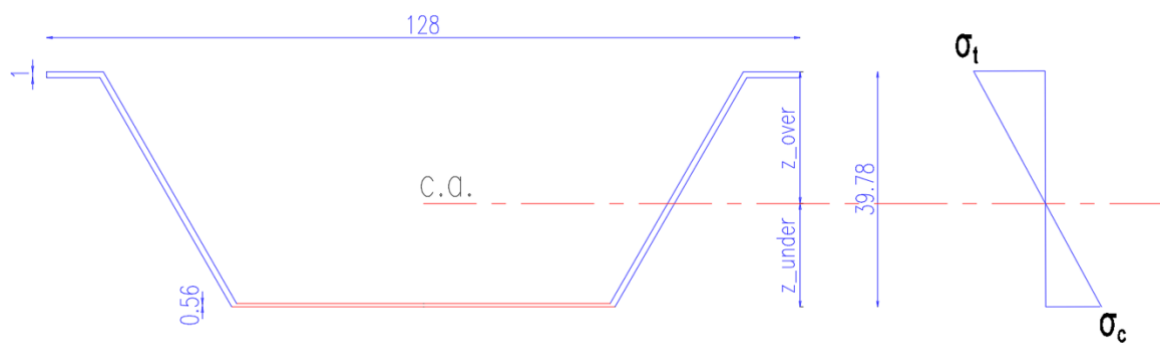
$$\bar{\lambda}_{p,red} = 1.3547 > \bar{\lambda}_{lim} = 0.517 \Rightarrow \rho = \frac{a \times \left(1 - \frac{0.22}{\bar{\lambda}_{p,red}}\right)}{\bar{\lambda}_{p,red}} = \frac{0.90 \times \left(1 - \frac{0.22}{1.3547}\right)}{1.3547} = 0.5565,$$

το θλιβόμενο πέλμα κινδυνεύει από φαινόμενα τοπικού λυγισμού και ως εκ τούτου απαιτείται η μείωση του πάχους του. Το ενεργό θλιβόμενο πέλμα αντιστοιχεί σε πέλμα με πάχος:

$$t_{eff} = \rho \times t = 0.5565 \times 1mm = 0.5565mm$$

Κορμός υπό θλίψη και κάμψη

Για τον προσδιορισμό του ενεργού τμήματος του κορμού χρησιμοποιείται η διατομή του σχήματος 5.8, στο οποίο θεωρείται πλήρης ο κορμός και ενεργό το θλιβόμενο πέλμα με βάση την μείωση του πάχους που υπολογίστηκε παραπάνω.



Σχήμα 5.7: Διατομή με πλήρη κορμό και ενεργό θλιβόμενο κάτω πέλμα.

Είναι:

$$\psi = -\frac{\sigma_t}{\sigma_c} = -\frac{z_{over}}{z_{under}} = \frac{22.3016}{17.4767} = -1.276$$

Επειδή $-1 \geq \psi = -1.276 \geq -3$ θα είναι:

$$k_{\sigma} = 5.98 \times (1 - \psi)^2 = 5.98 \times (1 + 1.276)^2 = 30.9775$$

Το υπό θλίψη τμήμα του κορμού έχει μήκος $b_p = 19.8554 \text{ mm}$ και επειδή είναι

$$\sigma_{com,Ed} < \frac{f_0}{\gamma_{M1}} = \frac{190}{1.10} = 172.72 \text{ Mpa} :$$

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}_{p,red} &= \bar{\lambda}_p \times \sqrt{\frac{\sigma_{com,Ed}}{f_0}} = \frac{b_p}{t} \sqrt{\frac{12 \times (1 - \nu^2) f_0}{\pi^2 E k_{\sigma}}} \times \sqrt{\frac{\sigma_{com,Ed}}{f_0}} = \\ &= \frac{19.8554}{1} \sqrt{\frac{12 \times (1 - 0.3^2) 190}{3.14159^2 \times 70000 \times 30.9775}} \times \sqrt{1/1.276} = 0.173 \end{aligned}$$

Επειδή $\bar{\lambda}_p = 0.173 < \bar{\lambda}_{lim} = 0.517 \Rightarrow \rho = 1.0$, το θλιβόμενο τμήμα του κορμού δεν κινδυνεύει από τοπικό λυγισμό, άρα όλος ο κορμός είναι ενεργός.

Καμπτική ροπή αντοχής ενεργού διατομής

Με βάση τα ανωτέρω, η ενεργός διατομή στην περίπτωση των αρνητικών ροπών κάμψης είναι η διατομή του σχήματος 5.8 με πλήρη τον κορμό και το άνω πέλμα και ενεργό το κάτω θλιβόμενο πέλμα. Από την γεωμετρία της ενεργού διατομής του σχήματος 5.8, πλάτους 128mm προσδιορίζονται:

- Ροπή αδράνειας περί τον κεντροβαρικό οριζόντιο άξονα της κάμψης:
 $I_{Y-Y} = 31380.0791 \text{ mm}^4 = 3.138 \text{ cm}^4$
- Μέγιστη απόσταση ακραίας ίνας από κεντροβαρικό άξονα:
 $z_{max} = z_{over} = 22.3016 \text{ mm} = 2.23016 \text{ cm}$
- Ελαστική ροπή αντίστασης της διατομής:

$$W_{Y-Y}^{el} = \frac{I_{Y-Y}}{z_{\max}} = \frac{3.138}{2.23} = 1.407 \text{ cm}^3 \text{ (ελαστική ροπή αντίστασης διατομής)}$$

$$\text{Επειδή } W_{Y-Y}^{el,eff} = 1.407 \text{ cm}^3 < W_{Y-Y}^{el,gross},$$

η καμπτική ροπή αντοχής της διατομής είναι:

$$M_{c,Rd}^- = w_{Y-Y}^{el,eff} \times \frac{f_0}{\gamma_{M1}} = 1.407 \text{ cm}^3 \times \frac{19 \text{ kN/cm}^2}{1.10} = 24.3 \text{ kNcm} = 0.243 \text{ kNm}, \text{ για διατομή πλάτους}$$

128mm.

Προφανώς ή ανά μέτρο πλάτους διατομής καμπτική ροπή αντοχής είναι:

$$M_{c,Rd}^- / m = \frac{0.243}{0.128} = 1.898 \text{ kNm/m}$$

5.2.2.3 Αντοχή Διατομής Τραπεζοειδούς Φύλλου Αλουμινίου EL 39 896 Έναντι Κατακόρυφων Διατμητικών Δυνάμεων

Η αντοχή της διατομής του τραπεζοειδούς φύλλου αλουμινίου EL T 39 896 υπό την δράση κατακόρυφων διατμητικών (τεμνουσών) δυνάμεων, καθορίζεται από την αντοχή του έναντι διατμητικής κύρτωσης $V_{b,Rd}$ και δίνεται σύμφωνα με την παράγραφο 6.1.5 του ευρωκώδικα EN 1999.01.04 από την ακόλουθη σχέση:

$$V_{b,Rd} = \left(\frac{h_w}{\sin \phi} \right) \times t \times \frac{f_{bv}}{\gamma_{M1}}, \text{ όπου}$$

- $h_w = 39 \text{ mm}$ το ύψος του κορμού,
- $\phi = 60^\circ$, η εσωτερική γωνία μεταξύ του κάτω πέλματος και του κορμού,
- $f_{bv} = 0.58 f_0 = 0.58 \times 190 = 110.20 \text{ Mpa}$, η διατμητική τάση αντοχής, γιατί είναι

$$\lambda_w = 0.346 \times \frac{s_w}{t} \sqrt{\frac{f_0}{E}} = 0.346 \times \frac{45.025}{1} \sqrt{\frac{190}{70000}} \approx 0.83 \text{ (Table 6.1 EN1999.01.04)}$$

Συνεπώς,

$$V_{b,Rd} = \left(\frac{h_w}{\sin \phi} \right) \times t \times \frac{f_{bv}}{\gamma_{M1}} = \left(\frac{39}{\sin 60^\circ} \right) \times 1 \times \frac{110.20}{1.10} = 4.51 \text{ kN}$$

Η παραπάνω διατμητική αντοχή αντιστοιχεί σε ένα κορμό. Στο φάτνωμα μήκους 128mm η τέμνουσα δύναμη παραλαμβάνεται από 2 κορμούς οπότε η ανά μέτρο διατμητική αντοχή έναντι τέμνουσας είναι:

$$V_{b,Rd} / m = \frac{4.51 \text{ kN}}{(0.128/2)} = 70.47 \text{ kN / m}$$

5.2.2.4 Αντοχή Διατομής Τραπεζοειδούς Φύλλου Αλουμινίου EL T 39 896 Έναντι Εγκάρσιων Συγκεντρωμένων Κατακόρυφων Διατμητικών Δυνάμεων (Shear cross-section resistance to local transverse forces)

Στην περιοχή των ακραίων ή ενδιάμεσων στηρίξεων οι δυνάμεις των αντιδράσεων δύναται να προκαλέσουν αστοχία του κορμού κοντά στο πέλμα (πλαστική σύνθλιψη κορμού, ρυτίδωση, κύρτωση του κορμού). Για το λόγο αυτό προσδιορίζεται η αντοχή του τραπεζοειδούς φύλλου αλουμινίου $R_{w,Rd}$ έναντι συγκεντρωμένης δύναμης στις περιοχές των ενδιάμεσων και ακραίων στηρίξεων. Ειδικότερα, σύμφωνα με την παράγραφο 6.1.7 του EN 1999.01.04 ισχύει:

$$R_{w,Rd} = \frac{a \times t^2 \sqrt{f_0 E} \left(1 - 0.1 \sqrt{\frac{r}{t}} \right) \left(0.5 + \sqrt{0.02 \frac{l_a}{t}} \right) \left(2.4 + (\phi / 90)^\circ \right)^2}{\gamma_{M1}}$$

όταν:

- η καθαρή απόσταση c μεταξύ του πλάτους κατανομής της αντίδρασης στήριξης από το άκρο είναι τουλάχιστον 40mm

- για την διατομή ισχύουν οι παρακάτω προϋποθέσεις:

$$\frac{r}{t} \leq 10 \Rightarrow \frac{2.5}{1} = 2.5 \leq 10$$

$$\frac{h_w}{t} \leq 200 \sin \varphi \Rightarrow \frac{39}{1} \leq 200 \sin 60^\circ \Rightarrow 39 \leq 173$$

$$45 \leq \varphi \leq 90 \Rightarrow 45 \leq \varphi = 60^\circ \leq 90$$

Ακολούθως υπολογίζεται η διατμητική αντοχή του τραπεζοειδούς φύλλου αλουμινίου EL T 39 896 στις θέσεις των αντιδράσεων στήριξης.

Ακραία στήριξη που απέχει $c \geq 1.5 \frac{h_w}{t} = 1.5 \times \frac{39}{1} \geq 58.5mm$ από το ελεύθερο άκρο.

Η περίπτωση αυτή ανήκει στην κατηγορία 2 με $a = 0.15$. Θεωρώ $\beta_v \leq 0.2$, $l_a = s_s = 40mm$.

$$R_{w.Rd}^e = \frac{0.15 \times 1^2 \sqrt{190 \times 70000} \left(1 - 0.1 \sqrt{\frac{2.5}{1}}\right) \left(0.5 + \sqrt{0.02 \frac{40}{1}}\right) \left(2.4 + (60/90)^2\right)}{1.10} = 1660.6 N = 1.66kN$$

Η αντοχή αυτή αφορά έναν κορμό που υφίσταται σε πλάτος 64mm, άρα η ανά τρέχον μέτρο αντοχή είναι:

$$R_{w.Rd}^e / m = \frac{1.66kN}{0.064} = 25.94 kN / m$$

Ενδιάμεση στήριξη

Η περίπτωση αυτή ανήκει στην κατηγορία 2 με $\alpha = 0.075$. Είναι $\beta_v = 0$, $l_a = s_s = 40mm$

$$R_{w,Rd}^m = \frac{0.15 \times 1^2 \sqrt{190 \times 70000} \left(1 - 0.1 \sqrt{\frac{2.5}{1}} \right) \left(0.5 + \sqrt{0.02 \frac{40}{1}} \right) \left(2.4 + (60/90)^2 \right)}{1.10} = 1660.6 \text{ N} = 1.66 \text{ kN}$$

Η αντοχή αυτή αφορά έναν κορμό που υφίσταται σε πλάτος 64mm, άρα η ανά τρέχον μέτρο αντοχή είναι:

$$R_{w,Rd}^m / m = \frac{1.66 \text{ kN}}{0.064} = 25.94 \text{ kN / m}$$

5.2.2.5 Σύνοψη αποτελεσμάτων-Αντοχές διατομής τραπεζοειδούς φύλλου αλουμινίου EL T 39 896

Πίνακας 5.3: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

	$A_{gr}/A_{eff} (cm^2)$ Πλήρης/Ενεργός	$I_{y-y,gr}/I_{y-y,eff} (cm^4)$ Πλήρης/Ενεργός	$w_{y-y,gr}/w_{y-y,eff} (cm^3)$ Πλήρης/Ενεργός
Μεγέθη ανοιγμένα σε διατομή πλάτους 1000mm	13.52/11.33	30/24.53	11.95/11.02


Πίνακας 5.4: Αντοχή σε κάμψη, διάτμηση και στροφή.

	$M_{c,Rd}^+ (kNm)$	$M_{c,Rd}^- (kNm)$	$V_{b,Rd} (kN)$	$R_{w,Rd}^+ (kN)$	$R_{w,Rd}^m (kN)$
Μεγέθη ανοιγμένα σε διατομή πλάτους 1000mm	2.063	1.898	70.47	25.94	25.94

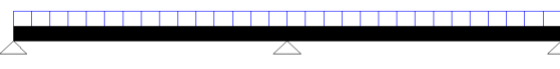
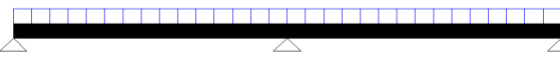
5.3 Υπολογισμός Οριακών Φορτίων Στατικών Συστημάτων Συνεχών Πλακών Από Τραπεζοειδές Φύλλο Αλουμινίου EL T 39 896

Δρώντα εντατικά μεγέθη σε συνεχή συστήματα πλακολωρίδων απο διατομή EL T 39 896 πλάτους 1m.



- Αμφιέριστη δοκός

		Άνοιγμα: L(m) Φορτίο: q(kN/m) Δυσκαμψία διατομής: $EI_{y-y,gr} (kNm^2)$	
Μέγιστη ροπή ανοίγματος	Μέγιστη τέμνουσα	Μέγιστη τιμή Αντίδρασης στις ακραίες στηρίξεις	Μέγιστη βύθιση
$maxM_{sd}^+ (kN/m)$	$maxV_{sd} (kN)$	$maxR_{sd} (kN)$	$maxf_{sd} (m)$
$maxM_{sd}^+ = \frac{qL^2}{8}$	$maxV_{sd} = \frac{qL}{2}$	$maxR_{sd} = \frac{qL}{2}$	$maxf_{sd} = \frac{5qL^4}{384EI_{y-y,gr}}$

- Συνεχής δοκός δύο ίσων ανοιγμάτων

		Άνοιγμα: L(m) Φορτίο: q(kN/m/m) Δυσκαμψία διατομής: $EI_{eff,ser} (kNm^2)$	
Μέγιστη ροπή ανοίγματος	Μέγιστη ροπή ενδιάμεσου στηρίγματος	Μέγιστη τέμνουσα	Μέγιστη τιμή αντίδρασης (στη μεσαία στήριξη)
$maxM_{sd}^+ (kN/m)$	$maxM_{sd}^- (kN/m)$	$maxV_{sd} (kN)$	$maxR_{sd} (kN)$
$maxM_{sd}^+ = \frac{9qL^2}{128}$	$maxM_{sd}^- = -\frac{qL^2}{8}$	$maxV_{sd} = \frac{5qL}{8}$	$maxR_{sd} = \frac{10qL}{8}$
		Η ενεργός ροπή αδράνειας $I_{eff,ser}$ προσδιορίζεται βάση της εξίσωσης: $I_{eff,ser} = I_{y-y,gr} - \sigma_{gr} \times \frac{(I_{y-y,gr} - I_{y-y,eff})}{f_0}$ (Εξ.7.1 EN 1999.01.04), όπου σ_{gr} η μέγιστη θλιπτική τάση στην Ο.Κ.Λ. θεωρώντας πλήρη διατομή.	
Μέγιστη βύθιση			
$maxf_{sd} (m)$			
$maxf_{sd} = \frac{qL^4}{184.6EI_{eff,ser}}$			



▪ Συνεχής δοκός τριών ίσων ανοιγμάτων

		Άνοιγμα: L(m) Φορτίο: q(kN/m/m) Δυσκαμψία διατομής: $EI_{eff,ser}$ (kNm ²)	
Μέγιστη ροπή ανοίγματος	Μέγιστη ροπή ενδιάμεσου στηρίγματος	Μέγιστη τέμνουσα	Μέγιστη τιμή αντίδρασης (στη μεσαία στήριξη)
$maxM_{sd}^+$ (kN/m)	$maxM_{sd}^-$ (kN/m)	$maxV_{sd}$ (kN)	$maxR_{sd}$ (kN)
$maxM_{sd}^+ = \frac{2qL^2}{25}$	$maxM_{sd}^- = -\frac{qL^2}{10}$	$maxV_{sd} = \frac{3qL}{5}$	$maxR_{sd} = \frac{11qL}{10}$
		Η ενεργός ροπή αδράνειας $I_{eff,ser}$ προσδιορίζεται βάση της εξίσωσης:	
Μέγιστη βύθιση		$I_{eff,ser} = I_{y-y,gr} - \sigma_{gr} \times \frac{(I_{y-y,gr} - I_{y-y,eff})}{f_0}$	
$maxf_{sd}$ (m)		(Εξ.7.1 EN 1999.01.04), όπου σ_{gr} η μέγιστη θλιπτική τάση στην Ο.Κ.Λ. θεωρώντας πλήρη διατομή.	
$maxf_{sd} = \frac{0.006884qL^4}{EI_{eff,ser}}$			

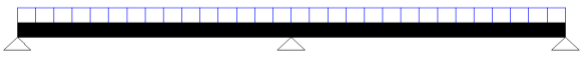
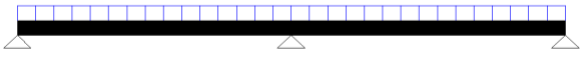
Τύποι υπολογισμού οριακών φορτίων για τις Ο.Κ.Α. και Ο.Κ.Λ σε συνεχή συστήματα πλακολωρίδων απο διατομή EL T 39 896 πλάτους

1m.



- **Αμφιέριστη δοκός**

		Άνοιγμα: L(m) Φορτίο: q(kN/m/m) Δυσκαμψία διατομής: $EI_{y-y,gr} (kNm^2)$	
Μέγιστο οριακό φορτίο για αστοχία σε κάμψη	Μέγιστο οριακό φορτίο για αστοχία σε διάτμηση (τέμνουσα)	Μέγιστο οριακό φορτίο για διατμητική αστοχία κορμού στις ακραίες στηρίξεις	Μέγιστο οριακό φορτίο για την Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (Ultimate Limit State) Ο.Κ.Α.
$max q_{sd}^M (kN/m/m)$	$max q_{sd}^V (kN/m)$	$max R_{sd} (kN/m)$	$max q_{sd}^{O.K.A.} (kN/m)$
$q_{sd}^M = \frac{8M_{c,Rd}^+}{L^2}$	$q_{sd}^V = \frac{2V_{b,Rd}}{L^2}$	$q_{sd}^{Rsd} = \frac{2R_{w,Rd}^e}{L}$ ή $q_{sd}^{Rsd} = \frac{2R_{w,Rd}^m}{L}$	$max q_{sd}^{O.K.A.} = \min (q_{sd}^M, q_{sd}^V, q_{sd}^{Rsd})$
			
Μέγιστο οριακό φορτίο για την Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (Serviceability Limit State) Ο.Κ.Λ. (όρια L/200 και L/300)		Μέγιστο επιτρεπόμενο οριακό φορτίο	
$q_{sd}^{L/200} = \frac{384EI_{y-y}}{1000L^3}, q_{sd}^{L/300} = \frac{384EI_{y-y}}{1500L^3}$		$max q_{sd}^{allowed} = \left(\min \frac{q_{sd}^{O.K.A.}}{1.5}, q_{sd_{L/200}^{O.K.A.}}, q_{sd_{L/300}^{O.K.A.}} \right)$	

▪ **Συνεχής δοκός δύο ίσων ανοιγμάτων**

		Άνοιγμα: L(m) Φορτίο: q(kN/m/m) Δυσκαμψία διατομής: $EI_{y-y,gr}$ (kNm ²)	
Μέγιστο οριακό φορτίο για αστοχία σε κάμψη	Μέγιστο οριακό φορτίο για αστοχία σε διάτμηση (τέμνουσα)	Μέγιστο οριακό φορτίο για διατμητική αστοχία κορμού στην ενδιάμεση και στις ακραίες στηρίξεις	Μέγιστο οριακό φορτίο για την Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (Ultimate Limit State) Ο.Κ.Α.
$max q_{sd}^M$ (kN/m/m)	$max q_{sd}^V$ (kN/m)	$max R_{sd}$ (kN/m)	$max q_{sd}^{O.K.A.}$ (kN/m)
$q_{sd}^M = \min \left(\frac{128M_{c,Rd}^+}{9L^2}, \frac{8M_{c,Rd}^-}{L^2} \right)$	$q_{sd}^V = \frac{8V_{b,Rd}}{5L}$	$q_{sd}^{Rsd} = \min \left(\frac{8R_{w,Rd}^m}{10L}, \frac{8R_{w,Rd}^e}{3L} \right)$	$max q_{sd}^{O.K.A.} = \min (q_{sd}^M, q_{sd}^V, q_{sd}^{Rsd})$
			
Μέγιστο οριακό φορτίο για την Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (Serviceability Limit State) Ο.Κ.Λ. (όρια L/200 και L/300)		Μέγιστο επιτρεπόμενο οριακό φορτίο	
$q_{sd}^{L/200} = \frac{184.6EI_{y-y}}{200L^3}, q_{sd}^{L/300} = \frac{184.6EI_{y-y}}{300L^3}$		$max q_{sd}^{allowed} = \left(\min \frac{q_{sd}^{O.K.A.}}{1.5}, q_{sdL/200}^{O.K.A.}, q_{sdL/300}^{O.K.A.} \right)$	

▪ Συνεχής δοκός τριών ίσων ανοιγμάτων

		Άνοιγμα: L(m) Φορτίο: q(kN/m/m) Δυσκαμψία διατομής: $EI_{y-y,gr} (kNm^2)$	
Μέγιστο οριακό φορτίο για αστοχία σε κάμψη	Μέγιστο οριακό φορτίο για αστοχία σε διάτμηση (τέμνουσα)	Μέγιστο οριακό φορτίο για διατμητική αστοχία κορμού στην ενδιάμεση στήριξη	Μέγιστο οριακό φορτίο για την Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (Ultimate Limit State) Ο.Κ.Α.
$max q_{sd}^M (kN/m/m)$	$max q_{sd}^V (kN/m)$	$max R_{sd} (kN/m)$	$max q_{sd}^{O.K.A.} (kN/m)$
$q_{sd}^M = \min \left(\frac{25M_{c,Rd}^+}{2L^2}, \frac{10M_{c,Rd}^-}{L^2} \right)$	$q_{sd}^V = \frac{5V_{b,Rd}}{3L}$	$q_{sd}^{Rsd} = \min \left(\frac{10R_{w,Rd}^m}{11L}, \frac{5R_{w,Rd}^e}{2L} \right)$	$max q_{sd}^{O.K.A.} = \min (q_{sd}^M, q_{sd}^V, q_{sd}^{Rsd})$
			
Μέγιστο οριακό φορτίο για την Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (Serviceability Limit State) Ο.Κ.Λ. (όρια L/200 και L/300)		Μέγιστο επιτρεπόμενο οριακό φορτίο	
$q_{sd}^{L/200} = \frac{EI_{y-y}}{1.3768L^3}, q_{sd}^{L/300} = \frac{EI_{y-y}}{2.0652L^3}$		$max q_{sd}^{allowed} = \left(\min \frac{q_{sd}^{O.K.A.}}{1.5}, q_{sdL/200}^{O.K.L.}, q_{sdL/300}^{O.K.L.} \right)$	

Πίνακες οριακών φορτίων σε συνεχή συστήματα πλακολωρίδων απο διατομή EL T 39 896 πλάτους 1m.

Πίνακας 5.5: Αμφιέριστες πλακολωρίδες.

	Αμφιέριστες πλακολωρίδες διατομής EL T 39 896 πλάτους 1m							
	Οριακά φορτία σχεδιασμού σε kN/m.							
Κρίσιμη οριακή κατάσταση για όλα τα μήκη: Η Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας	L(m)	q_{sd}^M	q_{sd}^V	q_{sd}^{Rsd}	$q_{sd}^{O.K.A.}$	$q_{sd}^{L/200}$	$q_{sd}^{L/300}$	$maxq_{sd}^{allowed}$
	1.00	16.50	140.94	51.88	16.50	8.07	5.38	8.07 / 5.38
	1.25	10.56	112.75	41.50	10.56	4.13	2.75	4.13 / 2.75
	1.50	7.34	93.96	34.59	7.34	2.39	1.59	2.39 / 1.59
	1.75	5.39	80.54	29.65	5.39	1.51	1.00	1.51 / 1.00
	2.00	4.13	70.47	25.94	4.13	1.01	0.67	1.01 / 0.67
	2.25	3.26	62.64	23.06	3.26	0.71	0.47	0.71 / 0.47
	2.50	2.64	56.38	20.75	2.64	0.52	0.34	0.52 / 0.34
	2.75	2.18	51.25	18.87	2.18	0.39	0.26	0.39 / 0.26
	3.00	1.83	46.98	17.29	1.83	0.30	0.20	0.30 / 0.20

q^{design} : προσδιορίζεται ως το ελάχιστο μεταξύ:

- του φορτίου της οριακής κατάστασης αστοχίας (Ο.Κ.Α.), διαιρεμένο με συντελεστή ασφαλείας φορτίων 1.50
- του φορτίου της οριακής κατάστασης λειτουργικότητας (Ο.Κ.Λ.), για θεώρηση ορίων L/200 ή L/300.

Πίνακας 5.6: Πλακολωρίδες συνεχούς δοκού δύο ίσων ανοιγμάτων.

	<u>Πλακολωρίδες συνεχούς δοκού 2 ίσων ανοιγμάτων</u> <u>διατομής EL T 39 896 πλάτους 1m</u> <u>Οριακά φορτία σχεδιασμού σε kN/m</u>								
	L(m)	q_{sd}^M	q_{sd}^V	$q_{sd}^{R_{sd},e}$	$q_{sd}^{R_{sd},m}$	$q_{sd}^{O.K.A.}$	$q_{sd}^{L/200}$	$q_{sd}^{L/300}$	$max q_{sd}^{allowed}$
<p>Κρίσιμη οριακή κατάσταση:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Για τα μήκος L=1.00m, η Ο.Κ.Α. και συγκεκριμένα η κάμψη. ▪ Για τα μήκη L=1.25,L=1.50,L=1.75 και με όριο λειτουργικότητας το L/200, κρίσιμη είναι η Ο.Κ.Α. και συγκεκριμένα η κάμψη. ▪ Για όλες τις άλλες περιπτώσεις κρίσιμη είναι η Ο.Κ.Λ. 	1.00	15.18	112.75	69.17	20.75	15.18	17.38	12.01	10.12
	1.25	9.72	90.20	55.34	16.60	9.72	9.09	6.24	6.48 / 6.24
	1.50	6.75	75.17	46.12	13.83	6.75	5.34	3.64	4.5 / 3.64
	1.75	4.96	64.43	39.53	11.86	4.96	3.39	2.31	3.31 / 2.31
	2.00	3.80	56.38	34.59	10.38	3.80	2.29	1.56	2.29 / 1.56
	2.25	3.00	50.11	30.74	9.22	3.00	1.62	1.10	1.62 / 1.10
	2.50	2.43	45.10	27.67	8.30	2.43	1.19	0.80	1.19 / 0.80
	2.75	2.01	41.00	25.15	7.55	2.01	0.90	0.60	0.90 / 0.60
	3.00	1.69	37.58	23.06	6.92	1.69	0.69	0.47	0.69 / 0.47

q^{design} : προσδιορίζεται ως το ελάχιστο μεταξύ:

- του φορτίου της οριακής κατάστασης αστοχίας (Ο.Κ.Α.), διαιρεμένο με συντελεστή ασφαλείας φορτίων 1.50
- του φορτίου της οριακής κατάστασης λειτουργικότητας (Ο.Κ.Λ.), για θεώρηση ορίων L/200 ή L/300.

Πίνακας 5.7: Πλακολωρίδες συνεχούς δοκού τριών ίσων ανοιγμάτων.

	Πλακολωρίδες συνεχούς δοκού 3 ίσων ανοιγμάτων διατομής EL T 39 896 πλάτους 1m Οριακά φορτία σχεδιασμού σε kN/m								
	L(m)	q_{sd}^M	q_{sd}^V	$q_{sd}^{Rsd,e}$	$q_{sd}^{Rsd,m}$	$q_{sd}^{O.K.A.}$	$q_{sd}^{L/200}$	$q_{sd}^{L/300}$	$maxq_{sd}^{allowed}$
Κρίσιμη οριακή κατάσταση: <ul style="list-style-type: none"> Για τα μήκος L=1.00m, και με όριο λειτουργικότητας το L/200, κρίσιμη είναι η Ο.Κ.Α. και συγκεκριμένα η κάμψη. Για όλες τις άλλες περιπτώσεις κρίσιμη είναι η Ο.Κ.Λ. 	1.00	18.98	117.45	64.85	23.58	18.98	13.89	9.55	12.65 / 9.55
	1.25	12.15	93.96	51.88	18.87	12.15	7.24	4.95	7.24 / 4.95
	1.50	8.44	78.30	43.23	15.72	8.44	4.24	2.89	4.24 / 2.89
	1.75	6.20	67.11	37.06	13.48	6.20	2.70	1.83	2.70 / 1.83
	2.00	4.74	58.73	32.43	11.79	4.74	1.82	1.23	1.82 / 1.23
	2.25	3.75	52.20	28.82	10.48	3.75	1.28	0.87	1.28 / 0.87
	2.50	3.04	46.98	25.94	9.43	3.04	0.94	0.63	0.94 / 0.63
	2.75	2.51	42.71	23.58	8.58	2.51	0.71	0.48	0.71 / 0.48
3.00	2.11	39.15	21.62	7.86	2.11	0.55	0.37	0.55 / 0.37	

q^{design} : προσδιορίζεται ως το ελάχιστο μεταξύ:

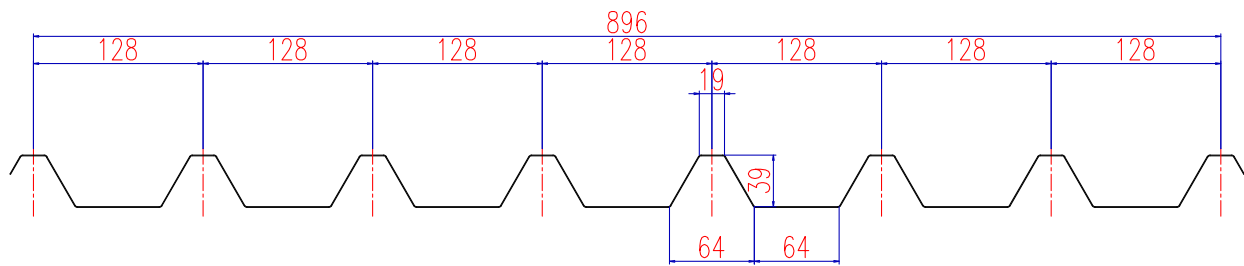
- του φορτίου της οριακής κατάστασης αστοχίας (Ο.Κ.Α.), διαιρεμένο με συντελεστή ασφαλείας φορτίων 1.50
- του φορτίου της οριακής κατάστασης λειτουργικότητας (Ο.Κ.Λ.), για θεώρηση ορίων L/200 ή L/300.

5.4 Επίλυση Μέσω της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (finite element method) είναι μια προσεγγιστική αριθμητική μέθοδος επίλυσης προβλημάτων συνοριακών και αρχικών τιμών. Αυτές αποτυπώνονται μέσω μερικών διαφορικών εξισώσεων, των οποίων η αναλυτική λύση είναι εφικτή σε ειδικές περιπτώσεις. Μέσω αυτής της μεθόδου είναι δυνατόν να αποτυπωθεί κάθε είδους εξίσωση γεωμετρία και να επιλυθεί λαμβάνοντας αξιόπιστα αποτελέσματα. Έχει τη δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων μικρών και μεγάλων παραμορφώσεων δηλαδή ελαστικά και ανελαστικά, γραμμικών και μη γραμμικών προβλημάτων αλλά και ανάλυσης ιδιομορφών.

Η θεμελιώδης αρχή της μεθόδου είναι ο διαχωρισμός του αρχικού σύνθετου γεωμετρικού προβλήματος σε πλήθος απλών υποπεδίων, που ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία και συνδέονται μέσω πεπερασμένου αριθμού κόμβων. Είναι δυνατόν να προσομοιωθούν γραμμικοί και πλαισιωτοί φορείς με στοιχεία δοκού δηλαδή γραμμικά στοιχεία, τετράπλευρα ή τριγωνικά, τα οποία έχουν κόμβους στα άκρα τους. Στην περίπτωση κελυφωτής κατασκευής το πρόβλημα περιπλέκεται. Απαιτεί εμπειρία στην επιλογή του στοιχείου προσομοίωσης αλλά και του πλήθους των στοιχείων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Η διακριτοποίηση των στοιχείων πρέπει να γίνεται σύμφωνα με τη συμπεριφορά παρόμοιων κατασκευών είτε με μία σειρά αναλύσεων συνεχούς πύκνωσης ενός αρχικού αραιού δικτύου και καταγραφή του σφάλματος με σκοπό την καλύτερη δυνατή σύγκλιση στη λύση του προβλήματος.

Γενικότερα η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί ένα «όπλο» επίλυσης πρακτικών προβλημάτων για τους μηχανικούς, που συντρέχει με την τεχνολογία των Η/Υ. Αυτό συμβαίνει διότι οι βαθμοί ελευθερίας του προβλήματος που τίθεται προς επίλυση είναι ίσοι σε πλήθος με τις αλγεβρικές εξισώσεις του συστήματος που περιγράφουν το πρόβλημα και αυτό μπορεί να επιλυθεί μόνο μέσω της χρήσης Η/Υ Παπαδρακάκης, Μ., (2001).



Σχήμα 5.8: Διατομή τραπεζοειδούς φύλλου αλουμινίου (όλες οι διαστάσεις είναι σε mm).

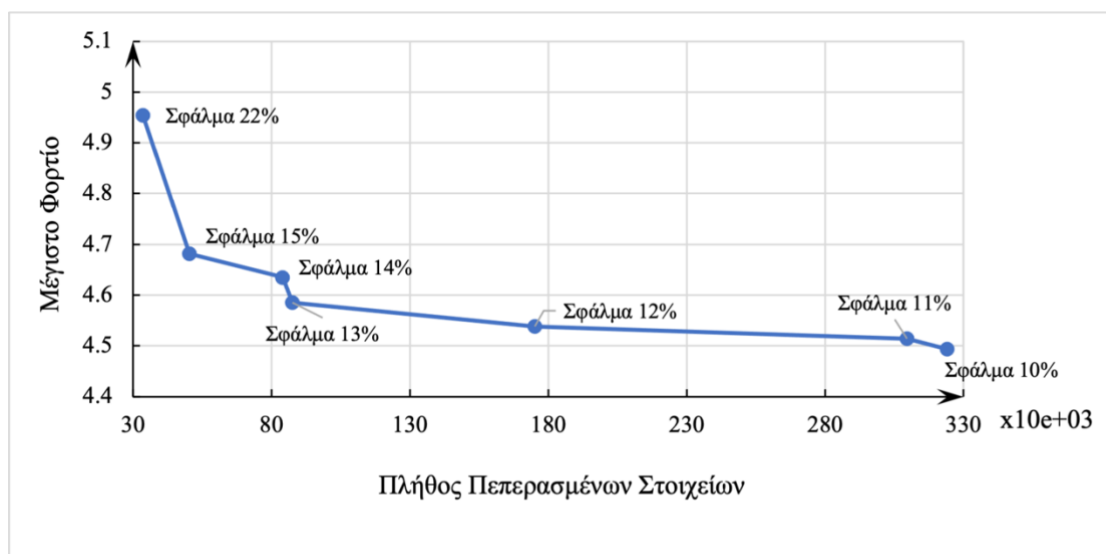
Στο τραπεζοειδές φύλλο αλουμινίου του σχήματος 5.8 προσδιορίστηκε η καμπτική του συμπεριφορά και εξήχθη το διάγραμμα φορτίου - βύθισης, από το οποίο είναι δυνατόν να βρεθεί το οριακό κατακόρυφο φορτίο που δύναται να φέρει μέχρι την αστοχία του. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκε ένα κατάλληλο προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων που έχει τη δυνατότητα να αναπαράξει με επιτυχία τα μηχανικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την κάμψη του. Παράλληλα εφαρμόστηκε μη γραμμική ανάλυση λαμβάνοντας υπόψη τη μη γραμμική συμπεριφορά των υλικών (material nonlinearity) και τη δυνατότητα του υλικού να αναπτύξει μεγάλες παραμορφώσεις (μη γραμμικές κινηματικές συνθήκες-nonlinear kinematic equations). Για την επίτευξη των παραπάνω η ανάλυση μέσω πεπερασμένων στοιχείων (finite element analysis) έγινε με τη χρήση του προηγμένου λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων MSC Software Marc Mentat.

5.4.1 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Τα αριθμητικά προσομοιώματα του φύλλου αλουμινίου συνεχών πτυχώσεων αναπτύχθηκαν μέσω του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων MSC Marc. Το φύλλο αλουμινίου καταπονείται σε κάμψη με την άνω ίνα να θλίβεται και την κάτω ίνα να εφελκύεται, στα άνω και κάτω πέλαμα. Ο κορμός βρίσκεται σε καθεστώς επίπεδης έντασης. Οι θλιπτικές τάσεις είναι ένα μέγεθος που προκαλεί φαινόμενα αστάθειας συνεπώς το φύλλο αλουμινίου κινδυνεύει να αστοχήσει λόγω τοπικού λυγισμού. Το καθεστώς φόρτισης λοιπόν, μας επιβάλλει να προσομοιώσουμε την κατασκευή με τετρακομβικά πεπερασμένα στοιχεία κελύφους (4-node Quadrilateral Thick Shell Element) έξι βαθμών ελευθερίας στον κάθε κόμβο. Έγινε επιλογή του στοιχείου 75 από την βιβλιοθήκη του λογισμικού MSC Marc. Το συγκεκριμένο στοιχείο έχει την δυνατότητα να αναπαριστά την κάμψη εντός και εκτός του επιπέδου, δηλαδή η λειτουργία του είναι μεμβρανική. Απεικονίζει με ακρίβεια κυματισμούς

που μπορούν να λάβουν μέρος κατά την φόρτιση, έτσι αποτελεί το πλέον κατάλληλο στοιχείο για την εξυπηρέτηση των απαιτήσεων της προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκε.

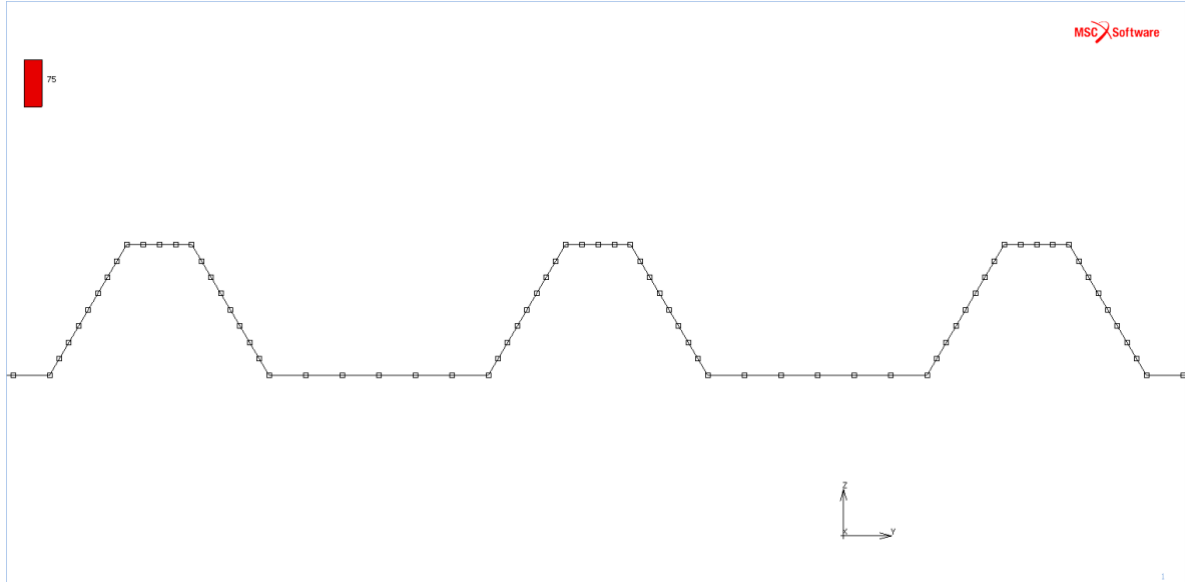
Με το στοιχείο 75 προσομοιώθηκε η μέση επιφάνεια του φύλλου αλουμινίου, ενώ η τρισδιάστατη υπόσταση του εισήχθη έμμεσα μέσω της εισαγωγής του πάχους στα στοιχεία. Εδώ σημειώνεται ότι το πάχος που δόθηκε στο λογισμικό είναι 1.12 mm και όχι 1 mm που δίνεται από τον κατασκευαστή και αυτό διότι η πρώτη τιμή είναι πιο ρεαλιστική μιας και αποτελεί μία μέση τιμή του πραγματικού πάχους των πειραματικών δοκιμών. Αρχικός στόχος μας ήταν η δημιουργία ενός δικτύου, τα στοιχεία του οποίου να προσομοιώνουν με ακρίβεια το πρόβλημα. Για το λόγω αυτό πραγματοποιήθηκε μία σειρά αναλύσεων στην οποία γινότανε πύκνωση του δικτύου πεπερασμένων στοιχείων και σύγκριση των τελικών αποτελεσμάτων με αυτά των πειραματικών δεδομένων. Στη συνέχεια υπολογιζόταν το σφάλμα που παρουσίαζε η κάθε διακριτοποίηση ώστε να υιοθετηθεί μια τελική, η οποία θα προσομοιώνει το πρόβλημα με ικανοποιητική ακρίβεια, ενώ παράλληλα θα έχει τον μικρότερο δυνατό αριθμό πεπερασμένων στοιχείων μειώνοντας έτσι το υπολογιστικό κόστος Brebbia, C.A., Dominguez, J., (1994).



Σχήμα 5.9: Διάγραμμα σφάλματος ανάλογα με την πύκνωση του δικτύου πεπερασμένων στοιχείων.

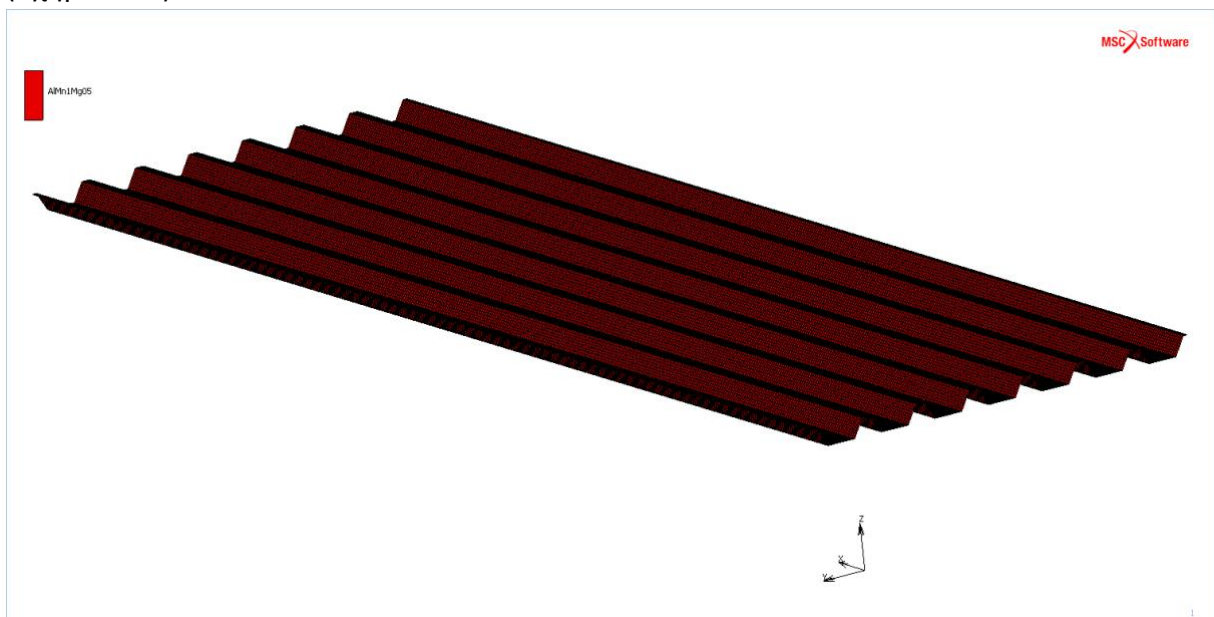
Η τελική διακριτοποίηση του μοντέλου βασίστηκε στα συμπεράσματα της παραπάνω σειράς αναλύσεων και των πειραματικών δεδομένων καθώς γινόταν ξεκάθαρη η ανάγκη πύκνωσης του δικτύου στους κορμούς και τα άνω πέλματα, διότι είναι τα περισσότερο ευαίσθητα σε τοπικό λυγισμό όπως αποδείχθηκε από τα πειράματα που αναφέρονται στην

αρχή του κεφαλαίου. Έτσι υιοθετήθηκε το τελικό μοντέλο, όπου οι κορμοί διακριτοποιήθηκαν σε οκτώ πεπερασμένα στοιχεία καθ' ύψος. Τα κάτω πέλματα σε έξι. Τα άνω πέλματα σε τέσσερα, πλην των δύο ακριανών που διακριτοποιήθηκαν σε ένα λόγω του μικρού τους μήκους συγκριτικά με τα ενδιάμεσα (σχήμα 5.10). Κατά μήκος όλα τα μέλη



Σχήμα 5.10: Τομή λεπτομερειών της τελικής διακριτοποίησης των στοιχείων κατά πλάτος.

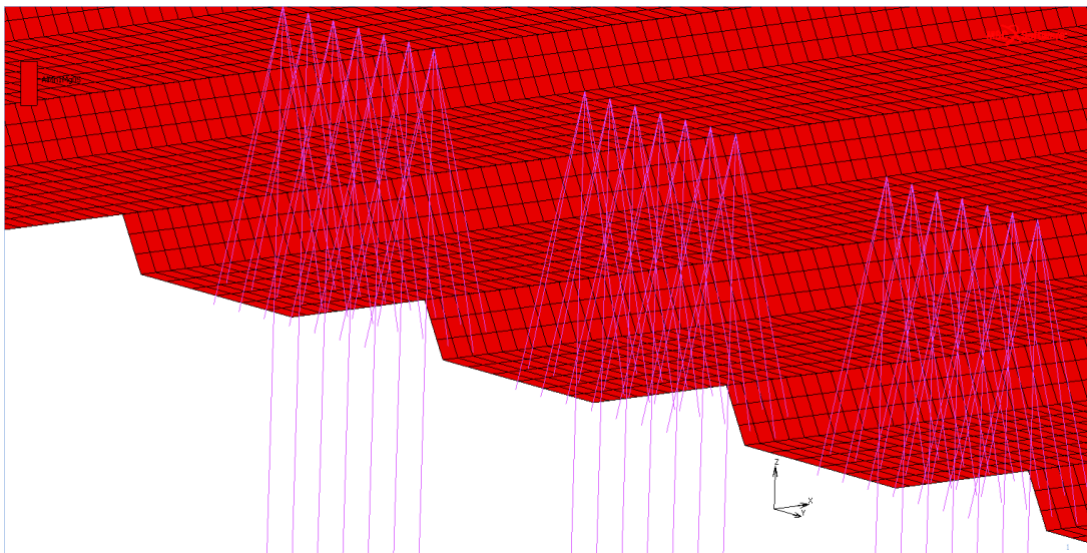
διακριτοποιήθηκαν σε τριακόσια πεπερασμένα στοιχεία, ώστε στα σημεία επαφής οι κόμβοι να είναι κοινοί. Έτσι έχει δημιουργηθεί ένα δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων που αποτελείται από 108000 πεπερασμένα στοιχεία, τα οποία ενώνονται μεταξύ τους με 108781 κόμβους (σχήμα 5.11).



Σχήμα 5.11: Τρισδιάστατη υπόσταση του τελικού μοντέλου προσομοίωσης.

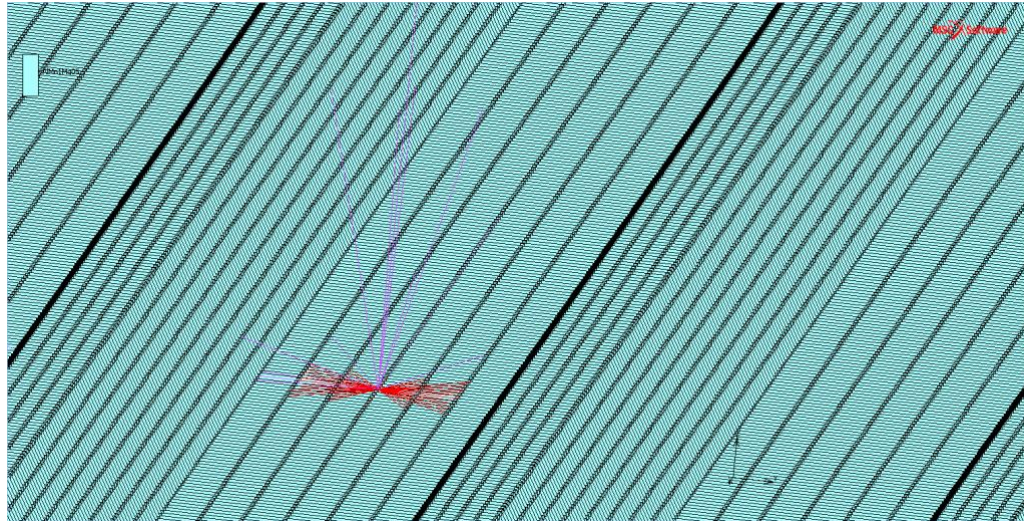
5.4.2 ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Σύμφωνα με την πειραματική διάταξη το φύλλο αλουμινίου στηρίζεται σε απόσταση 250 mm από τα ελεύθερα άκρα του μέσω έδρασης σε δύο μεταλλικές δοκούς, οι οποίες βρίσκονται πάνω σε ένα πύρο, προσδίδοντας με αυτό τον τρόπο τη δυνατότητα στροφής και μετακίνησης κατά τον οριζόντιο άξονα, ενώ παράλληλα απαγορεύουν τις μετακινήσεις στον κατακόρυφο άξονα. Με αυτό τον τρόπο λαμβάνουμε μόνο μία κάθετη αντίδραση, η οποία μπορεί να προσομοιωθεί ως κύλιση στο λογισμικό. Για την δημιουργία της κύλισης έγινε δέσμευση του κατακόρυφου μεταφορικού βαθμού ελευθερίας (κατά τον άξονα z) και εφαρμόστηκε σε όλους τους κόμβους των κάτω πελμάτων που απέχουν 250 mm από τα ελεύθερα άκρα του φύλλου αλουμινίου (σχήμα 5.13). Για την συνοριακή συνθήκη της φόρτισης ακολουθήθηκε ένα παρόμοιο σύστημα με αυτό της πειραματικής διάταξης. Στον



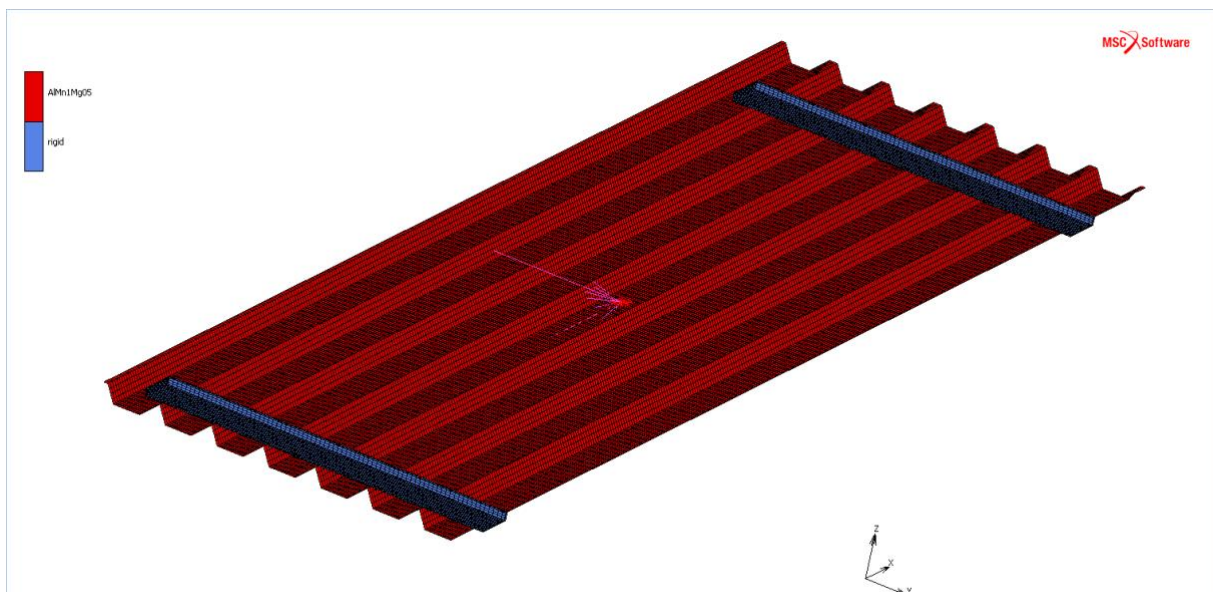
Σχήμα 5.12: Προσομοίωση συνοριακών συνθηκών στήριξης.

κόμβο που βρίσκεται στο κέντρο συμμετρίας κατά x και y του φύλλου εφαρμόστηκε το φορτίο, ο τρόπος επιβολής του οποίου βασίζεται στις εξαναγκασμένες μετακινήσεις, επιπλέον δεσμεύτηκε η μετακίνηση στο επίπεδο, με σκοπό την επίτευξη της ισοστατικότητας του φορέα. Θεωρήθηκε άκαμπτο υλικό σε αποστάσεις όμοιες με αυτές του ξύλινου ορθογώνιου στοιχείου ενώ παράλληλα έγινε δέσμευση των κόμβων σε απόσταση 60 mm κατά μήκος και 43 mm κατά πλάτος, ώστε να κινούνται παράλληλα με τον κεντρικό κόμβο πετυχαίνοντας με αυτό τον τρόπο τη λειτουργία του εμβόλου (σχήμα 5.14).



Σχήμα 5.14: Προσομοίωση συνοριακής συνθήκης φόρτισης.

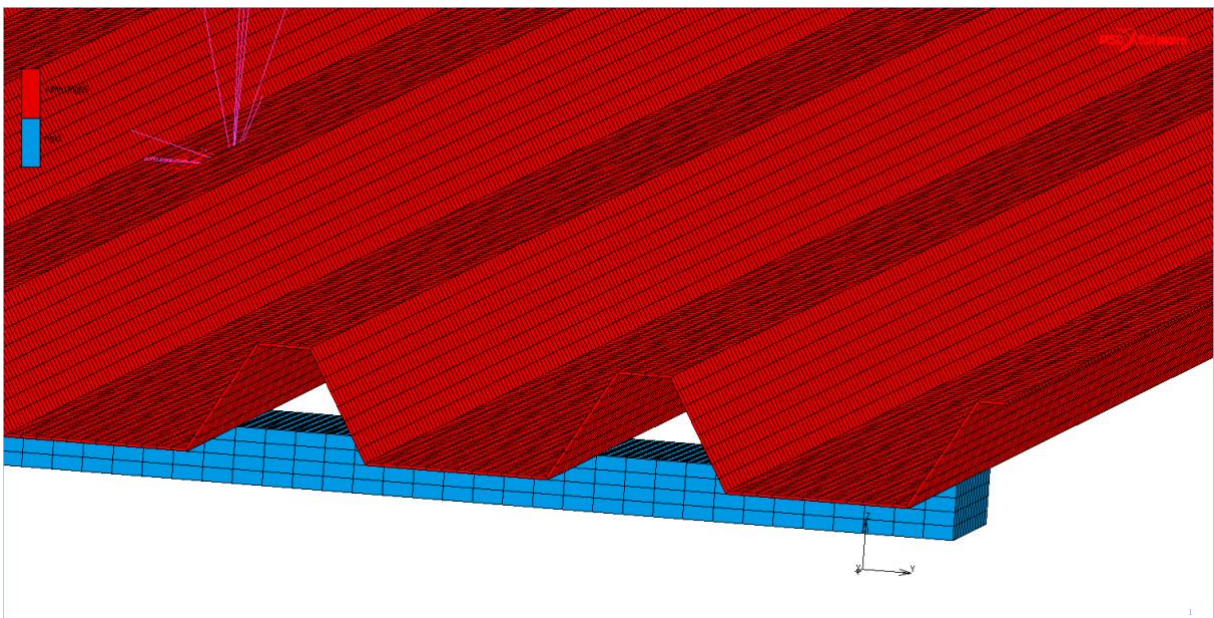
Στη συνέχεια, με σκοπό την εξαγωγή αποτελεσμάτων μεγαλύτερης ακρίβειας, κατασκευάστηκαν οι στηρίξεις μέσω γεωμετρικών στοιχείων, τα οποία αποτελούνται από χωρικά πεπερασμένα στοιχεία (στοιχείο 7 από την βιβλιοθήκη του Marc), διαστάσεων 100 mm x 20 mm x 832 mm και τοποθετήθηκαν σε αποστάσεις 250 mm από τα ελεύθερα άκρα. Προσομοιώνοντας έτσι τις συνθήκες στήριξης με μέθοδο, τέτοια ώστε να βρίσκεται πιο κοντά στην πραγματικότητα (σχήμα 5.15). Τα χωρικά πεπερασμένα στοιχεία, που έχουν τον ρόλο των στηρίξεων, έχουν δεσμεύσεις μετακινήσεων στον χώρο και δυνατότητα στροφής κατά τον άξονα x. Η συνθήκη έδρασης μεταξύ του φύλλου αλουμινίου και των γεωμετρικών



Σχήμα 5.13: Προσομοίωση συνθηκών στήριξης πειραματικής διάταξης με χωρικά πεπερασμένα στοιχεία.

στοιχείων επιτεύχθηκαν μέσω της εισαγωγής συνθηκών επαφής. Έτσι το μοντέλο της προσομοίωσης αποκτά μια πιο ρεαλιστική υπόσταση. Συνοψίζοντας έχουμε δύο διαφορετικούς συνδυασμούς για την προσομοίωση των συνοριακών συνθηκών της προσομοίωσης. Δεδομένου ότι και οι δύο προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με κοινές παραμέτρους η μόνη τους διαφορά, έγκειται στις συνοριακές συνθήκες, πιο συγκεκριμένα στην πολυπλοκότητα της κάθε μίας από αυτές. Παρατηρούμε ότι κατά την διεξαγωγή των αναλύσεων τα αποτελέσματα με συνοριακές συνθήκες είναι καλύτερα, συνεπώς υιοθετείται η παραδοχή συνοριακών συνθηκών για την προσομοίωση των στηρίξεων Zienkiewicz, O.C. etc (2005).

Στην προσπάθεια προσομοίωσης του πειράματος κατασκευάσθηκε και ένα μοντέλο χωρικών πεπερασμένων στοιχείων (solid elements). Το μοντέλο αυτό προσομοιώθηκε με το στοιχείο 7 της βιβλιοθήκης του λογισμικού MSC Marc. Οι στηρίξεις προσομοιώθηκαν με την παραδοχή στερεών σωμάτων χρησιμοποιώντας το ίδιο στοιχείο με το φύλλο αλουμινίου (βλ. υποενότητα 5.4.2). Μεταξύ των στοιχείων θεσπίστηκαν συνθήκες επαφής (contact interactions) αφού προηγουμένως είχαν τεθεί τα σώματα επαφής (contact bodies). Στο σχήμα 5.15 παρουσιάζεται το μοντέλο προσομοίωσης με χωρικά πεπερασμένα στοιχεία.



Σχήμα 5.15: Μοντέλο προσομοίωσης με χωρικά πεπερασμένα στοιχεία και συνθήκες επαφής

5.4.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΟΥ

Οι ιδιότητες του υλικού που εισήχθησαν στο λογισμικό, είναι βάση του Ευρωκώδικα 9 και πειραματικών δεδομένων για το αλουμίνιο Gehring, A., Saal, H., (2006). Οι τελικές τιμές, ελήφθησαν έπειτα από ένα πλήθος προσομοιώσεων, το οποίο προσέγγιζε με μεγαλύτερη ακρίβεια τα αποτελέσματα του πειράματος. Ο λόγος Poisson για το αλουμίνιο έχει την τιμή 0.3, το μέτρο ελαστικότητας σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα είναι ίσο με 70000 MPa στην πραγματικότητα όμως παρατηρούμε πως στα 80000 MPa υπάρχει μεγαλύτερη σύγκλιση με τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν.

Για τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, χρησιμοποιήθηκε ο πλήρης νόμος του υλικού όπως υπολογίσθηκε στο Κεφάλαιο 2 και ο ελαστοπλαστικός νόμος χωρίς κράτυνση με τον δεύτερο να υιοθετείται καθώς τα αποτελέσματα του ήταν πιο κοντά στα αποτελέσματα των πειραμάτων.

5.4.4 ΕΙΔΗ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Κάθε πρόβλημα μηχανικής απαιτεί ένα συγκεκριμένο είδος ανάλυσης με σκοπό την εύρεση του παραμορφωσιακού και εντατικού πεδίου του φορέα, ο οποίος υπόκεινται σε διαφόρων ειδών καταπονήσεις. Αυτό εξαρτάται από τον τύπο της φόρτισης (στατική, δυναμική), το υλικό (ελαστική ή ελαστοπλαστική απόκριση), τις συνοριακές συνθήκες αλλά και από τον τρόπο με τον οποίο αναμένεται να αστοχήσει ο φορέας. Όσον αφορά τα προβλήματα στατικής φόρτισης χρησιμοποιούνται δύο ειδών αναλύσεις. Η γραμμική ελαστική και η μη γραμμική ανάλυση. Η πρώτη χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου το υλικό επιδεικνύει ελαστική συμπεριφορά και υπάρχουν μικρές μετατοπίσεις. Η μη γραμμική ανάλυση εφαρμόζεται σε περιπτώσεις μη γραμμικότητας του υλικού, γεωμετρικής μη γραμμικότητας, θεώρηση μεγάλων παραμορφώσεων και μη γραμμικών συνοριακών συνθηκών.

Στην παρούσα εργασία μελετάται η καμπτική συμπεριφορά τραπεζοειδών φύλλων αλουμινίου υπό συγκεντρωμένη φόρτιση. Λόγω του τύπου της φόρτισης αναπαράγονται φαινόμενα αστάθειας και λυγισμού καθ' όλη την διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων. Η αστοχία που αναμένεται να συμβεί είναι λόγω τοπικού λυγισμού στα άνω πέλματα (αστοχία λόγω αστάθειας-instability failure). Για τον λόγο αυτό τα είδη αναλύσεων που θα

πραγματοποιηθούν, πρέπει να έχουν την ικανότητα να λάβουν υπόψη τα μη γραμμικά φαινόμενα, που πρόκειται να αναπτυχθούν κατά την προοδευτική παραμόρφωση του τραπεζοειδούς φύλλου αλουμινίου λόγω της καταπόνησης από το φορτίο που ασκείται στο μέσον του και να αναδείξουν τα λυγισμικά φαινόμενα στην τελική μορφή αστοχίας.

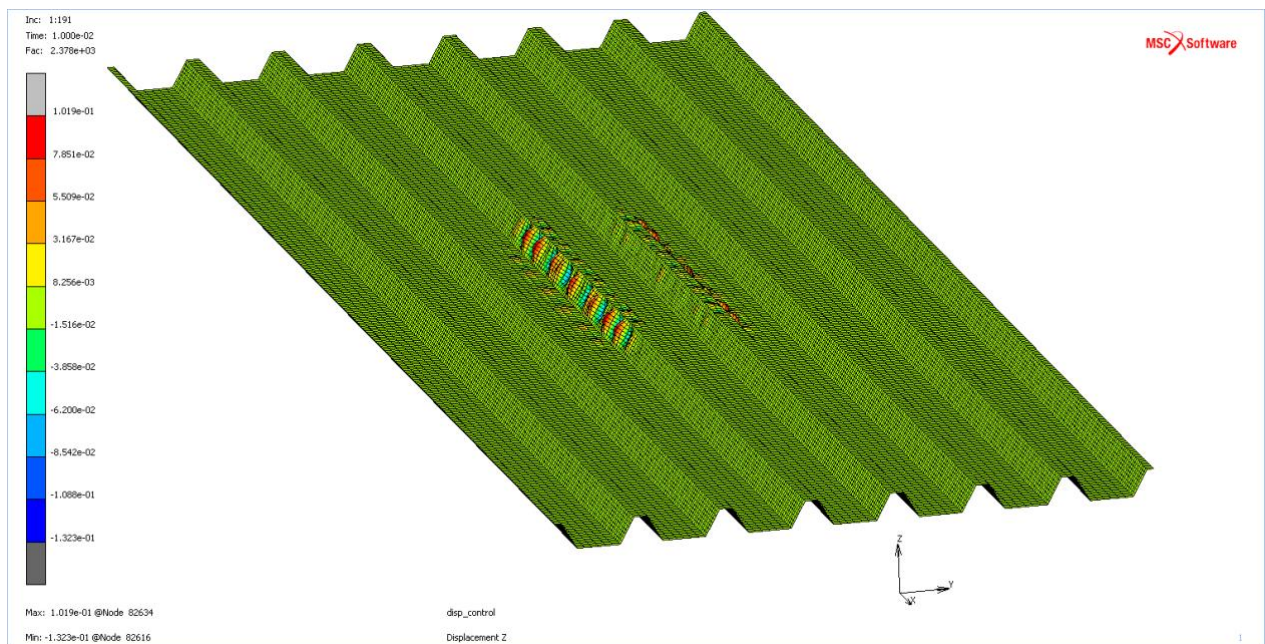
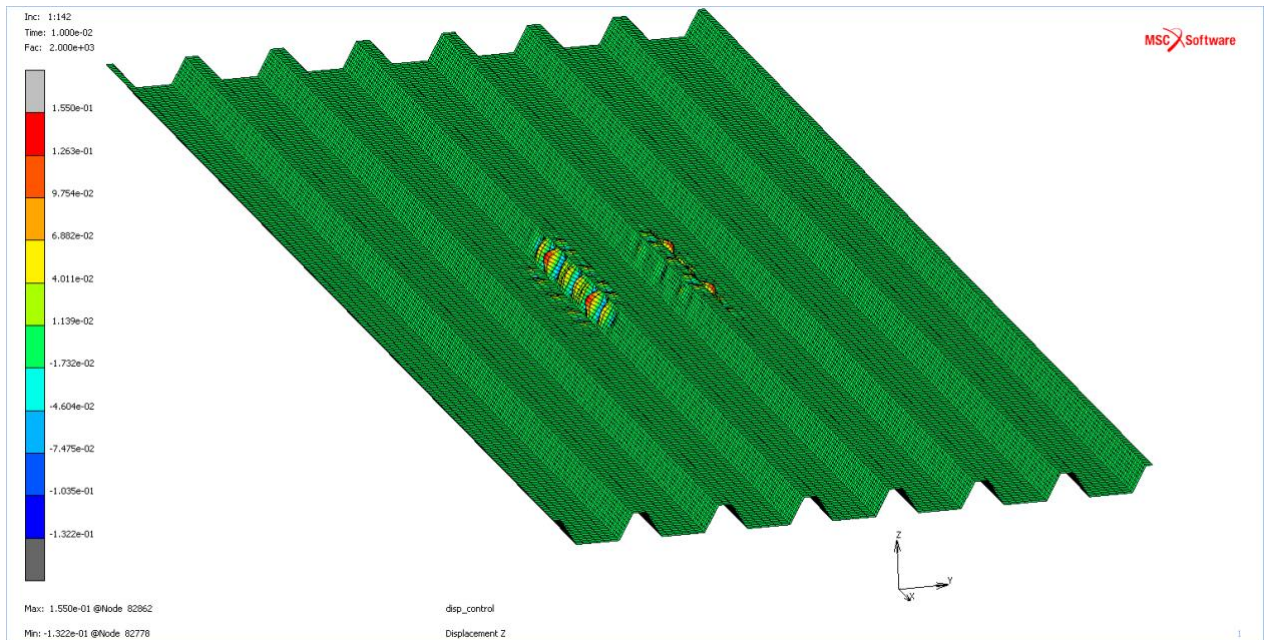
Για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω, πραγματοποιείται γεωμετρικά μη γραμμική ανάλυση του τέλει φορέα με παραδοχή μεγάλων παραμορφώσεων. Για την συμπεριφορά του αλουμινίου υιοθετείται ο ελαστοπλαστικός νόμος χωρίς κράτυνση δηλαδή ένας ελαστικός-τέλειος νόμος με τάση διαρροής 190 MPa. Η διαρροή σε κάποιο σημείο του φορέα επέρχεται, όταν ικανοποιείται το κριτήριο διαρροής του von Mises. Σε αυτή την ανάλυση μορφώνεται η διακριτοποιημένη μορφή της εξίσωσης ισορροπίας σε μία τυχαία παραμορφωμένη θέση, ενώ παράλληλα λαμβάνονται υπόψη οι μη γραμμικές κινηματικές συνθήκες. Το μη γραμμικό πρόβλημα δύναται να γραμμικοποιηθεί με στόχο την επίλυση του χρησιμοποιώντας μια επαυξητική μορφή επίλυσης και ταυτοχρόνως προσεγγίζεται το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας του φορέα με ένα ολικό διαφορικό. Για την βελτίωση αυτού του αλγορίθμου, εφαρμόζεται ένα επαναληπτικό σχήμα επίλυσης εξισώσεων, τύπου Newton-Raphson.

Για την διεξαγωγή της ανάλυσης στην οποία οι στηρίξεις του φορέα προσομοιώνονται μέσω συνοριακών συνθηκών υιοθετήθηκε ένα επαυξητικό σχήμα φόρτισης μέσα σε ένα χρονικό όριο, δηλαδή η συνολική μετατόπιση των 180 mm, που επιβάλλεται στον κεντρικό κόμβο του φορέα, ολοκληρώνεται σε 180 χρονικά βήματα (time-step method), 1 mm σε κάθε βήμα φόρτισης. Η επιβολή της φόρτισης γίνεται με γραμμικό τρόπο και το φορτίο που επιβάλλεται σε κάθε βήμα, μεταφράζεται από την αντίδραση του κόμβου επιβολής του φορτίου. Αξίζει να σημειωθεί πως στη μη γραμμική ανάλυση η έννοια του χρόνου έχει μόνο αλγοριθμική σημασία και δεν συσχετίζεται με φαινόμενα αδράνειας ταχυτήτων και επιταχύνσεων που πρόκειται να συμβούν κατά την μετατόπιση, για το λόγο αυτό ονομάζεται ψευδοχρόνος. Στην περίπτωση αναλύσεων όπου οι στηρίξεις προσομοιώνονται με στερεά σώματα, μεταξύ του φύλλου και των στηρίξεων υπάρχουν συνθήκες επαφής, οι οποίες δυσκολεύουν τον επαναληπτικό αλγόριθμο επίλυσης να συγκλίνει. Για αυτό το λόγο στη σειρά αναλύσεων που υπάρχουν συνθήκες επαφής, γίνεται χρήση ενός εξελιγμένου

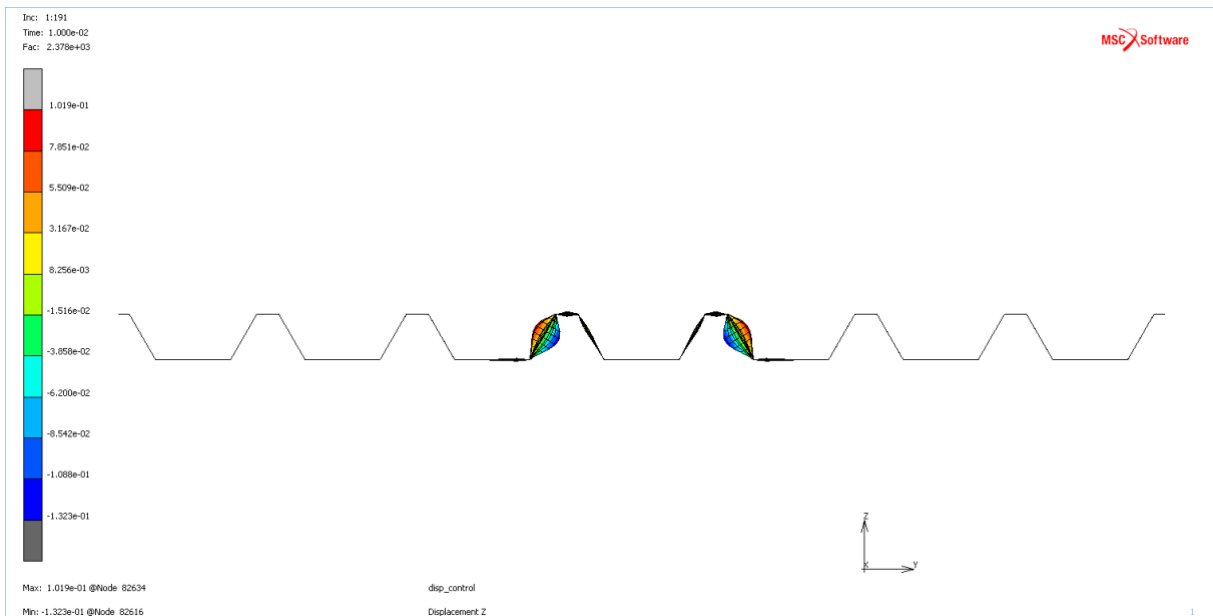
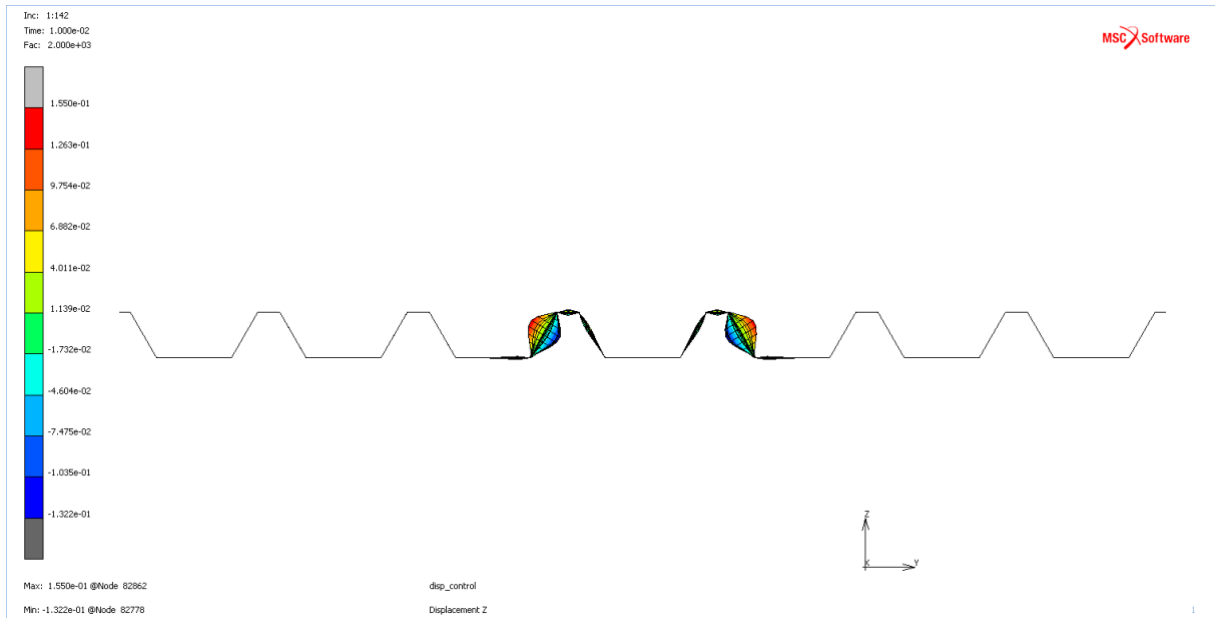
επαναληπτικού αλγορίθμου επίλυσης της μεθόδου μήκους τόξου (Arc-Length method), η οποία δύναται να διαχειριστεί αρτιότερα τα κρίσιμα σημεία.

Ένα σύνηθες φαινόμενο που συναντάται σε λεπτότοιχες μεταλλικές κατασκευές όπως τα κελύφη, είναι η παρουσία αρχικών γεωμετρικών ατελειών. Έτσι πραγματοποιήθηκε μια σειρά μη γραμμικών αναλύσεων, στις οποίες επιλύθηκε το υπό μελέτη τραπεζοειδές φύλλο αλουμινίου ενσωματώνοντας αρχικές γεωμετρικές ατέλειες. Ως αρχικές ατέλειες θεσπίστηκαν μερικές ιδιομορφές του ιδιοπροβλήματος που επιλύθηκε. Σκοπός αυτών των αναλύσεων, ήταν να εξεταστεί ο βαθμός επιρροής αρχικών ατελειών στην τελική μορφή αστοχίας (buckling failure). Το εύρος των αρχικών ατελειών ήταν 0.1-1 mm. Το γραμμικό πρόβλημα ιδιοτιμών λυγισμού (Linear Eigenvalue Problem) ή αλλιώς ανάλυση λυγισμού (Linear Buckling Analysis LBA) βασίζεται στις παραδοχές της γραμμικής θεωρίας ευστάθειας και εντοπίζει τις τιμές φορτίου για τις οποίες παρουσιάζεται αστάθεια. Η γραμμική ανάλυση λυγισμού έχει την δυνατότητα να εντοπίζει τις τιμές για τις οποίες ο φορέας δεν είναι ευσταθής δηλαδή τις ιδιοτιμές (eigenvalues) αλλά και τις ιδιομορφές (eigenmodes), δηλαδή τις μορφές παραμόρφωσης που αντιστοιχούν σε κάθε ιδιοτιμή. Η ανάλυση λυγισμού δεν έχει την δυνατότητα να προσδιορίζει μόνο την μορφή και όχι το μέγεθος των παραμορφώσεων.

Το παραπάνω πρόβλημα κατά την επίλυση του παράγει άπειρες λύσεις. Πιο συγκεκριμένα σε ένα συνεχές σύστημα υπάρχουν άπειρες τιμές ή τόσες όσοι και οι βαθμοί ελευθερίας σε ένα διακριτοποιημένο σύστημα. Επιπροσθέτως αναπαράγεται απειρία λύσεων, από την αδυναμία προσδιορισμού του μεγέθους των παραμορφώσεων. Στην περίπτωση πλακών και κελυφών το πρόβλημα περιπλέκεται ακόμη περισσότερο καθώς για την κάθε ιδιοτιμή υπάρχουν άπειρες ιδιοσυναρτήσεις. Στην παρούσα διπλωματική η επίλυση του προβλήματος ιδιοτιμών έγινε μέσω της αριθμητικής μεθόδου Lanczos. Οι ιδιομορφές που εξήχθησαν προορίζονται να χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια ως αρχικά γεωμετρικά ατελή σχήματα, ώστε να πραγματοποιηθεί η ανάλυση του γεωμετρικά ατελούς φορέα. Στη συνέχεια παρατίθενται σχήματα ιδιομορφών (σχήματα 5.16, 17).



Σχήμα 5.16: Πλάγιες όψεις θετικών ιδιομορφών (σε κλίμακα 50:1).



Σχήμα 5.17: Τομές των αντίστοιχων ιδιομορφών (σε κλίμακα 50:1).

6 Αποτελέσματα

Στο παρών κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο τεχνολογίας και κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος, τα αποτελέσματα των αναλύσεων που περιεγράφηκαν στο Κεφάλαιο 5 αλλά και η σύγκριση αυτών.

6.1 Πειραματικά Αποτελέσματα

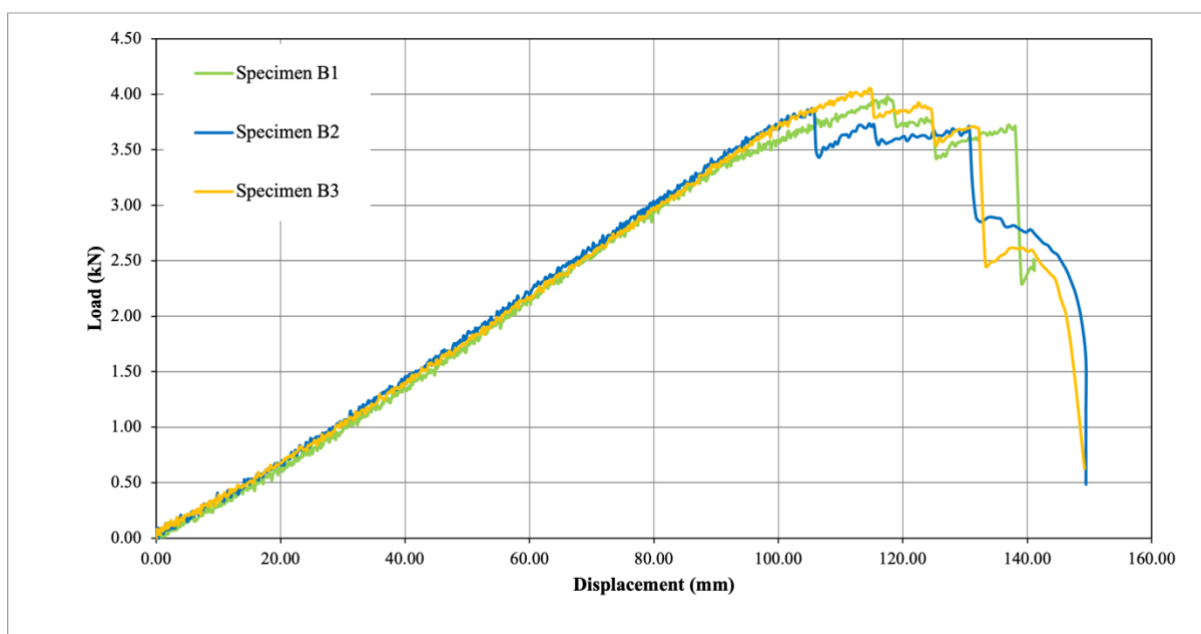
Μετά την διεξαγωγή των πειραμάτων, τα δεδομένα που λαμβάνουμε είναι η πορεία της επιβολής του φορτίου που καταγράφηκε και η βύθιση του εμβόλου σε κάθε βήμα. Με αυτά τα δεδομένα έχουμε την καμπύλη φορτίου-βύθισης για το κάθε δοκίμιο και το μέγιστο φορτίο που μπόρεσε να παραλάβει το καθένα από αυτά. Συγκεκριμένα, η μέγιστη συγκεντρωμένη δύναμη που καταγράφηκε πριν την κατάρρευση κυμάνθηκε μεταξύ 3.873 kN και 4.054 kN. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1:Συγκέντρωση αποτελεσμάτων.

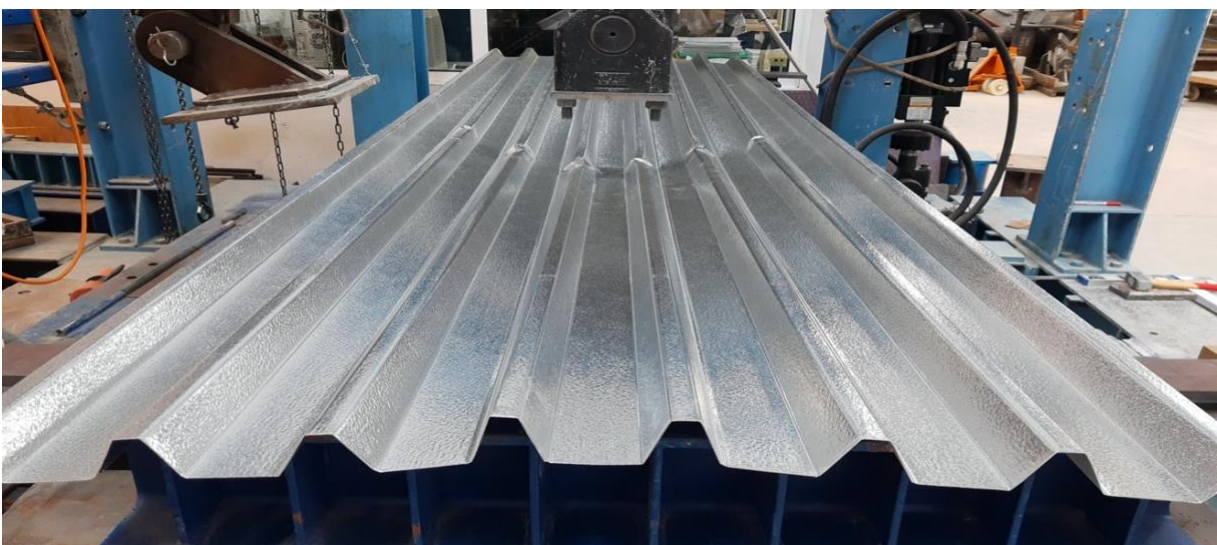
Περιγραφή Ιδιότητας	Δοκίμιο 1	Δοκίμιο 2	Δοκίμιο 3
Κωδικός τύπου προϊόντος και προοριζόμενη Χρήση	ELT39/896 AlMn1Mg0.5 (3005) Στέγαση, εξωτερική επικάλυψη, εσωτερική επένδυση	ELT39/896 AlMn1Mg0.5 (3005) Στέγαση, εξωτερική επικάλυψη, εσωτερική επένδυση	ELT39/896 AlMn1Mg0.5 (3005) Στέγαση, εξωτερική επικάλυψη, εσωτερική επένδυση
Ονομαστικό πάχος λαμαρίνας	1.0 mm	1.0 mm	1.0 mm
Μήκος καθαρού ανοίγματος	2500 mm	2500 mm	2500 mm

Μέγιστη ικανότητα σε συγκεντρωμένη δύναμη πριν την κατάρρευση	3.969 kN	3.873 kN	4.054 kN
Μέσος ρυθμός επιβολής δύναμης από την αρχή της δοκιμής έως την μέγιστη δύναμη	0.1 kN/s	0.1 kN/s	0.1 kN/s
Μέσο μετρημένο πάχος της λαμαρίνας (μέσος όρος από τρεις θέσεις κατά το πλάτος)	1.12 mm	1.09 mm	1.22 mm
Πρότυπο/Τεχνική Προδιαγραφή	EN14782:2006 Annex B	EN14782:2006 Annex B	EN14782:2006 Annex B

Σε όλα τα δοκίμια οι πρώτες τοπικές αστοχίες εμφανίστηκαν τη στιγμή του μέγιστου φορτίου στις πτυχώσεις εκατέρωθεν της περιοχής επιβολής φόρτισης (τοπικός λυγισμός). Αυτές οι αστοχίες σηματοδότησαν την έναρξη της κατάρρευσης, η οποία ολοκληρώθηκε με επέκταση των τοπικών αστοχιών και στις γειτονικές πτυχώσεις (σχήμα 6.2). Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα φορτίου βύθισης των τριών δοκιμών (σχήμα 6.1) και αντιπροσωπευτικών εικόνων του φορέα ενώ έχει καταρρεύσει.



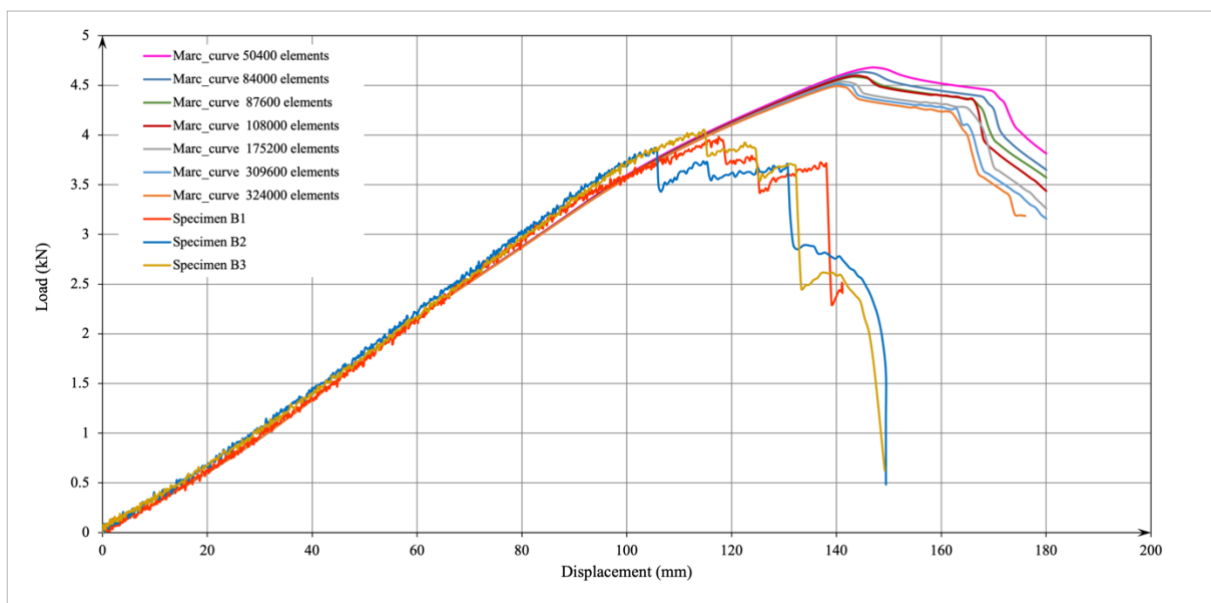
Σχήμα 6.1: Διάγραμμα φορτίου-βύθισης πειραματικών δοκιμών.



Σχήμα 6.2: Αντιπροσωπευτικές εικόνες αστοχίας των δοκιμών μετά το πέρας των δοκιμών (στιγμιότυπα από το εργαστήριο τεχνολογίας και κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος).

6.2 Αποτελέσματα Επίλυσης μέσω Πεπερασμένων Στοιχείων

Οι πρώτες μη γραμμικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν ήταν αυτές με την πύκνωση του δικτύου πεπερασμένων στοιχείων, ώστε να επιλεγεί το κατάλληλο για τις τελικές αναλύσεις. Σημειώνεται πως για αναλύσεις που είχαν χαρακτήρα σύγκρισης για λόγους υπολογιστικού κόστους, οι συγκρίσεις γινόταν σε μοντέλα μικρότερου πλήθους στοιχείων, αλλά κοινό μεταξύ τους, ώστε να παρατηρηθεί η διαφορά της εκάστοτε ανάλυσης. Στη συνέχεια παρατίθεται το διάγραμμα φορτίου βύθισης των αναλύσεων πύκνωσης δικτύου.

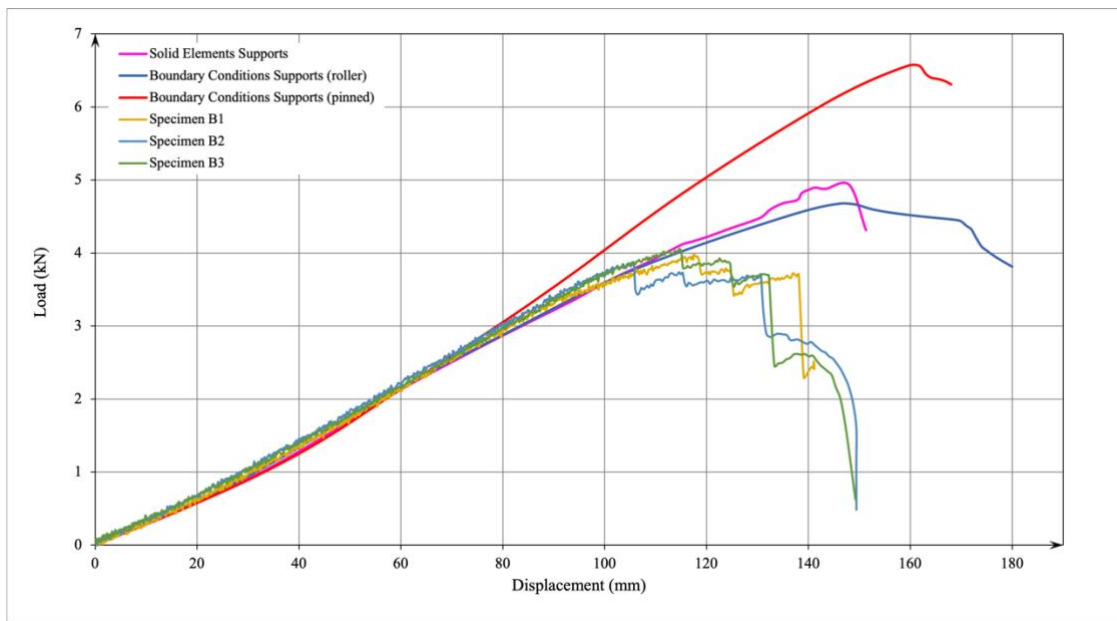


Σχήμα 6.3: Καμπύλες φορτίου παραμόρφωσης σύμφωνα με το πλήθος των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν (αποτελέσματα από Marc Mentat).

Όπως φαίνεται από το σχήμα 6.3 και με μεγαλύτερη ακρίβεια από το σχήμα 5.9 παρουσιάζονται σημαντικές αλλαγές στις αρχικές πυκνώσεις του δικτύου πεπερασμένων στοιχείων που φτάνουν περίπου το 12% μέχρι τα 100 χιλιάδες στοιχεία. Στη συνέχεια όμως οι αλλαγές είναι ιδιαίτερα μικρές με το υπολογιστικό κόστος να είναι ιδιαίτερα αυξημένο. Για τον λόγο αυτό το τελικό μοντέλο που υιοθετήθηκε αποτελείται από 108 χιλιάδες πεπερασμένα στοιχεία.

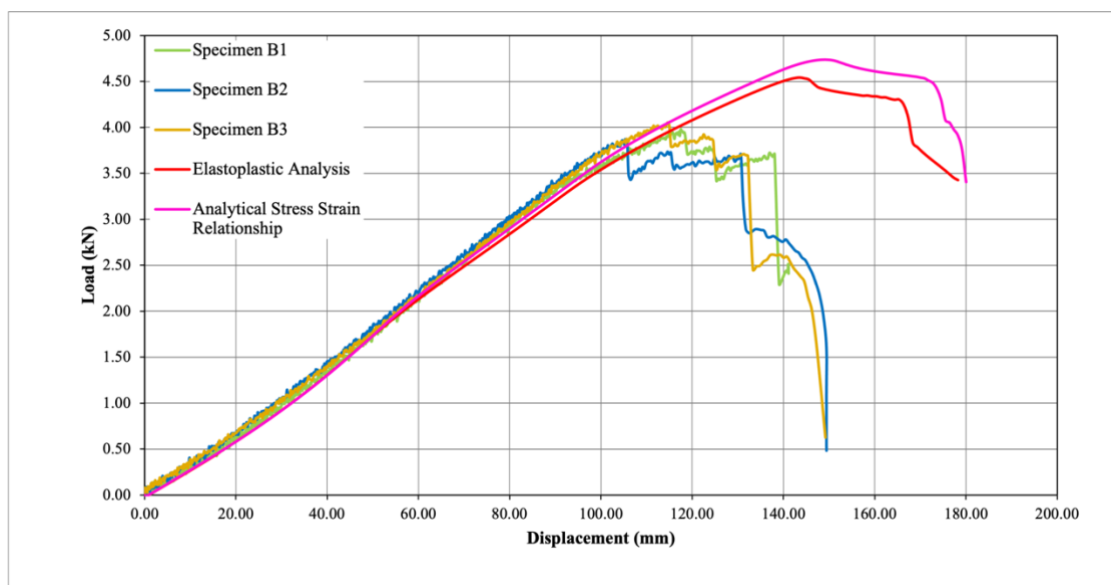
Παρακάτω θα δούμε την διαφορά αποτελεσμάτων όταν το φύλλο αλουμινίου εδράζεται πάνω σε στερεά σώματα σε σχέση με την στήριξη μέσω συνοριακών συνθηκών κύλισης στους κόμβους των στηρίξεων. Επιπλέον θα πραγματοποιηθεί μία ανάλυση στην

οποία οι στηρίξεις θα παίζουν τον ρόλο της άρθρωσης, ώστε να δούμε πρακτικά την επιρροή των συνοριακών συνθηκών.



Σχήμα 6.4: Καμπύλες φορτίου-βύθισης σύμφωνα με τον τρόπο στήριξης του τραπεζοειδούς φύλλου αλουμινίου (αποτελέσματα από Marc Mentat)..

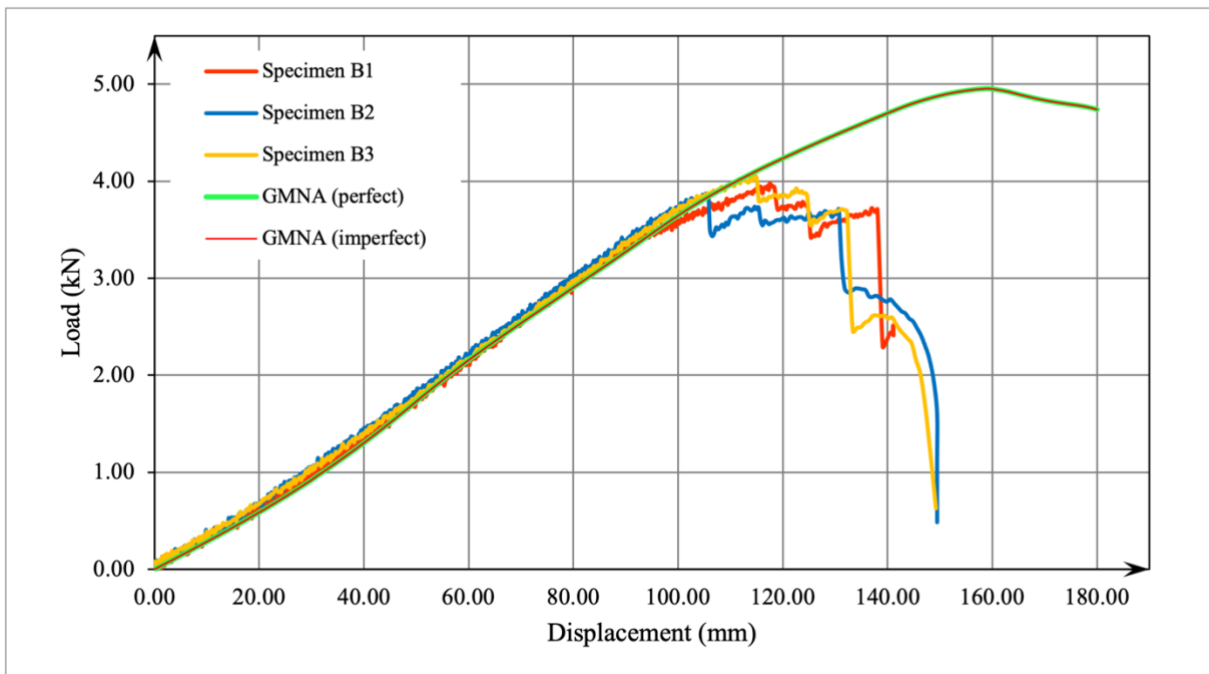
Από το σχήμα 6.4 είναι εμφανές, ότι η αρτιότερη προσέγγιση των πειραματικών δεδομένων γίνεται με την χρήση συνοριακών συνθηκών κύλισης. Παρατηρούμε πως επιρροή των συνοριακών συνθηκών είναι ιδιαίτερα μεγάλη καθώς το μέγιστο φορτίο αυξάνεται κατά 40% σε σχέση με την περίπτωση κυλίσεων.



Σχήμα 6.5: Καμπύλες φορτίου βύθισης σύμφωνα με τον νόμο υλικού που χρησιμοποιήθηκε (αποτελέσματα από Marc Mentat).

Η επιλογή του νόμου του υλικού που χρησιμοποιήθηκε, ήταν η απόρροια της σύγκρισης αναλύσεων του σχήματος 6.5. Χρησιμοποιήθηκε ο ελαστοπλαστικός νόμος και συγκρίθηκε με τον πλήρη νόμο του υλικού όπως υπολογίσθηκε στο Κεφάλαιο 2. Όπως είναι φανερό με την εφαρμογή του πλήρους νόμου του υλικού οι αποκλίσεις αυξάνονται.

Μετά την ανάλυση λυγισμού, πραγματοποιήθηκε η ανάλυση του ατελούς φορέα, η οποία προέκυψε μέσω της εισαγωγής της κατάλληλης ιδιομορφής στον γεωμετρικά τέλειο φορέα (βλ. σχήματα 5.15, 5.16). Στο σχήμα 6.6 γίνεται παράθεση των αποτελεσμάτων ανάλυσης του ατελούς φύλλου αλουμινίου συγκριτικά με το γεωμετρικά τέλειο τραπεζοειδές φύλλο αλουμινίου.

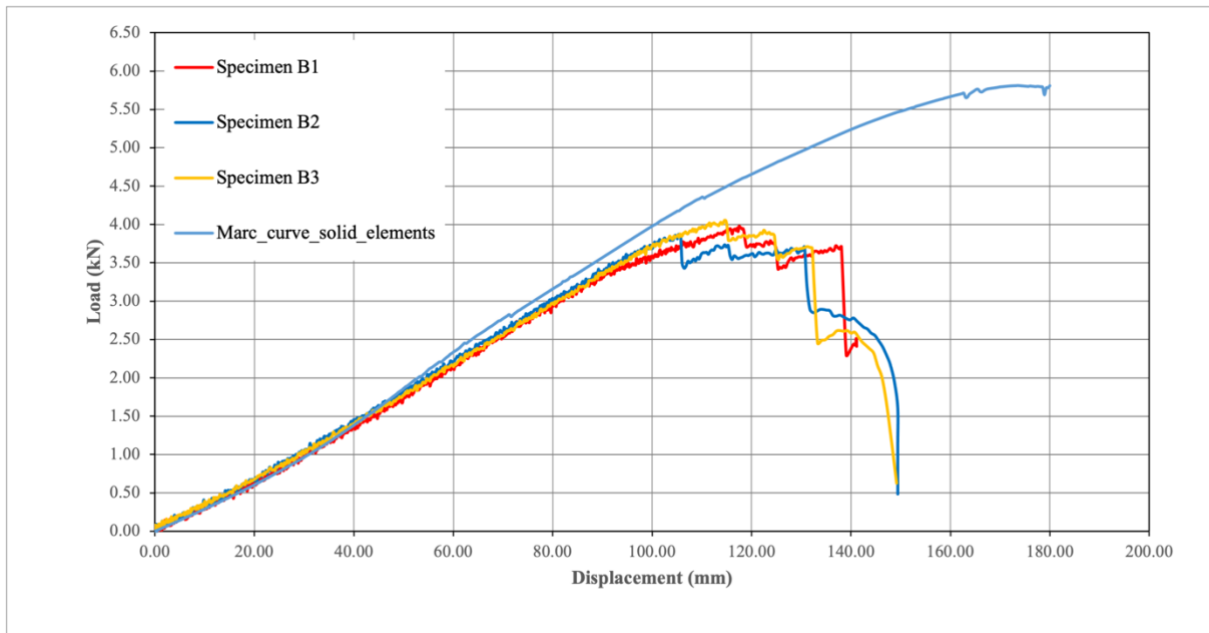


Σχήμα 6.6: Διάγραμμα φορτίου-βύθισης γεωμετρικά τέλειου και ατελούς φορέα (αποτελέσματα από Marc Mentat).

Από το σχήμα 6.6 είναι φανερό, ότι η εισαγωγή ατέλειας δεν επηρεάζει καθόλου τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Αυτό συμβαίνει διότι η αστοχία λόγω φαινομένων ευστάθειας για την συγκεκριμένη φόρτιση λαμβάνει χώρα νωρίτερα εξαιτίας της γεωμετρίας του φύλλου. Συνεπώς η ύπαρξη αρχικών ατελειών αυτής της τάξης μεγέθους, δεν επηρεάζει καθόλου την συνολική αντοχή του φορέα.

Στο μοντέλο προσομοίωσης μέσω χωρικών στοιχείων τα αποτελέσματα ξέφευγαν αρκετά από την πραγματικότητα, αφού τα χωρικά πεπερασμένα στοιχεία δεν έχουν την ικανότητα να αναπαριστούν τις παραμορφώσεις εκτός επιπέδου, στον βαθμό που μπορούν

τα επιφανειακά. Στην ανάλυση αυτή δεν αναπτύχθηκαν τα φαινόμενα λυγισμού στο φύλλο αλουμινίου παρά μόνο καθαρή κάμψη. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν αναμενόμενο, αφού τα χωρικά πεπερασμένα στοιχεία δεν είναι κατάλληλα για την προσομοίωση κελυφωτών και επιφανειακών φορέων. Στο σχήμα 6.7 βλέπουμε την καμπύλη φορτίου βύθισης της παραπάνω ανάλυσης συγκριτικά με τα πειραματικά αποτελέσματα.

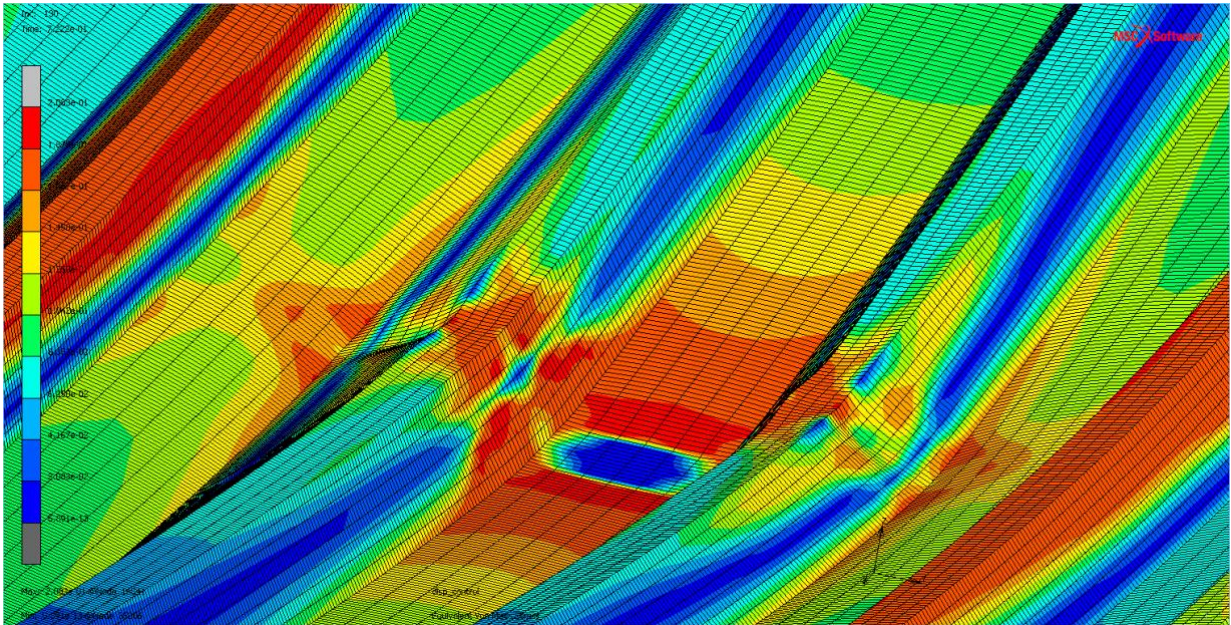


Σχήμα 6.7: Καμπύλη φορτίου βύθισης μοντέλου χωρικών πεπερασμένων στοιχείων (αποτελέσματα από Marc Mentat).

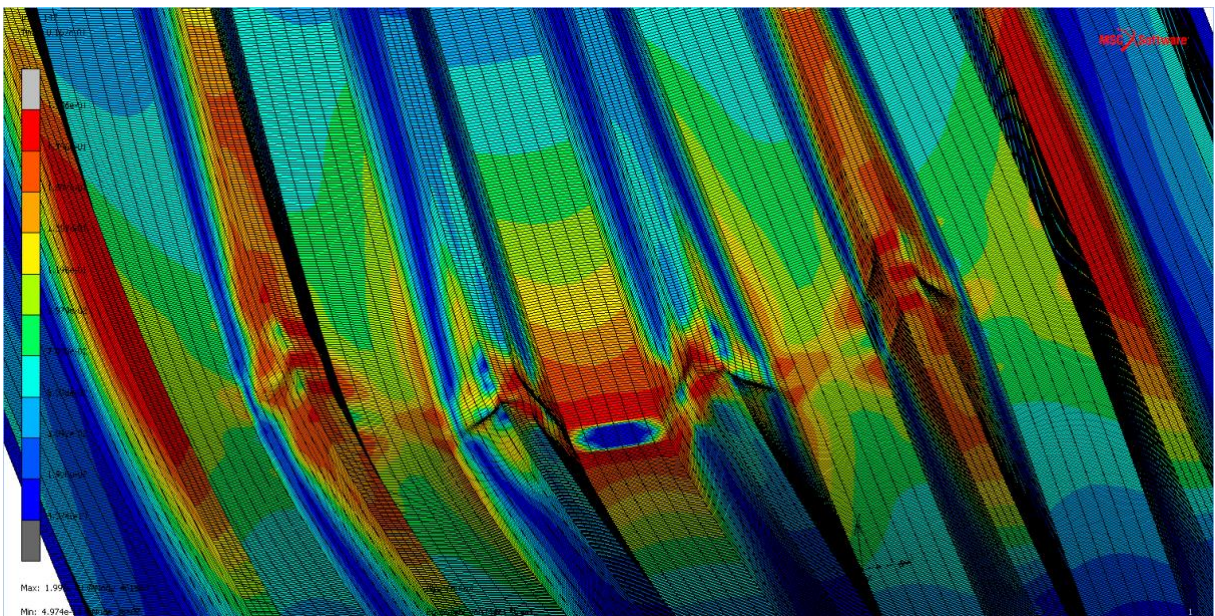
6.3 Αποτελέσματα Τελικού Μοντέλου Προσομοίωσης

Στην παρούσα ενότητα αυτού του κεφαλαίου θα παρουσιαστούν και θα σχολιαστούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης του αρτιότερου μοντέλου προσομοίωσης, του οποίου τα χαρακτηριστικά έχουν αναλυθεί στις προηγούμενες ενότητες. Αρχικά θα δούμε τα φαινόμενα που έλαβαν χώρα κατά την πραγματοποίηση της ανάλυσης. Στα επόμενα σχήματα (6.8-14) βλέπουμε τις βλάβες, τις μορφές αστοχίας και τις πλαστικές παραμορφώσεις. Πιο αναλυτικά στο σχήμα 6.8 παρατηρούμε τα πρώτα σημάδια τοπικού λυγισμού, που εμφανίζονται στους κορμούς και τα άνω πέλματα των μεσαίων πτυχώσεων. Έπειτα στο σχήμα 6.9 βλέπουμε την πορεία του φαινομένου, το οποίο συνεχίζει να εξελίσσεται αλλά και να επεκτείνεται στις επόμενες πτυχώσεις. Στους κεντρικούς κορμούς έχει επέλθει πλήρη κατάρρευση και το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου συνεχίζει να παραλαμβάνεται από τα υπόλοιπα τμήματα του

τραπεζοειδούς φύλλου αλουμινίου. Πιο συγκεκριμένα μετά την απότομη εμφάνιση του φαινομένου αστάθειας γίνεται ανακατανομή των τάσεων του φορέα. Τελικά επέρχεται η πλήρης κατάρρευση του, όπου έχουν αστοχήσει και οι ακριανοί κορμοί με τα πέλματα που τους συνδέουν (σχήμα 6.10), έχοντας ως αποτέλεσμα την ανικανότητα του φορέα να



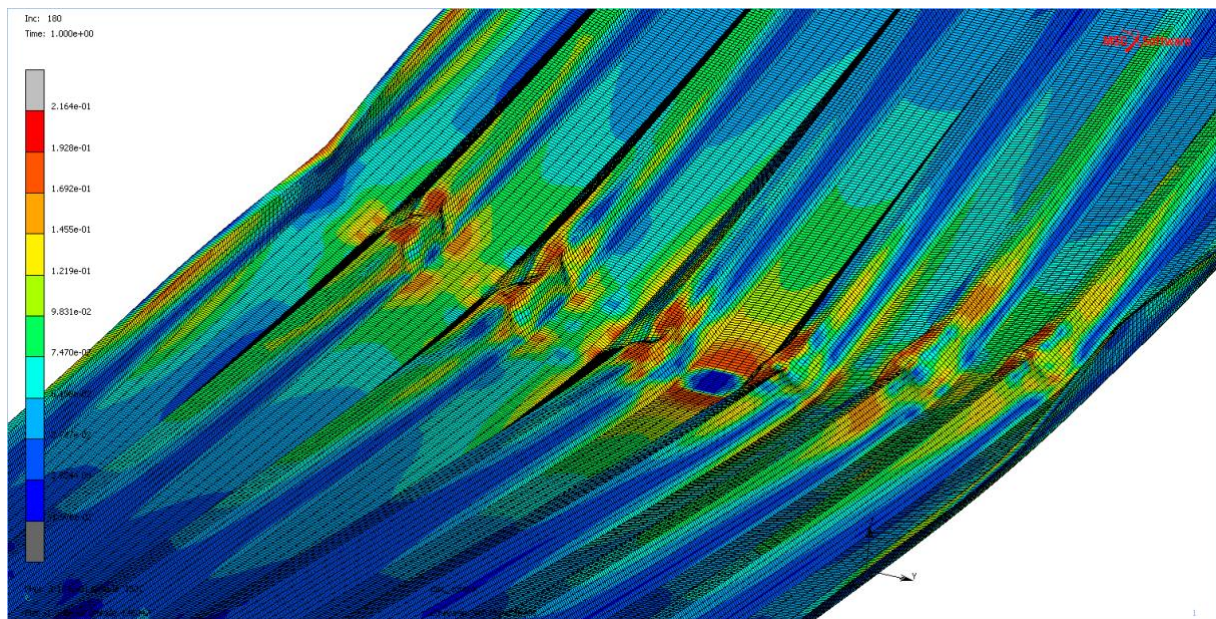
Σχήμα 6.8: σοδύναμες τάσεις Von Misses στο βήμα 130 για βύθιση 130 mm (αποτελέσματα από Marc Mentat).



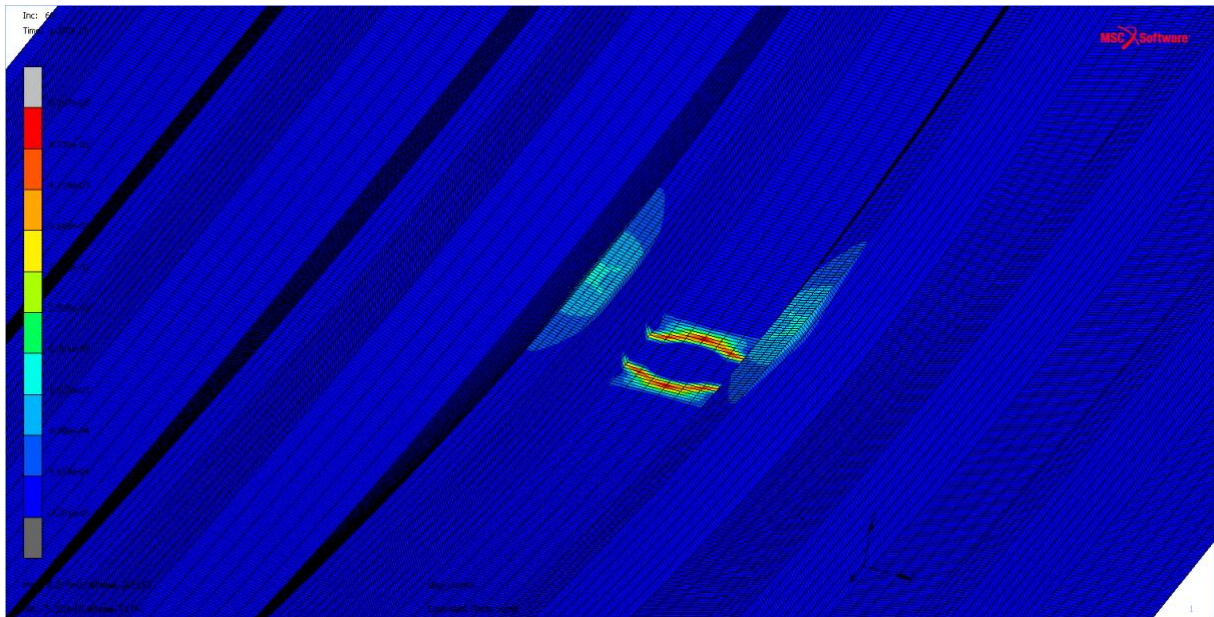
Σχήμα 6.9: Ισοδύναμες τάσεις Von Misses στο βήμα 147 για βύθιση 147 mm παρατηρούμε τον λυγισμό που αναπτύσσεται στις επόμενες πτυχώσεις (αποτελέσματα από Marc Mentat).

παραλάβει επιπλέον φορτίο καθώς οι παραμορφώσεις και οι βλάβες που υπέστη, έχουν αλλάξει όλη την μορφή του (σχήματα 6.10,13). Γενικότερα οι αστοχίες παρατηρήθηκε να πραγματοποιούνται συμμετρικά και ανά δύο πτυχώσεις, ξεκινώντας από τις κεντρικές και στην πορεία στις ακριανές. Αυτή ήταν και η πορεία που αναμέναμε καθώς η φόρτιση γινόταν στο κέντρο του φορέα και η ίδια σειρά είχε παρατηρηθεί κατά την πραγματοποίηση των πειραματικών δοκιμών.

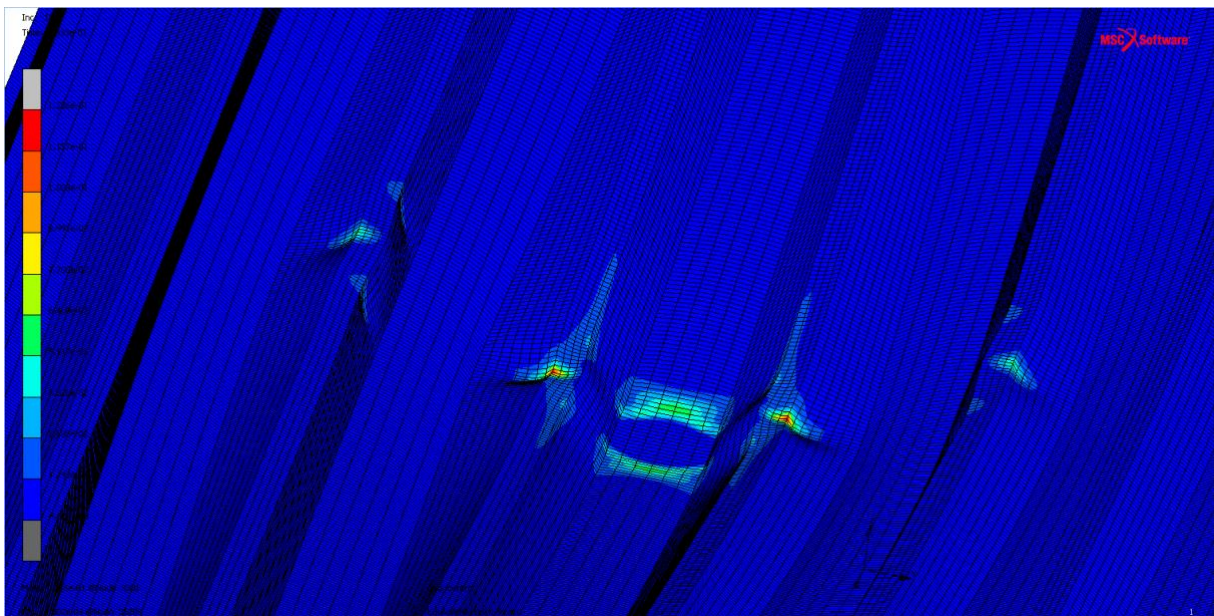
Όπως φαίνεται στα σχήματα 6.8-10 οι πτυχώσεις έχουν παραμορφωθεί χωρίς να έχει διαρρεύσει το υλικό από το οποίο αποτελούνται, δηλαδή οι τάσεις των πεπερασμένων στοιχείων είναι μικρότερες από 190 MPa. Αυτό συμβαίνει διότι η αστοχία έχει επέλθει από φαινόμενα ευστάθειας και όχι λόγω του υπερκερασμού της αντοχής του υλικού.



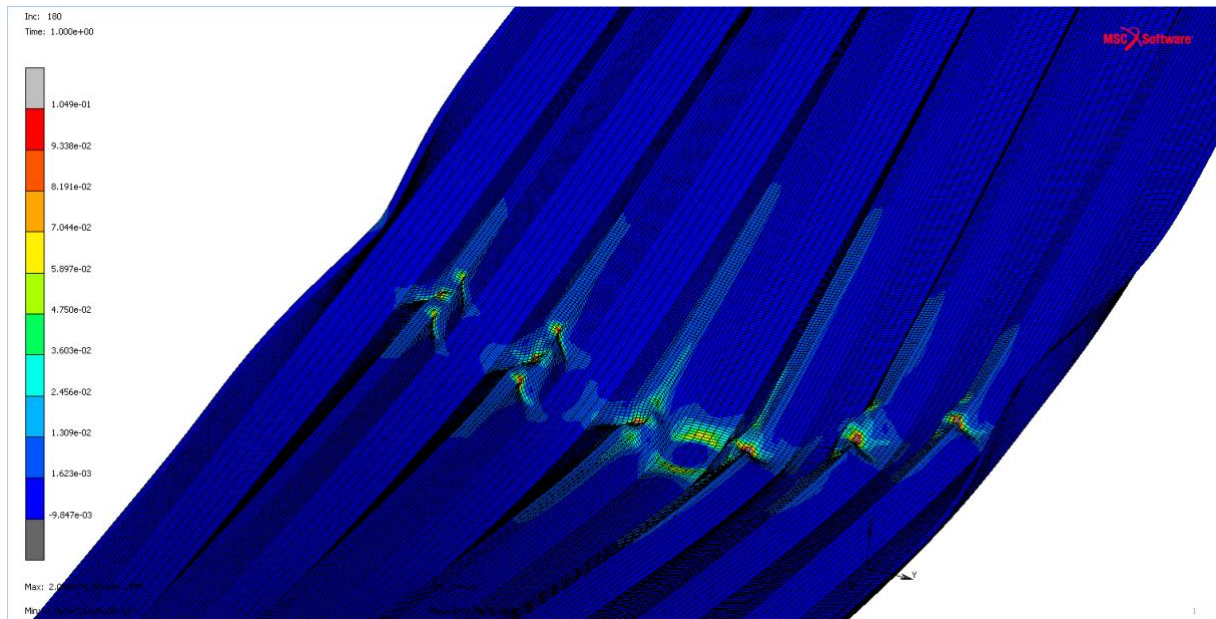
Σχήμα 6.10: Ισοδύναμες τάσεις Von Misses στο βήμα 180 για βύθιση 180 mm είναι εμφανές οι βλάβες του φορέα λόγω τοπικού λυγισμού σε όλες τις πτυχώσεις (αποτελέσματα από Marc Mentat).



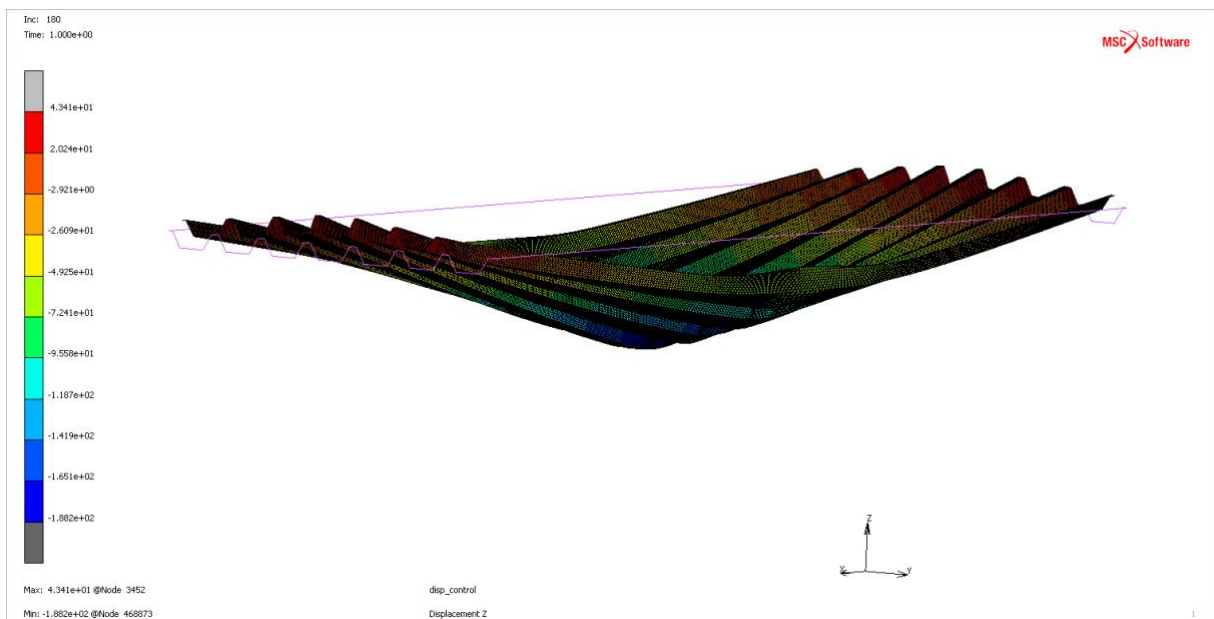
Σχήμα 6.11: Πρώτες πλαστικές παραμορφώσεις που εμφανίστηκαν στις κεντρικές πτυχώσεις στο βήμα 60 για συνολική βύθιση 60 mm (αποτελέσματα από Marc Mentat).



Σχήμα 6.12: Αρχικές ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις που εμφανίστηκαν στις δεύτερες συμμετρικές πτυχώσεις στο βήμα 150 για συνολική βύθιση 150 mm (αποτελέσματα από Marc Mentat).

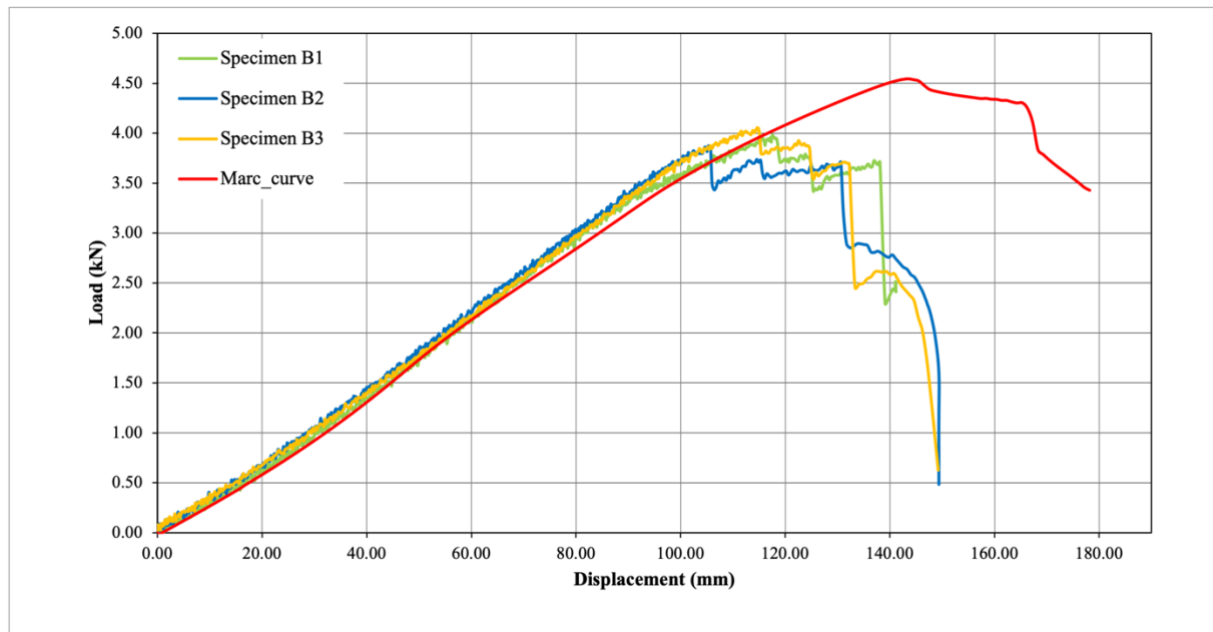


Σχήμα 6.13: Πλαστικές παραμορφώσεις στο στάδιο κατάρρευσης του φορέα βήμα 180 (αποτελέσματα από Marc Mentat).



Σχήμα 6.14: Πλάγια όψη τελικής παραμορφωμένης κατάστασης του φορέα (αποτελέσματα από Marc Mentat).

Στη συνέχεια θα δούμε και θα σχολιάσουμε το διάγραμμα φορτίου-βύθισης του φορέα (σχήμα 6.15).



Σχήμα 6.15: Καμπύλες φορτίου βύθισης πειραματικών δοκιμών και μοντέλου προσομοίωσης.

Από το διάγραμμα του σχήματος 6.15 φαίνεται ότι ο φορέας έχει γραμμική ελαστική συμπεριφορά μέχρι τα 2.5 kN. Από εκείνο το σημείο και μετά παρατηρείται μία ελαφριά μείωση της κλίσης της καμπύλης, η οποία οφείλεται στην μείωση της δυσκαμψίας του φορέα ως αποτέλεσμα της έναρξης πλαστικοποιήσεων στα άνω πέλματα των κεντρικών πτυχώσεων, αποτέλεσμα το οποίο επαληθεύεται από τα αποτελέσματα που εμφανίζονται στο σχήμα 6.11. Στη συνέχεια η πλαστικοποίηση προχωράει περαιτέρω με την αύξηση του φορτίου. Για φορτίο περίπου 4.5 kN ο φορέας εξαντλεί το μέγιστο φορτίο που δύναται να παραλάβει, λόγω φαινομένων αστάθειας (η εφαπτομενική δυσκαμψία γίνεται μηδέν). Αυτό συνέβη καθώς έχουν λυγίσει και οι επόμενες δύο πτυχώσεις με αποτέλεσμα να χάνεται μεγάλο μέρος της δυσκαμψίας του φορέα. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα μετά την απότομη αλλαγή και για βύθιση 140 mm το φύλλο αλουμινίου ισορροπεί ξανά συνεχίζοντας να παραλαμβάνει φορτίο. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται και στην αστοχία των επόμενων πτυχώσεων, όπου ισορροπεί μέχρι τελικά να καταρρεύσει, παύοντας πλέον να έχει την δυνατότητα παραλαβής επιπλέον φορτίου.

Στην πραγματικότητα η μείωση του φορτίου που παρατηρείται, είναι φαινομενική, διότι η πραγματική τιμή του φορτίου συνεχίζει να αυξάνεται. Εξ' αιτίας των γεωμετρικών

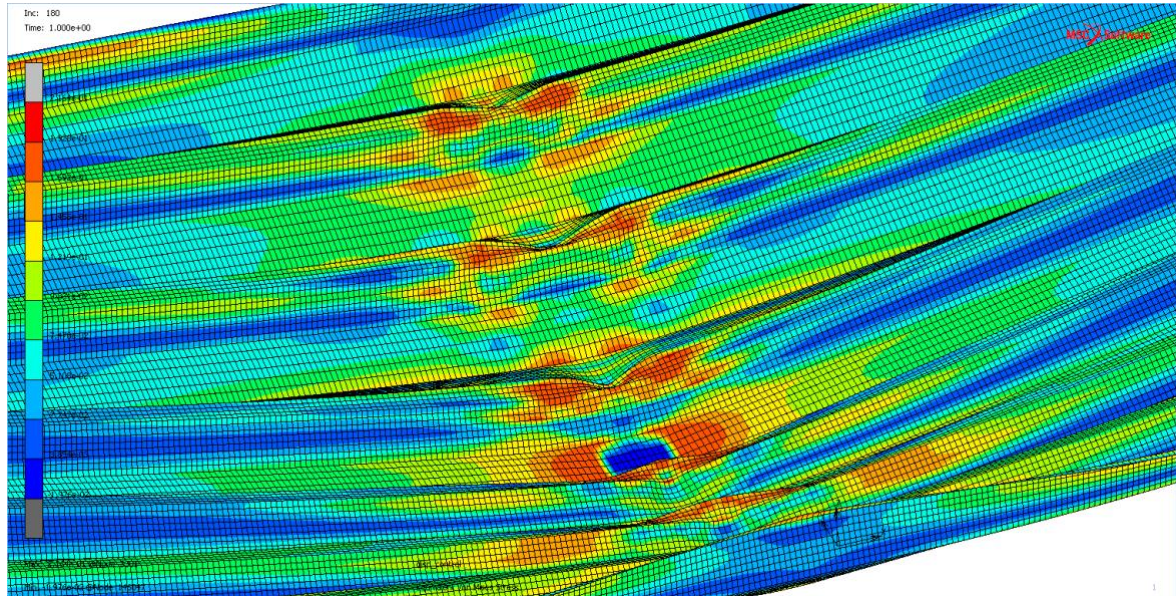
αλλαγών όμως η κάθετη αντίδραση που λαμβάνουμε κατά τον άξονα z είναι αυτή που αποτυπώνεται στο διάγραμμα του σχήματος 6.14. Επίσης αξίζει να σημειωθεί, ότι μετά από κάθε βλάβη που συμβαίνει, για κάθε εξαναγκασμένη μετακίνηση ίσου μέτρου (δηλαδή 1 mm σε κάθε βήμα) το επιπλέον φορτίο που παραλαμβάνει ο φορέας είναι μικρότερο από αυτό του προηγούμενου βήματος. Αυτό οφείλεται στην μείωση της δυσκαμψίας λόγω των βλαβών που έχουν προκληθεί.

6.4 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Στην παρούσα ενότητα θα συγκρίνουμε τα πειραματικά αποτελέσματα της κάμψης τριών σημείων της ενότητας 6.1 με αυτά των αναλύσεων μέσω του προηγμένου λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων MSC Marc Mentat της ενότητας 6.3.

Σύμφωνα με το διάγραμμα του σχήματος 6.14 μπορούμε να διακρίνουμε ότι μέχρι το φορτίο των 4 kN και για βύθιση 100 mm το μοντέλο της ανάλυσης παρουσιάζει μεγάλη σύγκλιση με τα πειραματικά δοκίμια. Αυτό σε όρους μηχανικής ερμηνεύεται ως κοινή δυσκαμψία μεταξύ των πειραμάτων και των αναλύσεων. Στα επόμενα βήματα των πειραματικών δοκιμών τα δοκίμια αρχίζουν να αστοχούν με εμφανές βλάβες στις πτυχώσεις τους, οι οποίες λαμβάνουν χώρα ανά δύο και πραγματοποιούνται συμμετρικά της φόρτισης. Αυτό συμβαίνει μέχρι την τελική κατάρρευση των δοκιμών (σχήμα 6.15). Το μοντέλο προσομοίωσης αστοχεί με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όμως για φορτίο περίπου 10% μεγαλύτερο από αυτό των πειραματικών δοκιμών.



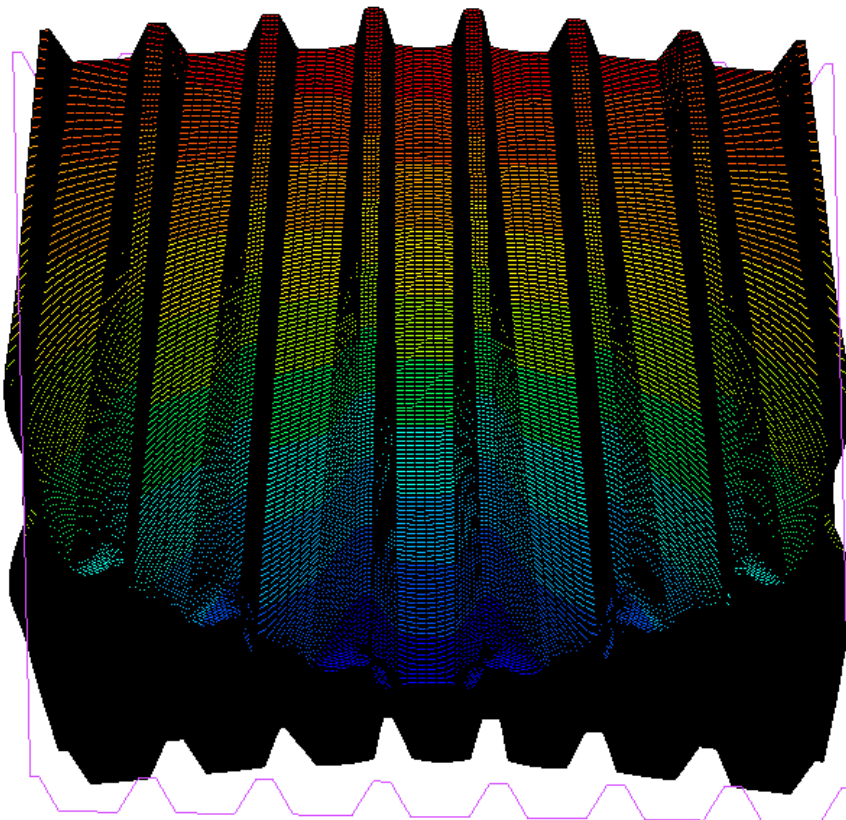
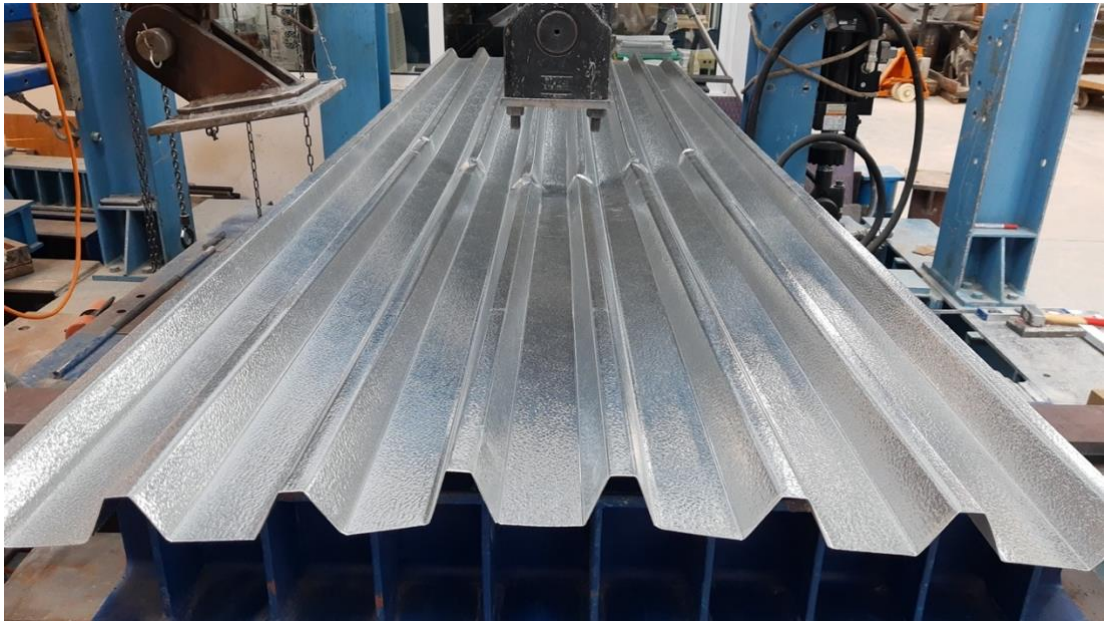


Σχήμα 6.16 Τελική εικόνα πειραματικού δοκιμίου και μοντέλου προσομοίωσης με εμφανή δείγματα τοπικού λυγισμού στα άνω πέλατα και τους κορμούς των πτυχώσεων συμμετρικά της φόρτισης (στιγμιότυπο από το εργαστήριο τεχνολογίας και κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος και αποτελέσματα από Marc Mentat).

Το ανασήκωμα των άκρων στα τελευταία βήματα της φόρτισης μέχρι και την κατάρρευση του φορέα, που συμβαίνουν κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων εμφανίζονται με τον ίδιο τρόπο και στο μοντέλο προσομοίωσης (σχήμα 6.16). Επιπλέον η καμπυλότητα των κεντρικών πτυχώσεων που εμφανίζεται στα ανασηκωμένα άκρα, κατά το πλάτος τους αναπτύσσεται εξίσου και στην προσομοίωση μέσω πεπερασμένων στοιχείων (σχήμα 6.16).

Όπως έχει διατυπωθεί προηγουμένως τα φαινόμενα που εμφανίστηκαν στην διεξαγωγή των πειραμάτων λαμβάνουν χώρα και στις προσομοιώσεις για τον προσδιορισμό της καμπτικής συμπεριφοράς του τραπεζοειδούς φύλλου αλουμινίου. Η μόνη διαφορά έγκειται στο οριακό φορτίο το οποίο σηματοδοτεί την έναρξη μεγάλων βλαβών στο φορέα, οι οποίες είναι αποτέλεσμα του τρόπου φόρτισης και δείχνουν την ανικανότητα του να παραλάβει επιπλέον φορτίο. Η συγκεκριμένη φόρτιση πυροδοτεί την εμφάνιση φαινομένων αστάθειας, τα οποία αδυνατούν να προσδιοριστούν από τους ελέγχους του EC 9 που έγιναν στην ενότητα 5.3. Η διαφορά αυτή μεταξύ της προσομοίωσης και του πειράματος αποδίδεται σε πιθανές διαφοροποιήσεις του κράματος αλουμινίου, που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των τραπεζοειδών φύλλων αλουμινίου. Ένα ακόμη αίτιο είναι οι πιθανές ατέλειες του υλικού (όχι γεωμετρικές) σε συγκεκριμένα σημεία του φορέα, τα οποία ήταν άγνωστα και δεν μπόρεσαν να εισαχθούν στις προσομοιώσεις. Τέλος οι ακριβείς συνθήκες στήριξης

των πειραματικών δοκιμών παραμένουν άγνωστες, ώστε να προσομοιωθούν με την μέγιστη ακρίβεια.



Σχήμα 6.17: Τελική όψη πειραματικού δοκιμίου και μοντέλου προσομοίωσης (σε σύγκριση με την απαραμόρφωτη κατάσταση) στα οποία είναι εμφανές το ανασήκωμα και η καμπυλότητα των άκρων (στιγμιότυπο από το εργαστήριο τεχνολογίας και κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος και αποτελέσματα από Marc Mentat)..

7 Σύνοψη - Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η καμπτική συμπεριφορά τραπεζοειδών φύλλων αλουμινίου, υπό συγκεντρωμένη φόρτιση. Η επίλυση των μοντέλων πραγματοποιήθηκε μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και έγινε σύγκριση με τα αποτελέσματα πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο τεχνολογίας και κατασκευών σπλισμένου σκυροδέματος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Τα φύλλα αυτά χρησιμοποιούνται ως κέλυφος σε μεταλλικές κατασκευές και υπόστεγα, όπου οι περιβαλλοντικές συνθήκες έχουν έντονο διαβρωτικό χαρακτήρα.

Αρχικά, δημιουργήθηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης με τα χαρακτηριστικά και τις διαστάσεις των πειραματικών δοκιμών. Για την προσομοίωση αυτή χρησιμοποιήθηκε το προηγμένο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων MSC Software Marc Mentat. Το φύλλο αλουμινίου προσομοιώθηκε με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία (shell elements). Στις αναλύσεις που προσομοιώθηκαν οι πραγματικές συνθήκες στήριξης χρησιμοποιήθηκαν χωρικά πεπερασμένα στοιχεία (solid elements). Στις αναλύσεις αυτές, έγινε χρήση συνθηκών επαφής μεταξύ των στηρίξεων και του φύλλου αλουμινίου. Έτσι πραγματοποιήθηκε μια σειρά μη-γραμμικών αναλύσεων, από τις οποίες προέκυψαν τα αριθμητικά αποτελέσματα της ενότητας 6.3 και συγκρίθηκαν με τα αυτά της ενότητας 6.1, που αποτελούν τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών. Στις αναλύσεις αυτές όπως και στα πειράματα, παρατηρήθηκε ότι η αστοχία επέρχεται λόγω φαινομένων ευστάθειας, πιο συγκεκριμένα λόγω τοπικού λυγισμού στα άνω πέλματα και τους κορμούς των πτυχώσεων.

Η σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων έδειξε αποκλίσεις, τόσο στο μέγιστο φορτίο που μπορεί να παραληφθεί από τον φορέα, όσο και στην αντίστοιχη μετακίνηση. Για την περαιτέρω διερεύνηση των αποκλίσεων που παρατηρήθηκαν, μελετήθηκε η επιρροή των αρχικών ατελειών. Οι αρχικές ατέλειες προέκυψαν μέσω ιδιομορφικών αναλύσεων και ενσωματώθηκαν στην γεωμετρία του φορέα. Έτσι

πραγματοποιήθηκαν εκ νέου μη-γραμμικές αναλύσεις του γεωμετρικά ατελούς φορέα και έγινε σύγκριση με τα πειραματικά. Παρατηρήθηκε πως η εισαγωγή των γεωμετρικών ατελειών δεν επέφερε αλλαγές στη συμπεριφορά.

Από τις προαναφερθείσες αναλύσεις προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

- Ο λυγισμός που εμφανίζεται κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων και των αριθμητικών αναλύσεων, επέρχεται λόγω των θλιπτικών τάσεων που αναπτύσσονται στο άνω πέλμα του φύλλου αλουμινίου και οι αρχικές ατέλειες δεν επηρεάζουν το φαινόμενο αυτό.
- Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας που οδηγεί στο φαινόμενο του λυγισμού είναι ο τρόπος φόρτισης. Το φορτίο ασκείται σημειακά με αποτέλεσμα την συγκέντρωση των τάσεων στο σημείο αυτό, επομένως στην κρίσιμη τιμή του φορτίου, η συμπεριφορά γίνεται ασταθής.
- Η δυσκαμψία του φορέα επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το πάχος του φύλλου αλουμινίου και το μέτρο ελαστικότητας. Παρατηρήθηκε ότι στην περίπτωση εισαγωγής του πραγματικού πάχους στα στοιχεία (δηλαδή 1.12mm) η δυσκαμψία ταυτίζεται με αυτή των πειραμάτων. Το μέτρο ελαστικότητας που χρησιμοποιήθηκε, προέκυψε από πειραματικά αποτελέσματα στα κράματα αλουμινίου, στα οποία υπολογίζονται ακριβής τιμές για κάθε κράμα (Gehring, A., Saal, H., (2006)) αλλά και από δοκιμαστικές αναλύσεις, πέρα από την γενική τιμή που υποδεικνύει ο EC 9 για το αλουμίνιο και τα κράματα που προέρχονται από αυτό. Με τη χρήση του θεωρητικού μέτρου ελαστικότητας εμφανιζόταν αποκλίσεις στην δυσκαμψία του φορέα.
- Μία ακόμη παρατήρηση αφορά τον νόμο του υλικού που χρησιμοποιήθηκε, δηλαδή του ελαστοπλαστικού νόμου χωρίς κράτυνση. Εφαρμόζοντας τον, οι πειραματικές καμπύλες προσεγγίζονται με μεγαλύτερη ακρίβεια. Η μόνη διαφορά συγκριτικά με τον πλήρη νόμο του υλικού έγκειται στην τελική αντοχή του φορέα. Η απόκλιση αυτή μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως η συμπεριφορά του κράματος είναι διαφορετική από αυτή που αναμένουμε να λάβουμε βάση των προτύπων του EC 9. Πιο συγκεκριμένα, ο πραγματικός νόμος υλικού είναι άγνωστος. Για αυτό τον λόγο οι πειραματικές καμπύλες δε μπορούν να προσεγγιστούν ορθότερα με χρήση του πλήρους νόμου.

- Μία ακόμη παράμετρος στην οποία οφείλεται η απόκλιση μεταξύ πειραματικών αποτελεσμάτων και προσομοιώσεων, είναι οι συνθήκες στήριξης, οι οποίες είχαν μεγάλη επιρροή όσον αφορά τα μηχανικά φαινόμενα που αναπτύχθηκαν αλλά και στο φορτίο που δύναται να παραλάβει ο φορέας. Παρατηρήθηκε ότι η επιρροή των συνοριακών συνθηκών στήριξης του φύλλου αλουμινίου, ήταν σημαντική και έχει καθοριστικό ρόλο στην αντοχή του. Στην παραμετρική ανάλυση την οποία χρησιμοποιήθηκαν αρθρώσεις έναντι των κυλίσεων, προέκυψε ότι ο ίδιος ακριβώς φορέας δύναται να παραλάβει φορτίο αυξημένο κατά 40%, μόνο από την αλλαγή των συνοριακών συνθηκών στήριξης.
- Άλλος ένας σημαντικός παράγοντας που επηρέασε τα αποτελέσματα είναι η έλλειψη tensile coupon tests, ώστε να αντληθούν πληροφορίες για τις ιδιότητες του υλικού.
- Τέλος μία ακόμη πιθανή αιτία της απόκλισης των αποτελεσμάτων είναι η βαθμονόμηση του εμβόλου. Το έμβολο έχει δυνατότητα να αναπτύξει δύναμη έως 250 kN, συνεπώς η δύναμη των 4 kN που λαμβάνουμε από τα πειράματα είναι το 1.6% του μεγίστου. Η απόκλιση των 0.5 kN που λαμβάνουμε συγκριτικά με τις αναλύσεις είναι το 0.2% των 250 kN. Ένα μικρό σφάλμα κατά την βαθμονόμηση του εμβόλου, μπορεί να οδηγήσει σε αυτή την απόκλιση.

8 Βιβλιογραφία

8.1 Ξένη Βιβλιογραφία

1. Brebbia, C.A., Dominguez, J., (1994), Boundary Elements-An Introduction Course 2nd edition, WIT Press, New York.
2. Brush, D.O, Almroth, B.O, (1978), Buckling of bars, plates and shells, McGraw Hill Kogakusha, Tokyo.
3. Elishakoff, I., Arbocz, J., Babcock, C.D., Libai, A., (1988), Buckling of Structures Theory and Experiment, Elsevier, Amsterdam.
4. EN 1999-1-1 Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-1: General structural rules (EN1999-1-1:2007).
5. EN 1999-1-1/A1 Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-1: General structural rules (EN1999-1-1:2007/A1:2009).
6. EN 1999-1-4 Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-4: Cold-formed structural sheeting (EN1999-1-4:2007).
7. Gehring, A., Saal, H., (2006), Mechanical properties of aluminium in structural sheeting, Thin-Walled Structures 44(12), pp. 1231-1239.
8. Gitter, R., (2008), Design of Aluminium structures: Selection of Structural Alloys, in Dipl.-Ing. Reinhold Gitter, AluConsult, presented at the workshop: EUROCODES - Background and Applications Session EN 1999-Eurocode 9, pp.1-32, Brussels, Belgium.
9. Jones, R.M., (2006), Buckling of Bars, Plates and Shells, Bull Ridge, Blacksburg.
10. Kaufman, J.G., (2000), Understanding the Aluminum Temper Designation System in "Introduction to Aluminum Alloys and Tempers", ASM International Publishing, Materials Park, Ohio, pp. 39-76.

11. MSC Software Corporation, MSC Marc, Volume A: Theory and User Information, Version 2015.
12. MSC Software Corporation, MSC Marc, Volume C: Program Input, Version 2015.
13. Prasad, S., (2000), Studies on the Hall-Heroult Aluminum Electrowinning Process, Journal of the Brazilian Chemical Society 11(3), pp. 245-251.
14. Randolph, J., Pantelakis, S.G., Haidemenopoulos, G.N., (2004), Aluminum and Aluminum Alloys in “Handbook of Advanced Materials: Enabling New Designs”, JW.A Publishing, Hoboken N.J., pp. 321-463.
15. Reissener, E., (1945), Buckling of Plates with Intermediate Rigid Supports, Journal of the Aeronautical Sciences 12(3), pp. 376-377.
16. Starke Jr, E.A., (2005), Alloys: Aluminum in “Encyclopedia of Condensed Matter Physics, 1st Edition”, Academic Press Publishing, Amsterdam, pp.18-24.
17. Tabereaux, A.T., (2010), Hungarian Red Mud Disaster: Addressing Environmental Liabilities of Alumina Residue Storage & Disposal, Light Metal age Magazine published October 2010, pp.22-24.
18. Teng, J.G., Rotter, J.M., (2004), Buckling of Thin Metal Shells, Spon Press, London.
19. Timoshenko, S.P., Gere, J.M., (1961), Theory of Elastic Stability, Mc Graw Hill Book Co., Inc., New York.
20. Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L., Zhu, J.Z., (2005), The Finite Element Method 6th edition, Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford.

8.2 Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Κουνάδης, Α.Ν., (1997), «Γραμμική Θεωρία Ελαστικής Ευστάθειας β' έκδοση», Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
2. Παπαδρακάκης, Μ. (2001), «Ανάλυση Φορέων με την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
3. Τριανταφυλλίδης, Γ.Κ., (2014), Κεφ. 11.1-7 από «Μεταλλογνωσία», Εκδόσεις Τζίολα, Θεσσαλονίκη, σελ. 551-593.
4. Χρυσουλάκη, Γ.Δ., Παντελή, Δ.Ι., (2004), Κεφ. 12.5 «Επιστήμη και τεχνολογία μεταλλικών υλικών», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, σελ. 440-452.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πηγές Διαδικτύου

1. Σχήμα 2.1: Πηγή: [HOBOETC](#)
2. Σχήμα 2.2: Πηγή: [Alumilblog](#)
3. Σχήμα 2.3: Πηγή: [aircraftalumimum.com](#)
4. Σχήμα 2.9: Πηγή: [TehranTimes](#)
5. Σχήμα 4.13: Πηγή: [Engineering Library](#)