

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ
ΟΡΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΜΕΛΩΝ
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΥΠΟ ΚΑΜΨΗ

Άντρια Παπαζησίμου

Λεμεσός 2011

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ
ΟΡΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΜΕΛΩΝ
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΥΠΟ ΚΑΜΨΗ

Άντρια Παπαζησίμου

Επιβλέπων καθηγητής Κος Μιχαλάκης Πουλλαΐδης

Λεμεσός 2011

Πνευματικά δικαιώματα

Copyright © Αντρία Παπαζησίμου, 2011

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας μου κύριο Μιχαλάκη Πουλλαΐδη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου αυτή την εργασία, για την καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκειά της και κυρίως για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα ενδιαφέρον αντικείμενο. Επίσης ευχαριστώ τους καθηγητές κύριο Χρίστο Ευσταθιάδη και κύριο Γιώργο Αλεξάνδρου για τις παρατηρήσεις και τις υποδείξεις τους στη βελτίωση της εργασίας.

Θα ήταν παράληψη να μην εκφράσω και τις θερμές μου ευχαριστίες προς την εταιρεία Muskita Aluminium και ειδικότερα στον κ. Δημήτρη Ζαβαλή για την ευγενική παραχώρηση των δοκιμίων αλουμινίου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάγκη για εξέλιξη νέων υλικών στην οικοδομική βιομηχανία είναι αναπόφευκτη αλλά και αναγκαία. Τα κράματα αλουμινίου αποτελούν ένα υλικό που βρίσκει σήμερα όλο και πιο συχνά εφαρμογή στις κατασκευές, όχι μόνο σε αρχιτεκτονικές / οικοδομικές εφαρμογές, αλλά και σε φέρουσες ή αυτοφερόμενες κατασκευές πολιτικού μηχανικού.

Στόχος της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι να αναδείξει την χρήση του αλουμινίου στις φέρουσες κατασκευές Πολιτικού Μηχανικού, να παρουσιάσει τους απαραίτητους ελέγχους μέσα από τον Ευρωκώδικα 9 (ΕΚ 9) σε σχέση με την οριακή κατάσταση αστοχίας των κατασκευών. Περαιτέρω μέσα από μια σειρά πειραμάτων, να εξαχθούν συμπεράσματα αναφορικά με την οριακή κατάσταση μελών αλουμινίου σε κάμψη και να συγκριθούν τα σχετικά αποτελέσματα με τις αντίστοιχες τιμές του ΕΚ 9.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

| | |
|---|------|
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ | iv |
| ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ..... | v |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ | vii |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ..... | viii |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ | xi |
| ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ | xii |
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | xiii |
| 1. Το αλουμίνιο μέσα από τον Ευρωκώδικα 9..... | 1 |
| 1.1. Αλουμίνιο..... | 1 |
| 1.1.1. Γενικά..... | 1 |
| 1.1.2. Το αλουμίνιο και τα κράματά του | 4 |
| 1.1.3. Ιδιότητες αλουμινίου..... | 5 |
| 1.1.4. Παραγωγή αλουμινίου | 6 |
| 1.1.5. Πεδία εφαρμογών | 6 |
| 1.2. Οι Ευρωκώδικες στις κατασκευές..... | 16 |
| 1.2.1. Γενικά..... | 16 |
| 1.2.2. Ευρωκώδικας 9 | 17 |
| 2. Οριακές Καταστάσεις Αστοχίας Αλουμινίου | 22 |
| 2.1. Γενικά..... | 22 |
| 2.2. Ταξινόμηση διατομών | 23 |
| 2.2.1. Ταξινόμηση των στοιχείων των διατομών..... | 25 |
| 2.3. Αντίσταση σε τοπικό λυγισμό..... | 27 |
| 2.3.1. Παράμετροι λυγηρότητας | 29 |
| 2.4. Αντίσταση διατομών | 31 |
| 2.4.1. Γενικά..... | 31 |
| 2.4.2. Ιδιότητες διατομών | 32 |
| 2.4.3. Εφέλκυσμός | 34 |
| 2.4.4. Θλίψη..... | 35 |
| 2.4.5. Ροπή κάμψης..... | 37 |
| 2.4.6. Τέμνουσα | 41 |
| 2.4.7. Στρέψη | 43 |
| 2.4.8. Κάμψη και διάτμηση | 45 |

| | | |
|---------|--|----|
| 2.4.9. | Κάμψη και αξονική δύναμη..... | 46 |
| 2.4.10. | Αντοχή μελών των υποστηλωμάτων..... | 46 |
| 2.4.11. | Κάμψη, διάτμηση και αξονική δύναμη..... | 50 |
| 2.5. | Αντοχή μελών σε λυγισμό..... | 51 |
| 2.5.1. | Θλιβόμενα μέλη..... | 51 |
| 2.5.2. | Μέλη υπό κάμψη..... | 57 |
| 3. | Πειραματική και Θεωρητική προσέγγιση αλουμινίου..... | 63 |
| 3.1. | Αλουμίνιο σε κάμψη..... | 63 |
| 3.2. | Μέλη υπό κάμψη..... | 63 |
| 3.2.1. | Γενικά..... | 65 |
| 3.2.2. | Θεωρητική προσέγγιση..... | 71 |
| 3.2.3. | Πειραματική προσέγγιση..... | 75 |
| | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ..... | 80 |
| | ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | 86 |
| | ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | 88 |
| | ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ..... | 94 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

| | |
|--|----|
| Πίνακας 1: Επιμέρους συντελεστές ασφαλείας για οριακές καταστάσεις αστοχίας | 22 |
| Πίνακας 2: Παράμετροι λυγηρότητας β_1/ε , β_2/ε και β_3/ε | 26 |
| Πίνακας 3: Σταθερές C_1 και C_2 σε εξισώσεις για ρ_c | 27 |
| Πίνακας 4: Τιμές του συντελεστή μορφής α | 39 |
| Πίνακας 5: Τιμές του συντελεστή κ για μέλη με διαμήκεις συγκολλήσεις | 54 |
| Πίνακας 6: Τιμές των α και $\bar{\lambda}_0$ για καμπτικό λυγισμό | 54 |
| Πίνακας 7: Τιμές των α , $\bar{\lambda}_0$ και A_{eff} για στρεπτικό και στρεπτοκαμπτικό λυγισμό | 55 |
| Πίνακας 8: Συντελεστής μήκους λυγισμού k για θλιβόμενες ράβδους | 56 |
| Πίνακας 9: Διαστάσεις διατομών και αριθμός τεμαχίων | 65 |
| Πίνακας 10: Υπολογισμός παραμέτρου β | 67 |
| Πίνακας 11: Τιμές παραμέτρων λυγηρότητας β_1 , β_2 και β_3 | 67 |
| Πίνακας 12: Κατηγορία κατάταξης υλικού | 68 |
| Πίνακας 13: Υπολογισμός παραμέτρων β_1 , β_2 και β_3 | 68 |
| Πίνακας 14: Κατάταξη διατομών σε κλάση | 68 |
| Πίνακας 15: Υπολογισμός σταθερών C_1 και C_2 | 69 |
| Πίνακας 16: Τιμές του συντελεστή μορφής α | 71 |
| Πίνακας 17: Υπολογισμός W_{el} για τις διατομές μέσω του προγράμματος “AxisVM” | 74 |
| Πίνακας 18: Υπολογισμός ροπής $M_{c,Rd}$ | 75 |
| Πίνακας 19: Υπολογισμός ροπής $M_{u,Rd}$ | 75 |
| Πίνακας 20: Κατηγοριοποίηση διατομών | 76 |
| Πίνακας 21: Υπολογισμός M_{max1} | 79 |
| Πίνακας 22: Υπολογισμός M_{max2} | 79 |
| Πίνακας 23: M_{θ} , M_{max1} και M_{max2} για την διατομή 50x50x2 | 80 |
| Πίνακας 24: M_{θ} , M_{max1} και M_{max2} για την διατομή 80x80x4 | 81 |
| Πίνακας 25: M_{θ} , M_{max1} για την διατομή 100x100x2 | 82 |
| Πίνακας 26: M_{θ} , M_{max1} και M_{max2} για την διατομή 100x100x4 | 82 |
| Πίνακας 27: Υπολογισμός μέσης τιμή δοκιμών, για κάθε διατομή, για την ροπή M_{max1} | 84 |
| Πίνακας 28: Υπολογισμός μέσης τιμή δοκιμών, για κάθε διατομή, για την ροπή M_{max2} | 85 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

| | |
|---|----|
| Εικόνα 1: Η «reticular space structure» του «Interamerican Exhibition Center» στο Σάο Πάολο (Βραζιλία) | 8 |
| Εικόνα 2: Το «International Congress Centre» του Ρίο ντε Ζανέϊρο (Βραζιλία) | 8 |
| Εικόνα 3: Μεταφορά με ελικόπτερο ενός ελαφριού πύργου αναμετάδοσης..... | 9 |
| Εικόνα 4: Υπεράκτιες κατασκευές. | 9 |
| Εικόνα 5: Κινητή πεζογέφυρα | 10 |
| Εικόνα 6: Πύργος για αντένες..... | 10 |
| Εικόνα 7: Στέγη πισίνας κολύμβησης..... | 11 |
| Εικόνα 8: «Sport Hall» στο Quito (Εκουαδόρ) | 11 |
| Εικόνα 9: Η «Memorial Pyramid» στο La Baie (Quebec, Καναδά)..... | 11 |
| Εικόνα 10: The “Spruce Goose” dome during erection (Long Beach, California)..... | 12 |
| Εικόνα 11: Αλουμινένιοι θόλοι για φύλαξη καρβούνου..... | 13 |
| Εικόνα 12: Θόλοι στο μουσείο “Mercati Traianei” στην Ρώμη (Ιταλία) | 13 |
| Εικόνα 13: Γέφυρα Arvida(Quebec, Canada)..... | 14 |
| Εικόνα 14: Η Γερμανική στρατιωτική γέφυρα: φάση ανέγερσης | 15 |
| Εικόνα 15: Η νέα Σουηδική στρατιωτική γέφυρα | 15 |
| Εικόνα 16: Καμπύλες, χωρίς διαστάσεις, για διατομές όλων των κλάσεων | 24 |
| Εικόνα 17: Υπολογισμός ελαστικής ροπής αδρανείας Wel διατομής 50x50x2, μέσο του προγράμματος “AxisVM” | 73 |
| Εικόνα 18: Υπολογισμός ελαστικής ροπής αδρανείας Wel διατομής 100x100x2, μέσο του προγράμματος “AxisVM” | 74 |
| Εικόνα 19: Παραμόρφωση δοκιμίου Δ1 για επιβολή ενός φορτίου | 77 |
| Εικόνα 20: Παραμόρφωση δοκιμίου Δ1 | 77 |
| Εικόνα 21: Επιβολή δυο φορτίων έκκεντρα του δοκιμίου Δ2..... | 77 |
| Εικόνα 22: Παραμόρφωση δοκιμίου Δ2..... | 77 |
| Εικόνα 23: Επιβολή ενός φορτίου κεντρικά του δοκιμίου Γ1 | 77 |
| Εικόνα 24: Παραμόρφωση δοκιμίου Γ1 | 77 |
| Εικόνα 25: Υποβολή του δοκιμίου Δ3 στο μοντέλο μηχανής κάμψης «CONTROLS 50-C1400/*-50-C1401/*» | 78 |
| Εικόνα 26: Επιβολή ενός φορτίου κεντρικά του δοκιμίου Δ4..... | 78 |
| Εικόνα 27: Παραμόρφωση δοκιμίου Δ4..... | 78 |
| Εικόνα 28: Παραμόρφωση δοκιμίου Δ3..... | 78 |

| | |
|---|----|
| Εικόνα 29: Επιβολή δυο φορτίων έκκεντρα του δοκιμίου Δ3 | 78 |
| Εικόνα 30: Σχέση $M_{u,Rd}$ με M_{max1} και M_{max2} για την διατομή 50x50x2..... | 80 |
| Εικόνα 31: M_{θ} , M_{max1} και M_{max2} για την διατομή 80x80x4..... | 81 |
| Εικόνα 32: M_{θ} , M_{max1} για την διατομή 100x100x2..... | 82 |
| Εικόνα 33: M_{θ} , M_{max1} και M_{max2} για την διατομή 100x100x4..... | 83 |
| Εικόνα 34: Σχέση Πειραματικής Ροπής - Μέσων Τιμών της Πειραματικής Ροπής M_{max1} - Θεωρητικής Ροπής..... | 84 |
| Εικόνα 35: Σχέση Πειραματικής Ροπής - Μέσων Τιμών της Πειραματικής Ροπής M_{max2} - Θεωρητικής Ροπής..... | 85 |
| Εικόνα 36: Διάταξη φόρτισης για επιβολή ενός φορτίου..... | 95 |
| Εικόνα 37: Διάταξη φόρτισης για επιβολή δυο φορτίων..... | 95 |
| Εικόνα 38: Δοκίμια διατομής 100x100x4 | 96 |
| Εικόνα 39: Υποβολή δοκιμίου 100x100x4, σε διπλή φόρτιση, στη μηχανή ««CONTROLS, 50-C1400/*-50-C1401/*» | 96 |
| Εικόνα 40: Υποβολή δοκιμίου Δ4, 100x100x4, σε μια φόρτιση, στη μηχανή «CONTROLS, 50-C1400/*-50-C1401/*» | 96 |
| Εικόνα 41: Παραμόρφωση δοκιμίου Δ4, 100x100x4, υπό την επιβολή ενός φορτίου | 96 |
| Εικόνα 42: Παραμόρφωση δοκιμίου Γ2, 100x100x2, υπό την επιβολή ενός φορτίου..... | 96 |
| Εικόνα 43: Υποβολή δοκιμίου Β1, 80x80x4, σε μια φόρτιση, στη μηχανή «CONTROLS, 50-C1400/*-50-C1401/*» | 96 |
| Εικόνα 44: Παραμόρφωση δοκιμίου Β1, 80x80x4, υπό την επιβολή ενός φορτίου | 96 |
| Εικόνα 45: Παραμόρφωση δοκιμίου Β1, 80x80x4..... | 96 |
| Εικόνα 46: Παραμόρφωση δοκιμίου Β1, 80x80x4..... | 96 |
| Εικόνα 47: Υποβολή δοκιμίου Β2, 80x80x4, σε μια φόρτιση, στη μηχανή «CONTROLS, 50-C1400/*-50-C1401/*» | 96 |
| Εικόνα 48: Παραμόρφωση δοκιμίου Β2, 80x80x4..... | 96 |
| Εικόνα 49: Παραμόρφωση δοκιμίου Β2, 80x80x4..... | 96 |
| Εικόνα 50: Υποβολή δοκιμίου Β3, 80x80x4, σε διπλή φόρτιση, στη μηχανή «CONTROLS, 50-C1400/*-50-C1401/*» | 96 |
| Εικόνα 51: Παραμόρφωση δοκιμίου Β3, 80x80x4..... | 96 |
| Εικόνα 52: Παραμόρφωση δοκιμίου Β3, 80x80x4..... | 96 |
| Εικόνα 53: Παραμόρφωση δοκιμίου Β4, 80x80x4..... | 96 |
| Εικόνα 54: Παραμόρφωση δοκιμίου Β4, 80x80x4..... | 96 |
| Εικόνα 55: Παραμόρφωση δοκιμίου Α1, 50x50x2 | 96 |

| | |
|---|----|
| Εικόνα 56: Παραμόρφωση δοκιμίου A1, 50x50x2 | 96 |
| Εικόνα 57: Παραμόρφωση δοκιμίου A2, 50x50x2 | 96 |
| Εικόνα 58: Υποβολή δοκιμίου A3, 50x50x2, σε μια φόρτιση, στη μηχανή «CONTROLS, 50-C1400/*-50-C1401/*» | 96 |
| Εικόνα 59: Παραμόρφωση δοκιμίου A3, 50x50x2 | 96 |
| Εικόνα 60: Παραμόρφωση δοκιμίου A3, 50x50x2 | 96 |
| Εικόνα 61: Παραμόρφωση δοκιμίου A4, 50x50x2 | 96 |
| Εικόνα 62: Παραμόρφωση δοκιμίου A4, 50x50x2 | 96 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

| | |
|--|----|
| Σχήμα 1: Στοιχεία διατομών-τμήματα διατομών..... | 25 |
| Σχήμα 2: Σχέση μεταξύ ρ_c και β/ε για εξωτερικά τμήματα, εσωτερικά τμήματα και κυκλικούς σωλήνες..... | 28 |
| Σχήμα 3: Επίπεδα εσωτερικά στοιχεία υπό μεταβολή τάσεων, τιμές του η . Για εσωτερικά στοιχεία ή προεξέχοντα (μέγιστη θλίψη στη ρίζα) χρησιμοποίησε καμπύλη Α. Για προεξέχοντα (μέγιστη θλίψη στο χείλος) χρησιμοποίησε γραμμή Β. | 30 |
| Σχήμα 4: Τρόποι λυγισμού για επίπεδα ενισχυμένα στοιχεία | 31 |
| Σχήμα 5: Οπές ζικ-ζακ και κρίσιμες γραμμές θραύσης 1, 2 και 3..... | 33 |
| Σχήμα 6: Γωνιακά με οπές και στα δύο σκέλη | 33 |
| Σχήμα 7: Αντοχή διαμήκους και καθαρής διατομής. | 35 |
| Σχήμα 8: Καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης θλιβόμενου πέλματος σε διατομές διαφορετικής κλάσης..... | 38 |
| Σχήμα 9: Ροή και κέντρο διάτμησης..... | 43 |
| Σχήμα 10: Σχεδιασμός για αποφυγή στρέψης | 44 |
| Σχήμα 11: Δυνάμεις για να εμποδιστεί η στρέψη..... | 44 |
| Σχήμα 12: Διαξονική κάμψη της δοκού με ορθογωνική διατομή για $N = 0$ | 47 |
| Σχήμα 13: Καμπύλες αλληλεπίδρασης για ορθογωνικές δοκούς - υποστυλώματα όταν υποβληθούν σε αξονική δύναμη και διαξονική κάμψη | 47 |
| Σχήμα 14: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης ορθογωνικής διατομής δομικά στοιχεία, ιδανικό για ελαστο - πλαστικά υλικά..... | 48 |
| Σχήμα 15: Σχέση αλληλεπίδρασης για λεπτότοιχες διατομές | 49 |
| Σχήμα 16: Διατομές όπου είναι επιρρεπείς στον τοπικό λυγισμό | 51 |
| Σχήμα 17: Συντελεστής μείωσης λ για καμπτικό λυγισμό | 54 |
| Σχήμα 18: Συντελεστής μείωσης χ για στρεπτικό και στρεπτοκαμπτικό λυγισμός | 55 |
| Σχήμα 19: Καμπτικός και στρεπτοκαμπτικός λυγισμός. | 58 |
| Σχήμα 20: Διαγράμμα αλληλεπίδρασης της κάμψης σε δοκού – υποστηλώματος Η στους άξονες z και y..... | 60 |
| Σχήμα 21: Σχέση μεταξύ ρ_c και β/ε για εξωτερικά τμήματα, εσωτερικά τμήματα και κυκλικούς σωλήνες..... | 70 |

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

Παρουσιάζονται συνοπτικά όλες οι σημαντικές συντομογραφίες που έχουν χρησιμοποιηθεί στο κείμενο της πτυχιακής:

ΘΕΖ.: Θερμικά Επηρεαζόμενες Ζώνες

ΕΚ.: Ευρωκώδικας

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο άνθρωπος χρησιμοποιεί μέταλλα εδώ και περίπου 7 χιλιάδες χρόνια. Τα 200 χρόνια από την βιομηχανική επανάσταση και τα περίπου 100 από την βιομηχανική παραγωγή του αλουμινίου, μοιάζουν σαν ένας κόκκος άμμου στην κλεψύδρα της ιστορίας. Σε αντίθεση με τον χαλκό, τον χρυσό και τον σίδηρο, το αλουμίνιο δεν υπάρχει στην φύση σε απλές χημικές ενώσεις εύκολα διασπάσιμες, έτσι η απομόνωση του μετάλλου αυτού καθυστέρησε ιδιαίτερα.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία, γίνεται προσπάθεια παρουσίασης του αλουμινίου ως δομικό υλικό, της χρησιμοποίησής αυτού σε έργα Πολιτικού Μηχανικού, τη χρήση του ΕΚ 9 στις κατασκευές αλουμινίου, καθώς και τον έλεγχο του αλουμινίου σε οριακές καταστάσεις αστοχίας όπως, θλίψη, κάμψης, κάμψη και διάτμηση, κάμψη και αξονική δύναμη κλπ.. Γίνεται παρουσίαση όλων των πιο πάνω σε θεωρητικό επίπεδο ενώ για την αντοχή σε κάμψη γίνεται παράλληλα και πειραματική διερεύνηση.

Για την υλοποίηση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν κοιλοδοκοί αλουμινίου 50x50x2, 80x80x4, 100x100x2 και 100x100x4. Οι διατομές υποβλήθηκαν σε κάμψη μέσω της συσκευής «CONTROLS, 50-C1400/*-50-C1401/*», όπου και έγινε καταγραφή των αποτελεσμάτων (παρουσιάζονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3). Τα πειραματικά αποτελέσματα, αφού καταγράφηκαν, συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή των εξισώσεων, που αφορούν την κάμψη, του ΕΚ 9.

Η εξαγωγή των πειραματικών αποτελεσμάτων, έγινε αφού κρατήθηκαν σταθεροί όλοι οι υπόλοιποι παράγοντες όπως το άνοιγμα (60 εκατοστά), το υλικό που είναι κατασκευασμένα (κράμα αλουμινίου), και άλλαξε μόνο η διατομή των δοκιμίων. Συνολικά, χρησιμοποιήθηκαν 14 δοκίμια, εκ των οποίων τα 8 υποβλήθηκαν σε κεντρική φόρτιση με ένα φορτίο και τα 6 σε δυο φορτία έκκεντρα (ίσης απόστασης μεταξύ των φορτίων και των στηρίξεων) του δοκιμίου.

Από τις πειραματικές διατάξεις, καταγράφηκε η δύναμη η οποία αντιστοιχεί στο όριο θραύσης της διατομής του δοκιμίου. Γνωρίζοντας την δύναμη, εφαρμόζουμε τις στατικές εξισώσεις κάμψη για επιβολή ενός και δυο φορτίων, τα αποτελέσματα των οποίων συγκρίνονται με τις αντίστοιχες εξισώσεις του ΕΚ 9.

Τέλος, δημιουργήθηκαν γραφικές παραστάσεις, που περιγράφουν, την σχέση της μεταξύ της θεωρητικής ροπής και της πειραματικής τιμής της ροπής για κάθε διατομή.

1. Το αλουμίνιο μέσα από τον Ευρωκώδικα 9

1.1. Αλουμίνιο

1.1.1. Γενικά

Το αλουμίνιο που ως χημικό στοιχείο απομονώθηκε για πρώτη φορά από τον Whöler το 1827, μόλις πρόσφατα άρχισε να χρησιμοποιείται μαζί με τα κράματά του ως δομικό υλικό σε φέροντες οργανισμούς έργων Πολιτικού Μηχανικού. Η βιομηχανική παραγωγή του αλουμινίου ξεκίνησε το 1886 μετά την ανακάλυψη της ηλεκτρολυτικής διαδικασίας παραγωγής του από τον Γάλλο Paul Luis Touissant Héroult και ταυτόχρονα και ανεξάρτητα από τον Αμερικανό Charles Martin Hall. Το αλουμίνιο και τα κράματά του χρησιμοποιήθηκαν αρχικά σε εφαρμογές όπου οι ιδιότητές του το έκαναν αναντικατάστατο (π.χ. στην αεροναυπηγική από τα Zeppelin μέχρι τα Concorde), όμως πολύ σύντομα η χρήση του επεκτάθηκε σε πλήθος άλλου τύπου εφαρμογών (αρχιτεκτονικές εφαρμογές, πλαίσια κουφωμάτων, στα μέσα μεταφορών, στη ναυπηγική, στην αυτοκινητοβιομηχανία κ.ο.κ.). Παράλληλα, τη δεκαετία του '50, τα κράματα αλουμινίου άρχισαν να εμφανίζονται στην ανέγερση φερόντων οργανισμών σε κατασκευές Πολιτικού Μηχανικού στην Ευρώπη ως εναλλακτική λύση στην κατασκευή κτιρίων που μέχρι τότε κατασκευαζόταν αποκλειστικά από δομικό χάλυβα. Η παντελής όμως έλλειψη σχετικών Προδιαγραφών, Συστάσεων Σχεδιασμού και Κανονισμών κατά τη διάρκεια της πρώτης αυτής περιόδου, περιόρισε το εύρος αυτού του είδους εφαρμογών του αλουμινίου καθώς έκανε τον σχεδιασμό των κτιρίων από αλουμίνιο μια επίπονη και αμφίβολης ποιότητας εργασία τόσο για τους μελετητές, όπως και για τις υπηρεσίες ελέγχου.

Από το τέλος της δεκαετίας του '70, το κενό αυτό άρχισε σε ευρωπαϊκό επίπεδο να καλύπτεται από τα αποτελέσματα μιας ευρύτατης δράσης του ECCS (Ευρωπαϊκή Σύμβαση για τις Κατασκευές Δομικού Χάλυβα). Οι Συστάσεις Σχεδιασμού του ECCS που προέκυψαν, χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια ως βάση σε όσα Ευρωπαϊκά κράτη αποφάσισαν να συντάξουν αντίστοιχο εθνικό Κανονισμό για τον σχεδιασμό φερουσών κατασκευών αλουμινίου (Μπανιωτόπουλος, Χ. Κ., 2006).

Αξίζει να τονισθεί στο σημείο αυτό ότι, παρά την ύπαρξη πλαισίου βάσης σχεδιασμού για τις κατασκευές αλουμινίου, οι ιδιαίτερες δυνατότητες των κραμάτων αλουμινίου (όπως είναι

π.χ. το μικρό βάρος τους, η οξειδωσή του που δρα ως προστατευτική βαφή, η πλαστικότητα του, η πολύ αυξημένη τιμή του λόγου αντοχής προς βάρος κ.ο.κ.) δεν λαμβάνονται πλήρως υπόψη από τους μελετητές ακόμη και σήμερα ώστε να είναι προφανής η εναλλακτική επιλογή του αλουμινίου αντί του χάλυβα σε κατασκευές Πολιτικού Μηχανικού (Θωμόπουλος Κ., 2000). Λόγω του μικρού ίδιου βάρους των κατασκευών αλουμινίου, αυτές συνήθως παρουσιάζουν ιδιαίτερη ευαισθησία στα φορτία ανέμου (Baniotopoulos C.C., 2007)

Συγκεκριμένα, το αλουμίνιο διαθέτει ορισμένες ιδιότητες που το καθιστούν ανταγωνιστικό ως προς τον δομικό χάλυβα (Mazzolani, 1995b, 1998c, 1999b, 2003a, 2004):

- Το αλουμίνιο είναι ένα πολύ ελαφρύ δομικό υλικό με βάρος 2.700 kgm^{-3} που αντιστοιχεί στο ένα τρίτο του βάρους του χάλυβα.
- Μετά από έκθεσή του στην ατμόσφαιρα, το αλουμίνιο καλύπτεται εξωτερικά από ένα προστατευτικό εξαιρετικά λεπτό στρώμα οξειδίου που δρα ως προστατευτική βαφή έναντι οξειδωσης, ακόμη και σε έντονα τοξικό (π.χ. παραθαλάσσιο) περιβάλλον.
- Το αλουμίνιο είναι ιδιαίτερα όλκιμο υλικό, ενώ ταυτόχρονα η αντοχή του είναι μικρή για κατασκευές Πολιτικού Μηχανικού. Για τον λόγο αυτό, προκειμένου να αυξηθεί η αντοχή του, χρησιμοποιείται ως κράμα με διάφορα άλλα στοιχεία (Mn, Mg, Si, Zn, Cu) οπότε τα αντίστοιχα κράματα που προκύπτουν (σειρές 1XXX, 2XXX, ..., 9XXX) έχουν βελτιωμένες ιδιότητες.
- Επίσης, η εφαρμογή θερμικής ή ψυχρής κατεργασίας είναι δυνατόν να οδηγήσει σε τιμές ελαστικού ορίου μέχρι $350\text{-}400 \text{ Nmm}^{-3}$ που είναι αντίστοιχες αυτών του δομικού χάλυβα (Fe360, Fe510).
- Τα προβλήματα παραμόρφωσης λόγω προβλημάτων τοπικού λυγισμού που παρουσιάζουν τα κράματα αλουμινίου καθώς το μέτρο του Young είναι τρεις φορές μικρότερο από αυτό του χάλυβα, έχουν σήμερα πλήρως επιλυθεί καθώς χρησιμοποιούνται εξελιγμένες μέθοδοι υπολογισμού που βασίζονται σε πληθώρα πειραματικών αποτελεσμάτων και αριθμοϋπολογιστικών προσομοιώσεων.

Συγκεκριμένα:

A Το χαμηλό τους βάρος (lightness) βοηθά στο να:

- Απλοποιηθεί η διαδικασία ανέγερσης
- μεταφερθούν πλήρως προκατασκευασμένα τμήματα
- μειωθούν τα φορτία προς τα θεμέλια (Efstathiades Ch., 2009)

- εξοικονομηθεί ενέργεια τόσο κατά την ανέγερση όσο και κατά την χρήση.

B Η αντίσταση τους στην διάβρωση βοηθά στο να

- μειωθούν τα έξοδα συντήρησης και να επεκταθεί σημαντικά η χρήση τους σε εργασίες αποκατάστασης (Efstathiades Ch., 2009)
- υπάρχει καλή αντοχή / απόδοση σε διαβρωτικά περιβάλλοντα
- προκύπτουν αποδεκτά αποτελέσματα στην ανάλυση κύκλων ζωής και αειφορίας των κατασκευών (Efthimiou E., 2011)

C Η μορφή των δομικών στοιχείων λόγω της διαδικασίας διέλασης βοηθά στο να:

- βελτιωθούν οι γεωμετρικές ιδιότητες των διατομών με το σχεδιασμό σχημάτων, το οποίο ταυτόχρονα δίνει το χαμηλότερο βάρος και την μέγιστη δομική επάρκεια (Efstathiades Ch., 2003).
- δημιουργηθούν τμήματα που προσφέρουν ακαμψία χωρίς την χρήση χτιστών τμημάτων αποφεύγοντας έτσι τη διαρροή.
- απλοποιηθεί το σύστημα συνδέσεων ανάμεσα σε διαφορετικά τμήματα βελτιώνοντας έτσι τις λεπτομέρειες των συνδέσεων (Μπανιωτόπουλος X. K., 2003, Baniotopoulos C. C., 2006).
- συνδυαστούν διάφορες λειτουργίες των δομικών τμημάτων επιτυγχάνοντας έτσι ένα πιο λογικά και οικονομικά στοιχεία / κατασκευές αλουμινίου (Efstathiades O. Ch., 2007)

Ανάμεσα στις διάφορες μεθόδους που χρησιμοποιούνται από τη βιομηχανία για την παραγωγή δομικών στοιχείων αλουμινίου ιδιαίτερα σημαντική είναι αυτή της διέλασης με την οποία παράγονται μέλη με διατομές κάθε είδους σχήματος. Εναλλακτικά ή για διατομές μεγάλων διαστάσεων οι μέθοδοι συγκόλλησης ελασμάτων αλουμινίου (MIG και TIG) έχουν σήμερα τεχνολογικά βελτιωθεί και τα προβλήματα στην εφαρμογή τους έχουν ελαχιστοποιηθεί με αποτέλεσμα τη χρησιμοποίηση συχνά συγκολλημένων διατομών. Το 1999 αποφασίστηκε από τον CEN η σύνταξη ενός Ευρωπαϊκού Κανονισμού με θέμα τον «Σχεδιασμό των Κατασκευών Αλουμινίου» που ονομάζεται Ευρωκώδικας 9 (prEN 1999-1-1:2003) (Mazzolani 1998a,b, 1999, 2001).

1.1.2. Το αλουμίνιο και τα κράματά του

Τα κράματα αλουμινίου αποτελούν ένα υλικό που βρίσκει σήμερα όλο και πιο συχνά εφαρμογή στις κατασκευές, όχι μόνο σε αρχιτεκτονικές / οικοδομικές εφαρμογές, αλλά και σε φέρουσες ή αυτοφερόμενες κατασκευές πολιτικού μηχανικού. Τα κράματα αλουμινίου παρουσιάζουν μια σειρά από ιδιότητες, από τις οποίες κάποιες είναι κοινές για όλα, ενώ κάποιες μεταβάλλονται ανάλογα με τη σύνθεση και την επεξεργασία του κράματος. Μέχρι πρόσφατα, ο σχεδιασμός κατασκευών από αλουμίνιο πραγματοποιείτο ξεχωριστά σε κάθε χώρα, στα πλαίσια μιας πληθώρας διαφορετικών κανονισμών και τεχνικών συστάσεων.

Το αλουμίνιο (Al) και η οικογένεια των κραμάτων του, είναι σήμερα μετά το σίδηρο και το χάλυβα, τα σημαντικότερα βιομηχανικά μέταλλα και η χρήση τους διαρκώς επεκτείνεται. Η σημερινή διάδοση του αλουμινίου είναι εύκολο να εξηγηθεί εάν ληφθούν υπ' όψη οι φυσικές ιδιότητές του. Πράγματι, το αλουμίνιο έχει το μικρότερο μετά το μαγνήσιο ειδικό βάρος από όλα τα βιομηχανικά μέταλλα. Επίσης, η μηχανική αντοχή ορισμένων κραμάτων του φθάνει το όριο θραύσεως 70 kp/mm^2 .

Για τους λόγους αυτούς, η αντοχή ανά μονάδα βάρους ορισμένων κραμάτων είναι εντυπωσιακά υψηλή, κατάλληλη για εφαρμογές στις αεροπορικές και διαστημικές κατασκευές. Επίσης, η ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα του καθαρού αλουμινίου είναι πολύ υψηλή, μικρότερη μόνο από το χαλκό (Cu), τον άργυρο (Ag) και το χρυσό (Au). Πάντως η ανά μονάδα βάρους αγωγιμότητα του αλουμινίου είναι μεγαλύτερη από όλα τα βιομηχανικά μέταλλα.

Το αλουμίνιο και τα κράματά του, παρουσιάζουν υψηλή αντοχή στην οξείδωση και στη διάβρωση, αν και αντιδρούν ισχυρά με το οξυγόνο. Αυτό οφείλεται στο οξείδιο του αλουμινίου που σχηματίζει ένα αδιαπέραστο στρώμα στην επιφάνεια του μετάλλου και δεν επιτρέπει την περαιτέρω οξείδωση του μετάλλου. Στο οξείδιο αυτό οφείλεται και το μοναδικό ίσως μειονέκτημα που παρουσιάζει το αλουμίνιο και τα κράματά του, δηλαδή τη δύσκολη συγκόλλησή τους στον ατμοσφαιρικό αέρα. Αντίθετα, το αλουμίνιο και τα κράματα του προσφέρονται για όλους τους τύπους των μηχανουργικών κατεργασιών, χύτευση, κοπή, εξέλαση κλπ.

Τα πλεονεκτήματα αυτά σε συνδυασμό με τα μεγάλα αποθέματα αλουμινίου που υπάρχουν (το αλουμίνιο είναι το πιο διαδεδομένο μέταλλο στην επιφάνεια της γης), το καθιστούν ισχυρό ανταγωνιστή του σιδήρου και του χάλυβα (Efstathiades Ch., 2009).

1.1.3. Ιδιότητες αλουμινίου

Οι ιδιότητες του αλουμινίου και των κραμάτων επηρεάζονται σημαντικά από τις μηχανικές και θερμικές κατεργασίες του. Γενικά τα κράματα αλουμινίου που χρησιμοποιούνται σε φέρουσες κατασκευές παρουσιάζουν τις εξής ιδιότητες / πλεονεκτήματα:

- Έχει χαμηλό ειδικό βάρος. Μόλις το 1/3 εκείνου του χάλυβα.
- Διαμορφώνεται, ελάσσεται, εξελάσσεται, διελάσσεται, συγκολλείται με ευκολία συνεπώς είναι ιδανικό μέταλλο κατασκευών. Το μέτρο ελαστικότητας του (70.000 MPa) είναι 3 φορές χαμηλότερο από εκείνο του χάλυβα. Σε δεδομένη κατάσταση φόρτισης, μία κατασκευή από αλουμίνιο παρουσιάζει 3 φορές μεγαλύτερη ελαστική επιμήκυνση απ' ό τι μία χαλύβδινη.
- Το αλουμίνιο και τα περισσότερα κράματά του είναι ανθεκτικό έως πολύ ανθεκτικό σε πολλές μορφές διάβρωσης. Λόγω της μεγάλης χημικής συνάφειας με το οξυγόνο, η φυσική επιφάνεια του μετάλλου είναι μόνιμα καλυμμένη με στρώμα οξειδίου του αργιλίου, που αποτελεί ένα πολύ αποτελεσματικό εμπόδιο εξάπλωσης της διάβρωσης. Αυτή είναι η ιδιότητα που το κάνει τόσο δημοφιλές στη Δόμηση, στη Ναυπηγική και στη βιομηχανία κατασκευής μεταφορικών μέσων (Αυτοκίνητα, Τραίνα, Αεροπλάνα). Το μειωμένο έως μηδενικό κόστος συντηρήσεως σε συνδυασμό με το χαμηλό ειδικό βάρος επηρεάζουν θετικά την επιλογή του αλουμινίου.
- Το αλουμίνιο είναι πολύ καλός αγωγός της θερμότητας και του ηλεκτρισμού.
- Δυνατότητα ανακύκλωσης χωρίς έντονη μεταβολή των ιδιοτήτων του υλικού.
- Καλή αντοχή και σκληρότητα, ακόμη και σε χαμηλές θερμοκρασίες. (ΕΛΒΙΑΛ, 2009)

Το μεγάλο πλεονέκτημα του αλουμινίου είναι η δυνατότητα διέλασης του, διαδικασία στην οποία υπερτερεί σημαντικά έναντι της κλασικής έλασης του χάλυβα. Η τεχνική αυτή επιτρέπει να παραχθούν διατομές οποιουδήποτε σχήματος και διαστάσεων, ανάλογα με τις επιλογές του κατασκευαστή και τις δομικές απαιτήσεις της κατασκευής. Σε πολλές περιπτώσεις, τα μειονεκτήματα που παρουσιάζονται στη μελέτη των κατασκευών αλουμινίου, αντιμετωπίζονται με την αλλαγή της μορφής των διατομών. Για παράδειγμα όπου υπάρχουν προβλήματα τοπικού λυγισμού μπορούν να αποφευχθούν μέσω διελατών ενισχύσεων στις πλάκες. Εξάλλου, με τη διέλαση, δίνεται η δυνατότητα βελτίωσης των γεωμετρικών ιδιοτήτων μιας διατομής, έτσι ώστε με την ελάχιστη επιπλέον ποσότητα υλικού να επιτυγχάνεται βέλτιστη φέρουσα ικανότητα (Efstathiades Ch., 2009).

1.1.4. Παραγωγή αλουμινίου

Το αλουμίνιο, ως χημικό στοιχείο, είναι μέταλλο που στην καθαρή, πρωτογενή του μορφή, είναι ελαφρύ, σχετικά μαλακό και συγκριτικά με άλλα στοιχεία, άφθονο. Αποτελεί περίπου το 8% του φλοιού της γης ενώ ο σίδηρος είναι μόνο το 5% του φλοιού. Ιστορικά, οι εποχές του χαλκού και του σιδήρου προηγήθηκαν σημαντικά της ανακάλυψης του αλουμινίου ως υλικού.

Ο λόγος που το αλουμίνιο άργησε τόσο πολύ να ανακαλυφθεί δεν είναι άλλος από την πορεία της εξέλιξης της τεχνολογικής ικανότητας του ανθρώπου. Ικανότητα, που τα τελευταία 100-150 χρόνια του επιτρέπει όχι μόνο να εξαγάγει το αλουμίνιο από τον φλοιό της γης, αλλά και να το επεξεργάζεται και να το χρησιμοποιεί ως υλικό. Η τεχνική πρόκληση με την οποία βρέθηκαν αντιμέτωποι οι επιστήμονες στα τέλη του 19ου αιώνα ήταν η εξαγωγή του αλουμινίου από το βωξίτη. Τη λύση ήρθε να δώσει η επινόηση της ηλεκτρολυτικής διαδικασίας της μεθόδου «Hall-Héroult», η οποία χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα. Με τη μέθοδο αυτή κατέστη δυνατή η παραγωγή αλουμινίου από την αλουμίνα, χημική ένωση που υπάρχει στον ορυκτό βωξίτη. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη της μεθόδου παραγωγής της αλουμίνας από το ορυκτό του βωξίτη, από τον Karl Bayer δύο χρόνια αργότερα, είχε ως αποτέλεσμα την έναρξη της μαζικής παραγωγής αλουμινίου. Οι πρώτες εφαρμογές του βιομηχανικού, πλέον, προϊόντος αλουμινίου ήταν κατά κύριο λόγο υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στον Α΄ Παγκόσμιο Πόλεμο. Η χρήση του στον κατασκευαστικό χώρο και ειδικότερα στις εφαρμογές πολιτικού μηχανικού άρχισε στα τέλη της δεκαετίας του '50 και από τότε μέχρι σήμερα η βιομηχανία αλουμινίου αναπτύχθηκε τόσο, που η παραγωγή από 5700 τόνους που ήταν παγκοσμίως στη αρχή του εικοστού αιώνα, έφτασε σήμερα σε μεγέθη της τάξεως των 29 εκατομμυρίων τόνων και υπολογίζεται ότι τα επόμενα χρόνια θα αυξάνεται με ποσοστό 3-4% περίπου ετησίως.

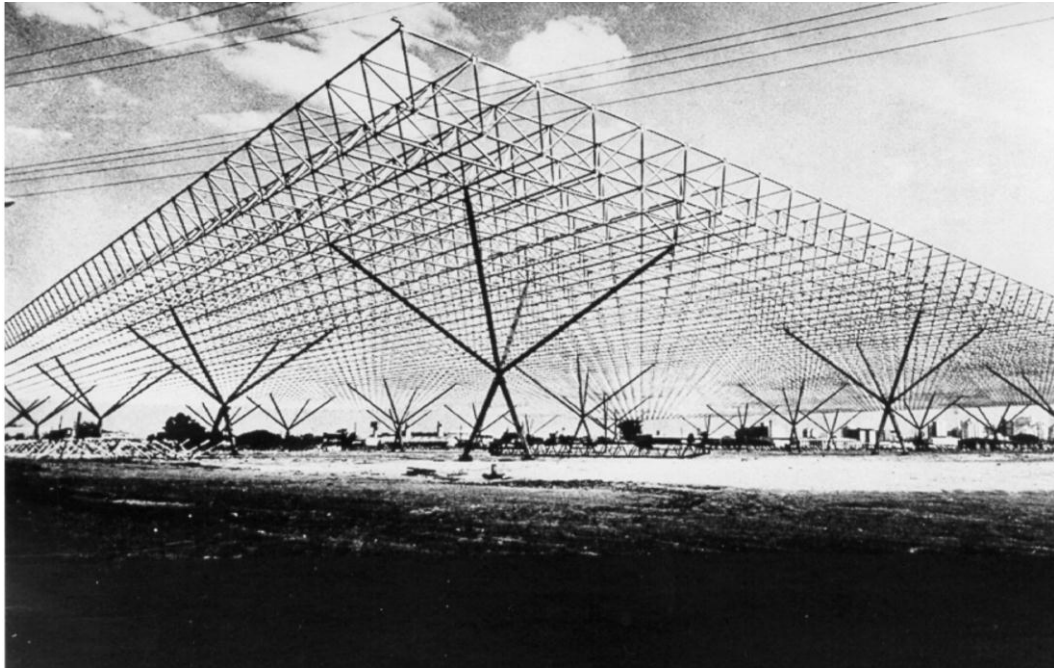
1.1.5. Πεδία εφαρμογών

Το πεδίο εφαρμογών συνοψίζεται σε κάποιες τυπικές περιπτώσεις, οι οποίες χαρακτηρίζονται, τουλάχιστον από μια από τις βασικές ιδιότητες που είναι: χαμηλό βάρος, αντίσταση στην διάβρωση και λειτουργικότητα.

Η δομική εφαρμογή που ταιριάζει καλύτερα στις πιο πάνω ιδιότητες δηλ. χαμηλό βάρος, αντίσταση στην διάβρωση και λειτουργικότητα, στον τομέα της πολιτικής μηχανικής είναι:

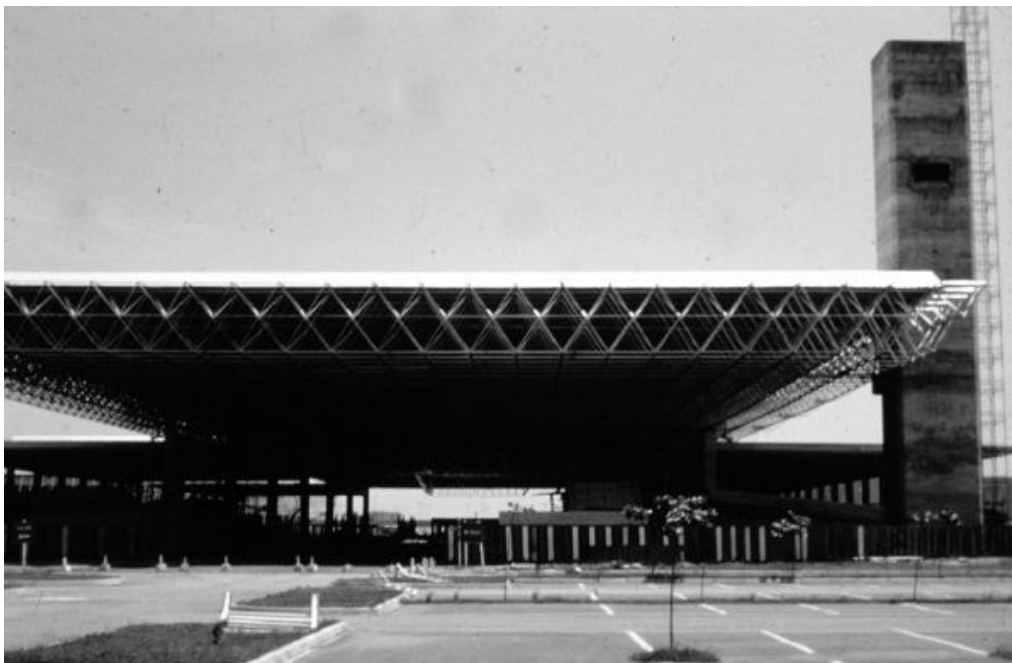
- Συστήματα οροφών μεγάλου μήκους στα οποία τα κινητά φορτία είναι μικρά σε σύγκριση με τα μόνιμα φορτία όπως στην περίπτωση των «reticular space structures» και των «geodetic domes» που καλύπτουν μεγάλες αποστάσεις όπως αίθουσες και αμφιθέατρα.

Όταν το βάρος της κατασκευής αποτελεί βασικό θέμα, η χρήση του αλουμινίου μπορεί να αποτελέσει μια πολύ καλή εναλλακτική λύση σε αντίθεση με το χάλυβα. Επιπρόσθετα, η ανάγκη για να μην υπάρχει συντήρηση, αυξάνει τα πλεονεκτήματα, ειδικά για κατασκευές που βρίσκονται σε υγρά περιβάλλοντα. Αρκετές εφαρμογές κατασκευών με δικτυώματα, βρίσκονται στην Νότια Αφρική (Βραζιλία, Κολομβία, Ισημερινό). Το ιστορικό υπόβαθρο σε αυτό τον τομέα αντιπροσωπεύεται από ένα πολύ θεαματικό κτίσμα που αναγέρθηκε για το «Interamerican Exhibition Center» στο Σάο-Πάολο της Βραζιλίας το 1969 (Εικόνα 3), που καλύπτει μια περιοχή περίπου 67600 m^2 με ένα πλέγμα (mesh) $60 \times 60 \text{ m}$. Το βάθος του δικτυωμάτων είναι 2.36 m . Ήταν ολοκληρωτικά site-bolted στο έδαφος και αφού ανεγέρθηκε στο τελικό επίπεδο των 14 m με την βοήθεια 25 γερανών που είχαν τοποθετηθεί περιμετρικά του πλέγματος, τοποθετήθηκε στην θέση των στηρίξεων. Το βάρος του δικτυώματος ήταν 16 kg/m^2 , ο αριθμός των μελών ήταν 56820 και το συνολικό τους μήκος κατά σειρά ήταν 300 km . Ο χρόνος ανέγερσης ήταν απίστευτα γρήγορος (27 ώρες), και χρησιμοποιήθηκαν 550000 κοχλίες σε 13724 nodes. Τα υλικά ήταν κράματα αλουμινίου 6063 και 6351 της σειράς T6 για κυλινδρικές δοκίδες / μέλη, για τραπεζοειδή πάνελ και γαλβανιζέ χαλύβδινους κοχλίες για τις συνδέσεις (Mazzolani, 2001b).



Εικόνα 1: Η «reticular space structure» του «Interamerican Exhibition Center» στο Σάο Πάολο (Βραζιλία)

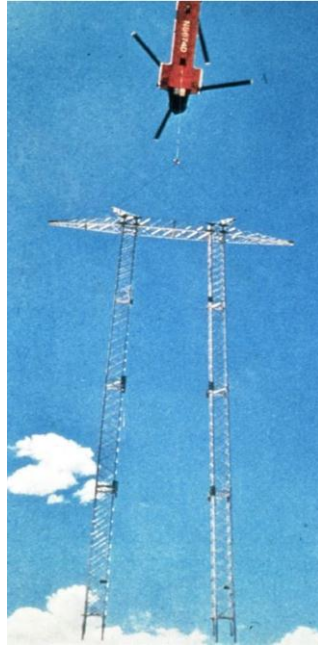
Πολύ όμοιο είναι και το «International Congress Center» του Ρίο ντε Τζανέιρο, όπου το ίδιο πλέγμα 60x60 m χρησιμοποιήθηκε, καλύπτοντας γενικά 33000 m².



Εικόνα 2: Το «International Congress Centre» του Ρίο ντε Ζανέϊρο (Βραζιλία)

- Κτήρια που βρίσκονται σε δύσβατες περιοχές, μακριά από το εργοστάσιο κατασκευής για τα οποία η εύκολη και οικονομική μεταφορά αλλά και η ευκολία στην ανέγερση

είναι μέγιστης σημασίας πχ πύργοι αναμετάδοσης οι οποίοι μπορούν να μεταφερθούν με ελικόπτερο.



Εικόνα 3: Μεταφορά με ελικόπτερο ενός ελαφριού πύργου αναμετάδοσης.

- Κτήρια που βρίσκονται σε υγρά ή διαβρωτικά περιβάλλοντα όπως οροφές πισινών, γέφυρες ποταμών (Mazzolani & Mele 1997, Mazzolani 2001b) υδραυλικές εγκαταστάσεις και offshore super structures.



Εικόνα 4: Υπεράκτιες κατασκευές.

- Κτήρια που έχουν κινητά τμήματα όπως γέφυρες βιολογικών εγκαταστάσεων (Mazzolani 1985a) κινητές γέφυρες / πεζογέφυρες, όπου το μειωμένο βάρος σημαίνει οικονομία στην ενέργεια κατά την λειτουργία της.



Εικόνα 5: Κινητή πεζογέφυρα

- Κτήρια για ειδικούς σκοπούς, των οποίων η συντήρηση είναι εξαιρετικά δύσκολη όπως πύργους για αντένες, πινακίδες για αυτοκινητόδρομους, κατάρτια, πύργους φωτισμού (Mazzolani 1991).



Εικόνα 6: Πύργος για αντένες.

Οι πιο πάνω ομάδες ανήκουν κυρίως στο εύρος της πολιτικής μηχανικής.

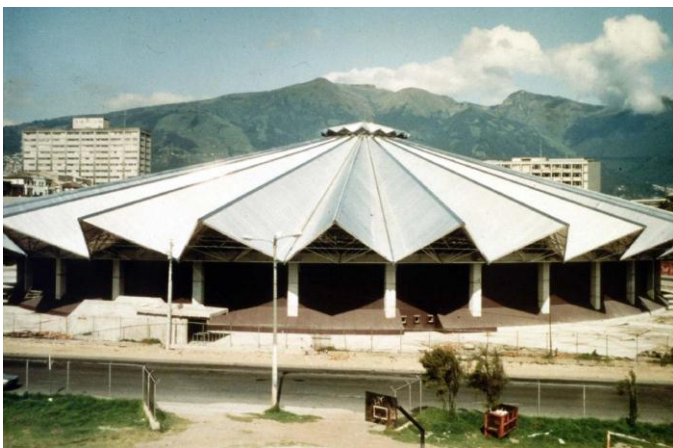
3.1.1.1.Ελαφριές Κατασκευές

Πολλές σημαντικές εφαρμογές αναπτύχθηκαν στην Κολομβία, όπως δικτυώματα για την στέγαση πισινών (Εικόνα 9). (Valencia G., Clement G., 2004).



Εικόνα 7: Στέγη πισίνας κολύμβησης

Ανάμεσα στις πολλές εφαρμογές, πρέπει να γίνει αναφορά στα δικτυώματα, καλυμμένα με πάνελ αλουμινίου όπως η οροφή του «Sport Hall» στο Κίτο, Ισημερινού (Εικόνα 10) και η «Memorial Pyramid» στο Κεμπέκ, Καναδά (Εικόνα 11), για να θυμίζει τις ζημιές που προκλήθηκαν μετά από πλημμύρα που έγινε την δεκαετία του 80.



Εικόνα 8: «Sport Hall» στο Quito (Εκουαδόρ)



Εικόνα 9: Η «Memorial Pyramid» στο La Baie (Quebec, Καναδά)

Οι δικτυωτοί θόλοι, αποτελούν την πιο δύσκολη (σε προκλήσεις) εφαρμογή των κραμάτων αλουμινίου στον δομικό τομέα, επιτρέποντας την πραγματοποίηση σημαντικών κτιρίων (αθλητικών αιθουσών, κέντρα έκθεσης, αίθουσες συνεδρίων, αμφιθέατρα κτλ). Αυτές οι

εφαρμογές είναι πολύ ενδιαφέρουσες σε ότι αφορά την ταχύτητα της ανέγερσης, τα συστήματα σύνδεσης και τις αξιοπρόσεκτες διαστάσεις τους. Οι πρώτες εφαρμογές ήταν:

- «Dome of Discovery» που ανεγέρθηκε στο Λονδίνο για το «South Bank Exhibition» κατά την διάρκεια του φεστιβάλ Βρετανίας (1951), που αποτελείται από 3 κατευθυντήριες δικτυωτές αψίδες, με διάμετρο 110m και βάρος 24kg/m² και θόλος που αναγέρθηκε για να καλύψει το «Palasport» στο Παρίσι με την χρήση συστήματος αλουμινίου Kaiser με 61m διάμετρο και 20m ύψος (1959). Και τα δύο αποτέλεσαν πρωτότυπα στον τομέα τους: το μεγαλύτερο και το πρώτο αντιστοιχώς. Πιο πρόσφατα ενδιαφέροντα συστήματα δόμησης για θόλους έχουν γίνει στις ΗΠΑ, όπου εξειδικευμένα συστήματα χρησιμοποιούνται τόσο για την στέγαση εργοστασίων με οικολογικούς σκοπούς, όσο και για την στέγαση δημοσίων κτηρίων. Μια γνωστή εφαρμογή είναι το «Spruce Goose Dome», αφού είναι η μεγαλύτερη στον κόσμο με διάμετρο 415 πόδια(Εικόνα 12).



Εικόνα 10: The “Spruce Goose” dome during erection (Long Beach, California)

Πολλοί θόλοι χρησιμοποιούνται για βιομηχανικές εφαρμογές όπως για φύλαξη του κάρβουνου (Εικόνα 13).



Εικόνα 11: Αλουμινένιοι θόλοι για φύλαξη καρβόνου

Μια πρόσφατη εφαρμογή των δικτυωτών θόλων, έχει γίνει στην Ρώμη κατά την αναστύλωση του μουσείου «Mercati Traianei».



Εικόνα 12: Θόλοι στο μουσείο “Mercati Traianei” στην Ρώμη (Ιταλία)

3.1.1.2. Γέφυρες

Όλα τα είδη γεφυρών έχουν κτιστεί με την χρήση των κραμάτων αλουμινίου. Η γέφυρα Anvida στο Κεμπέκ, Καναδά (1950) είναι το ενδιαφέρον πρωτότυπο μιας γέφυρας με αυτοκινητόδρομο που κατασκευάστηκε με κράμα αλουμινίου. Κτίστηκε σύμφωνα με το

σχέδιο Maillart με ολική έκταση 150m, μια αψίδα έκτασης 87m και συνολικό βάρος 200000kg (Εικόνα 15).



Εικόνα 13: Γέφυρα Arvida(Quebec, Canada)

Η τεχνολογία σύνθετων κατασκευών φτιαγμένων με αλουμιένιες δοκούς και τσιμεντένια πατώματα έχει επίσης αναπτυχθεί. Σύνθετα συστήματα σκυροδέματος-αλουμινίου έχουν χρησιμοποιηθεί σε μερικές γέφυρες από την δεκαετία του '60 στις ΗΠΑ και αργότερα στην Γαλλία. Ένα πρωτότυπο για μια νέα πλωτή γέφυρα έχει πρόσφατα ανοίξει στην Ολλανδία για την διάσχιση υδάτινων στενών (Soetens F., Hove D.V., Maljaars J., Janssen E., Mennink J.). Μια νέα σημαντική εφαρμογή είναι οι στρατιωτικές γέφυρες, στις οποίες το χαμηλό βάρος και η αντοχή στην διάβρωση παίζουν σημαντικό ρόλο. Σήμερα είναι δυνατό να φτάσεις τα 40m έκτασης με προκατασκευασμένα τμήματα, τα οποία είναι εύκολα στην μεταφορά και ανέγερση. Οι κύριες εφαρμογές έχουν αναπτυχθεί στην Μεγάλη Βρετανία, Γερμανία και Σουηδία. Στην Γερμανία μια στρατιωτική γέφυρα παράγεται από προκατασκευασμένα τμήματα, εύκολη στην μεταφορά και ανέγερση (Εικόνα 16).



Εικόνα 14: Η Γερμανική στρατιωτική γέφυρα: φάση ανέγερσης

Στο Σουηδικό μοντέλο (Εικόνα 17), χρησιμοποιείται υψηλής τεχνολογίας τριβή (Hoglund T., Nilsson L., 2005). Η πεζογέφυρα είναι μια δομική τυπολογία όπου τα κράματα αλουμινίου εμπλέκονται με επιτυχία, λόγω του χαμηλού μόνιμου φορτίου. Επιπρόσθετα πλεονεκτήματα λόγω του χαμηλού βάρους είναι ορατά σε κινητές γέφυρες. Παραδείγματα πεζογέφυρας μπορούν να βρεθούν στην Γαλλία, Γερμανία, Ολλανδία, Ιταλία, Καναδά.



Εικόνα 15: Η νέα Σουηδική στρατιωτική γέφυρα

1.2. Οι Ευρωκώδικες στις κατασκευές

1.2.1. Γενικά

Οι Ευρωκώδικες είναι μια σειρά Ευρωπαϊκών Προτύπων, EN 1990 - EN 1999, που παρέχουν μια κοινή προσέγγιση για το σχεδιασμό των κτηρίων και άλλων εργασιών πολιτικής μηχανικής, καθώς και στα προϊόντα δομικών κατασκευών. Εκπονήθηκαν από την CEN για την ολοκλήρωση της Οδηγίας 89 / 106 / ΕΟΚ «Προϊόντα Δομικών Έργων». Αναμένεται να συμβάλουν στην εγκαθίδρυση και την λειτουργία της εσωτερικής αγοράς για τα δομικά προϊόντα και υπηρεσίες μηχανικού, με την εξάλειψη των ανισοτήτων που παρεμποδίζουν την ελεύθερη κυκλοφορία τους εντός της Κοινότητας. Στόχος τους, είναι να θεσμοθετήσουν ένα σύνολο κοινών τεχνικών κανόνων για το σχεδιασμό των κτηρίων και των έργων Πολιτικού Μηχανικού με την προοπτική να αντικαταστήσουν τους διαφορετικούς εθνικούς κανονισμούς των Κρατών Μελών (Ευθύμιος Γαλανός, 2009).

Οι ΕΚ απαρτίζονται από 10 κύρια πρότυπα που συμπεριλαμβάνουν όλους τους τρόπους δόμησης (από σκυρόδεμα, χάλυβα, ξύλο, τοιχοποιία, αλουμίνιο καθώς και γεωτεχνικά έργα). Τα Κράτη Μέλη υποχρεούνται να αποδεκτούν τους ΕΚ και να σχεδιάζουν με βάση αυτούς, δεδομένου ότι τα πρότυπα Εθνικής εφαρμογής στους ΕΚ θα αποτελέσουν το πρότυπο τεχνικής προδιαγραφής σε όλες τις συμβάσεις για δημόσιες υπηρεσίες και δημόσια έργα.

Οι ΕΚ χωρίζονται σε 10 τμήματα τα οποία είναι:

- EN1990 Ευρωκώδικας0: Βάσεις Σχεδιασμού (1 Μέρος)
- EN1991 Ευρωκώδικας1: Δράσεις στους φορείς (10 Μέρη)
- EN1992 Ευρωκώδικας2: Σχεδιασμός Φορέων από Σκυρόδεμα(4Μέρη)
- EN1993 Ευρωκώδικας3: Σχεδιασμός Φορέων από Χάλυβα(20 Μέρη)
- EN1994 Ευρωκώδικας4: Σχεδιασμός Σύμμικτων Φορέων από Χάλυβα και Σκυρόδεμα (3 Μέρη)
- EN1995 Ευρωκώδικας5: Σχεδιασμός Ξύλινων Φορέων (3 Μέρη)
- EN1996 Ευρωκώδικας6: Σχεδιασμός Φορέων από Τοιχοποιία (5 Μέρη)
- EN1997 Ευρωκώδικας7: Γεωτεχνικός Σχεδιασμός (3 Μέρη)
- EN1998 Ευρωκώδικας8: Αντισεισμικός Σχεδιασμός (6 Μέρη)
- EN1999 Ευρωκώδικας 9: Σχεδιασμός Φορέων από Αλουμίνιο (3 Μέρη).

Έχουν ως στόχο να προσφέρουν:

- Βελτίωση της λειτουργίας της ενιαίας αγοράς για τα Δομικά Προϊόντα και τις υπηρεσίες Μηχανικού, αίροντας τα εμπόδια που υπάρχουν από τις διαφορετικές εθνικές κανονιστικές ρυθμίσεις και
- Ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας του κατασκευαστικού τομέα σε ευρωπαϊκό και διεθνές επίπεδο. (Eurocodes, EN 1999)

1.2.2. Ευρωκώδικας 9

Ο ΕΚ 9 ισχύει για τον σχεδιασμό κτιρίων και άλλων έργων πολιτικού μηχανικού και οικοδομικών από αλουμίνιο. Είναι σύμφωνος με τις αρχές και τις απαιτήσεις για την ασφάλεια και την λειτουργικότητα, που δίνονται στον EN 1990 – Βάσεις σχεδιασμού. Ο EN 1999 ασχολείται με τις απαιτήσεις σε αντοχή, συντήρηση, ανθεκτικότητα και αντοχή στη φωτιά των κατασκευών από αλουμίνιο. (Efstathiades Ch., 2009)

Η αναπόφευκτη πολυπλοκότητα ενός κώδικα που να αναφέρεται στις αλουμίνιες κατασκευές ουσιαστικά οφείλεται στην φύση του υλικού αυτού, (πιο δύσκολο και λιγότερο γνωστό από το ατσάλι), το οποίο περιλαμβάνει την επίλυση δύσκολων προβλημάτων και απαιτεί προσεκτική ανάλυση. Στην περίπτωση αυτή, η ανάγκη για να είναι ο κώδικας, τόσο εκπαιδευτικός και ενημερωτικός όσο και ρυθμιστικός, ήταν καθοριστική. (Mazzolani, 1998a, 1999a).

Η ENV έκδοση του Ευρωκώδικα 9, «Σχεδιασμός σε κατασκευές αλουμινίου» (1998) αποτελείται από 3 μέρη (Μέρος 1.1 «Γενικοί κανονισμοί», Μέρος 1.2 «Σχεδιασμός κτηρίων για φωτιά», Μέρος 2 «Κτήρια επιρρεπή στην διάβρωση».

Μετά από ρητή εντολή του European Aluminium Association (EAA), δύο νέα στοιχεία προστέθηκαν στην τροποποιητική φάση: στοιχεία ψυχρής έλασης και επιφανειακές κατασκευές, καθώς η βιομηχανία Αλουμινίου έχει ιδιαίτερα ενδιαφέρον στα δύο αυτά θέματα.

Η φάση μετατροπής από ENV σε EN ξεκίνησε το 2001 με βάση τα σχόλια και τις παρατηρήσεις που είχαν μαζευτεί στο διάστημα αυτό. Αυτή η φάση τελείωσε το 2005 και η τελική έκδοσή του ΕΚ 9 αποτελείται από τα εξής 5 τμήματα:

- EN 1999- 1- 1: Γενικοί κανόνες και κανόνες κτίρια.

- EN 1999- 1- 2: Σχεδιασμός έναντι πυρκαγιάς.
- EN 1999- 1- 3: Κατασκευές υποκείμενες σε κόπωση.
- EN 1999- 1- 4: Εν ψυχρώ κατεργασμένα δομικά φύλλα.
- EN 1999- 1- 5: Κελύφη (Ευθύμιος Γαλανός, 2009).

1.2.2.1. Τα κύρια χαρακτηριστικά του Ευρωκώδικα 9

Σε αντίθεση με τους υπόλοιπους Ευρωκώδικες, ο 9 αποτελείται από ένα μέρος μόνο το οποίο χωρίζεται σε ένα βασικό έγγραφο τους «Γενικούς κανονισμούς» και τέσσερα ειδικά έγγραφα το οποία σχετίζονται με τον βασικό. Δεν γίνεται αναφορά σε ειδικούς τύπους κτηρίων όπως το ατσάλι (πχ γέφυρες, πύργους, δεξαμενές) ούτε και σε αναφορές που να απασχολούν τους Πολιτικούς Μηχανικούς, αλλά γενικές αναφορές που είναι εφαρμόσιμες σε οποιοδήποτε είδος κατασκευής ακόμα και στην βιομηχανία μεταφορών.

Η προετοιμασία του Ευρωκώδικα 9 βασίστηκε στα πιο σημαντικά αποτελέσματα που έχουν επιτευχθεί στον τομέα των κατασκευών με μείγμα αλουμινίου, χωρίς να αγνοούνται προηγούμενες δραστηριότητες που έγιναν στο ECCS και κατά την αναθεώρηση σημαντικών κωδίκων όπως BS 8118.

Η μέθοδος του ECCS για τον λυγισμό των κολώνων επίσης χρησιμοποιείται στον ΕΚ 9 με μόνο μερικές διορθώσεις στα άρθρα. Βασίζεται στην χρήση 2 καμπύλων λυγισμού (α και β) που καλύπτουν προεκβάλλοντα profiles που έγιναν με θερμικά επηρεαζόμενα κράματα (Mazzolani 1994, 1995a). Γενικά οι έλεγχοι για δοκούς, κολώνες, έχουν γίνει λαμβάνοντας υπό όψιν τα ειδικά χαρακτηριστικά του κράματος του αλουμινίου. (Mazzolani & Valtinat, 1992).

Για συγκολλητές διατομές η τοπική επίδραση μείωσης της αντοχής (θερμικά επηρεασμένες ζώνες), λαμβάνονται υπό όψιν με την χρήση κατάλληλων μειωτικών παραγόντων. Αυτή η μέθοδος βασίζεται σε πειραματικά δεδομένα που καθορίζουν τμήματα με κράμα αλουμινίου ως βιομηχανικές μπάρες. Μια καινοτόμα προσέγγιση στον Ευρωκώδικα 9 όσον αφορά το τμήμα 1.1 «Γενικοί κανονισμοί» δίνεται για πρώτη φορά με την εισαγωγή ενός κώδικα για αλουμίνιο, η οποία αναλύει την ανελαστική συμπεριφορά του, από την επιμήκη διατομή μέχρι και την σφαιρική του αντιμετώπιση (Mandara & Mazzolani, 1995; Mazzolani & Piluso, 1995, De Matteis et al., 1999b; Mazzolani et al., 1999b).

Η ταξινόμηση της διατομής έχει γίνει βασιζόμενη στα αποτελέσματα πειραμάτων, που έχουν γίνει ειδικά για την περίπτωση αυτή σε έρευνα που προωθήθηκε από τους κύριους αντιπροσώπους της Ευρωπαϊκής Βιομηχανίας Αλουμινίου (European Aluminium Industry) η οποία παρείχε και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν.

Το αποτέλεσμα ήταν ο καθορισμός κατηγοριών που αφορούν την συμπεριφορά του αλουμινίου, βασιζόμενες στην b/t αναλογία λυγηρότητας, σύμφωνα με μια προσέγγιση ποσοτικά παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιείται για το ατσάλι αλλά με διαφορετικό εύρος συμπεριφορών, που βασίζονται στα αποτελέσματα πειραμάτων (Mazzolani et al., 1996a, 1999a, 2000a, 2001b, 2003c) και που επιβεβαιώνονται με αριθμητική εξομοίωση (Mazzolani et al., 1997c, De Matteis et al., 2001c, 2002a).

Ο υπολογισμός της αντοχής της διατομής εισάγεται με ένα ενωτικό τρόπο με εξειδικευμένες αναφορές για τα όρια που αφορούν την συμπεριφορά των 4 κατηγοριών.

Για μέλη κατηγορίας 4 (λυγηρές διατομές), ο έλεγχος του φαινομένου του τοπικού λυγισμού γίνεται με την βοήθεια μιας νέας μεθόδου υπολογισμού βασιζόμενη στην ιδέα του αποτελεσματικού πάχους. Τρεις νέες καμπύλες λυγισμού για λεπτές διατομές έχουν αξιολογηθεί λαμβάνοντας υπό όψιν τόσο τα θερμικά επηρεαζόμενα κράματα, όσο και τις συγκολλημένες και μη διατομές (Landolfo & Mazzolani 1995, 1998; Mazzolani et al., 1997a, 1998). Αυτή η μέθοδος αποτελεί το σημείο έναρξης για την λεπτομερή αντιμετώπιση των ψυχρής έλασης διατομών όπως αυτά φαίνονται στο τμήμα 1.4 του ΕΚ 9 «Συμπληρωματικοί κανονισμοί για ψυχρής έλασης διατομών».

Το πρόβλημα για την εκτίμηση εσωτερικών δράσεων έχει αντιμετωπιστεί λαμβάνοντας υπό όψιν διαφορετικά μοντέλα για τον καθορισμό του δομικού νόμου, από τα πιο απλά μέχρι και τα πιο πολύπλοκα, πράγμα που έδωσε και διάφορους βαθμούς προσέγγισης. Η παγκόσμια ανάλυση δομικών συστημάτων με ανελαστικότητα, βασίστηκε σε μια απλή μέθοδο παρόμοια με την γνωστή μέθοδο των πλαστικών αρθρώσεων, αλλά λαμβάνοντας υπό όψιν τις τυπικές παραμέτρους των κραμάτων αλουμινίου, όπως είναι η περιορισμένη ελατότητα μερικών κραμάτων. Η σημαντικότητα της ελατότητας σε τοπική και παγκόσμια συμπεριφορά αλουμινίων κατασκευών έχει δεχτεί μεγάλη έμφαση, λόγω της μερικών φορών μικρής επιμήκυνσης και μια νέα εξειδικευμένη μέθοδος για τον υπολογισμό της δυνατότητας στροφισμού για τμήματα σε λυγισμό έχει καθοριστεί.

Για την συμπεριφορά των ενώσεων ένα νέο σύστημα ταξινόμησης έχει προταθεί σύμφωνα με την δύναμη, ελατότητα και ακαμψία.

Βασιζόμενη στα πειραματικά αποτελέσματα των μονοτονικών και κυκλικών δοκιμών, μια νέα μέθοδος για τον υπολογισμό της δύναμης των ενώσεων T-stub έχει εισαχθεί στο τμήμα 1.1 (Mazzolani et al., 2000b; De Matteis et al., 1999c, 2001a,b, 2002b, 2003).

Το νέο τμήμα 1.5 του ΕΚ 9 «Συμπληρωματικοί κανονισμοί για επιφανειακές κατασκευές» δημιουργήθηκε ακολουθώντας τον τρόπο του ΕΚ 3, αλλά οι μέθοδοι υπολογισμού βασίζονται σε κατάλληλες καμπύλες λυγισμού οι οποίες λήφθηκαν από πειραματικά αποτελέσματα σε επιφανειακά αλουμίνια (Mandara & Mazzolani, 1989, 1990; Mazzolani et al., 2003 a,b; Mazzolani & Mandara, 2004).

Ο σχεδιασμός για φωτιά είναι βασικό θέμα για όλους τους Ευρωκώδικες που ασχολούνται με δομικά υλικά και βρίσκεται στο τμήμα 1.2 του ΕΚ 9 «Επιπρόσθετοι κανονισμοί για σχεδιασμό φωτιάς». Για τις αλουμίνιες κατασκευές έχει κωδικοποιηθεί για πρώτη φορά σύμφωνα με τους γενικούς κανονισμούς που υπολογίζουν την αντίσταση σε φωτιά βάση 3 κριτηρίων : Αντίσταση (R), Μόνωση (I), Ακεραιότητα (E).

Όπως είναι γνωστό, τα κράματα αλουμινίου είναι λιγότερο ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες από το ατσάλι και το οπλισμένο σκυρόδεμα. Ωστόσο με την χρήση λογικών μεθόδων υπολογισμού του κινδύνου, η ανάλυση ενός σεναρίου φωτιάς μπορεί σε μερικές περιπτώσεις να αποδειχτεί πιο ωφέλιμη όσον αφορά την σχέση χρόνου - θερμοκρασίας και έτσι να κάνει το αλουμίνιο πιο ανταγωνιστικό και οι θερμικές ιδιότητες των κραμάτων του μπορεί να έχουν θετικές επιδράσεις στην θερμική ανάπτυξη των δομικών τμημάτων (Mazzolani 1994).

Η γνώση για την συμπεριφορά σε κόπωση των συνδέσεων αλουμινίου έχει ενισχυθεί τα τελευταία 30 χρόνια (Mazzolani 1994). Το 1992 εκδόθηκε το ECCS Recommendations on Fatigue Design για κατασκευές με κράμα αλουμινίου, το οποίο αποτέλεσε και βασικό παράγοντα για την ανάπτυξη του ΕΚ 9. (Mandara et al., 1992; Mazzolani & Grillo, 1995). Αποφασίστηκε να αποτελεί το τμήμα 1.3 «Επιπρόσθετοι κανονισμοί για κτήρια επιρρεπή σε κόπωση» του ΕΚ 9, δίνοντας γενικούς κανονισμούς εφαρμόσιμους σε όλα τα κτήρια με φορτιστικές καταστάσεις κόπωσης. Τρεις μέθοδοι σχεδιασμού έχουν εισαχθεί:

- ασφαλής σχεδιασμός.

- σχεδιασμός αντοχής ζημιών.
- σχεδιασμός με βοήθεια δοκιμής.

Οι ακόλουθες βασικές ομάδες κατηγοριών έχουν ληφθεί υπό όψιν:

- σφυρηλατημένα και χυτά κράματα
- μέλη με κάθετες συγκολλημένες προσθέσεις
- μέλη με επιμήκη συγκολλημένες προσθέσεις
- προκατασκευασμένες δοκοί
- μηχανικά στερεωμένες ενώσεις
- κολλημένες χημικά ενώσεις.

Η χρήση πεπερασμένων στοιχείων και η καθοδήγηση στην αξιολόγηση με μηχανισμούς θραύσης έχουν εισηγηθεί για την ανάλυση τάσεων.

Ιδιαίτερη έμφαση έχει δοθεί στη σημαντικότητα του ελέγχου ποιότητας των συγκολλήσεων τόσο γενικά όσο και με ειδικές αναφορές από το EN 1090 «Εκτέλεση ατσάλινων και αλουμίνιων κατασκευών».

2. Οριακές Καταστάσεις Αστοχίας Αλουμινίου

2.1. Γενικά

Οι κατασκευές αλουμινίου και τα μέλη τους πρέπει να διαστασιολογούνται έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι βασικές απαιτήσεις σχεδιασμού για τις οριακές καταστάσεις αστοχίας που δίνονται στο Κεφάλαιο 2 του Ευρωκώδικα 9. Οι συστάσεις σχεδιασμού αναφέρονται σε κατασκευές που υπόκεινται σε κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 9, οι υπολογισμοί αντοχής για τα μέλη γίνονται χρησιμοποιώντας την χαρακτηριστική τιμή της αντοχής όπως παρακάτω:

f_o είναι η χαρακτηριστική τιμή της αντοχής για κάμψη και πλήρη διαρροή υπό εφελκυσμό και θλίψη

f_u είναι η χαρακτηριστική τιμή της αντοχής για την φέρουσα ικανότητα της καθαρής διατομής σε εφελκυσμό ή θλίψη

Οι χαρακτηριστικές τιμές του συμβατικού ορίου διαρροής 0,2% f_o και της αντοχής θραύσης f_u για ελατά κράματα αλουμινίου αναφέρονται αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 3.2.2 του Κεφαλαίου 3 του Ευρωκώδικα 9.

Οι επιμέρους συντελεστές ασφαλείας γ_M , όπως ορίζονται στο υποκεφάλαιο 2.4.3 του Κεφαλαίου 2, πρέπει να εφαρμόζονται στις διάφορες χαρακτηριστικές τιμές της αντοχής, όπως παρακάτω:

Πίνακας 1: Επιμέρους συντελεστές ασφαλείας για οριακές καταστάσεις αστοχίας

| | |
|--|---------------|
| αντίσταση διατομών ανεξάρτητα από την κατηγορία τους: | γ_{M1} |
| αντοχή μελών σε ευστάθεια υπολογισμένη από ελέγχους μελών: | |
| αντίσταση διατομών σε εφελκυσμό έως θραύση: | γ_{M2} |

Πηγή: Ευρωκώδικας 9

Οι επιμέρους συντελεστές ασφαλείας γ_{Mi} μπορούν να καθορίζονται στο Εθνικό Προσάρτημα κάθε χώρας. Ο Ευρωκώδικας 9, προτείνει τις τιμές $\gamma_{M1} = 1,10$ και $\gamma_{M2} = 1,25$.

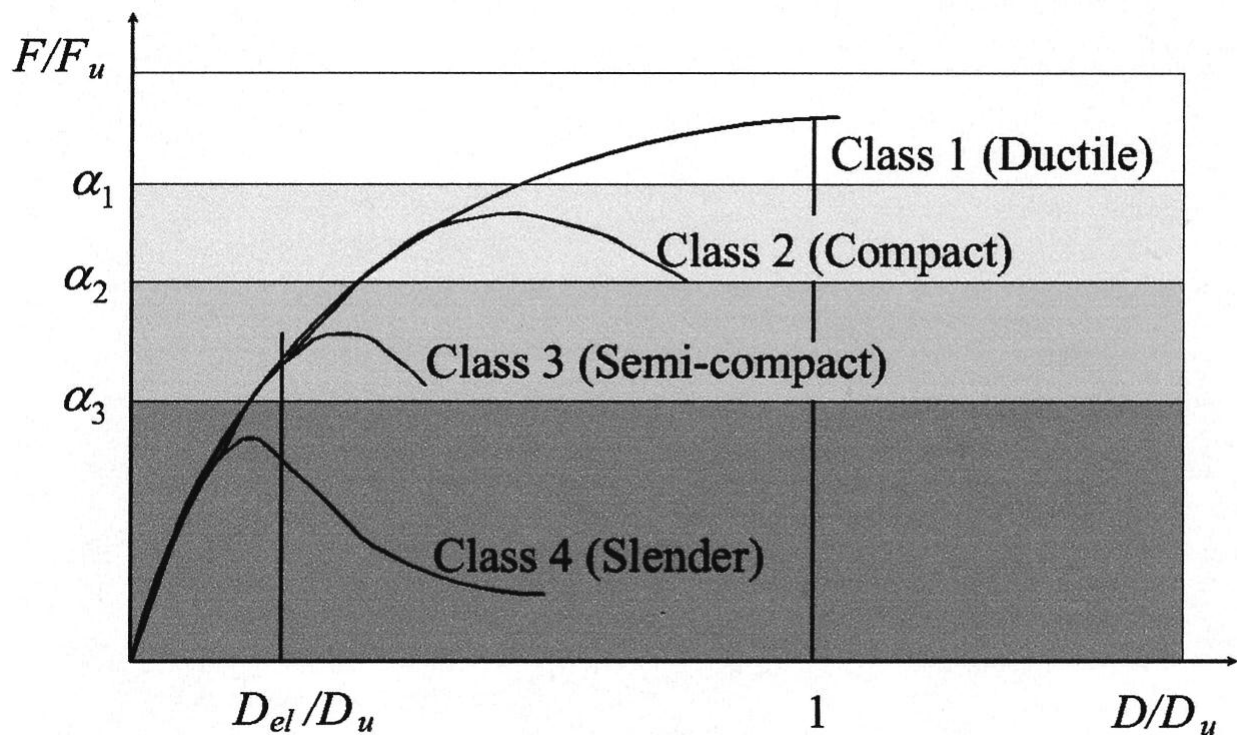
2.2. Ταξινόμηση διατομών

Η κατάταξη μιας διατομής, εξαρτάται από το λόγο του πλάτους προς το πάχος των τμημάτων της που υπόκεινται σε θλίψη. Τα διάφορα θλιβόμενα στοιχεία σε μια διατομή (όπως ο κορμός ή το πέλμα) μπορούν να ανήκουν σε διαφορετικές κατηγορίες. Η διατομή κατατάσσεται ανάλογα με τη μεγαλύτερη (λιγότερο ευμενή) κατηγορία θλιβόμενων στοιχείων της (Μπανιωτόπουλος). Τα θλιβόμενα στοιχεία περιλαμβάνουν κάθε τμήμα μιας διατομής το οποίο θλίβεται εξ ολοκλήρου ή εν μέρει για τον υπό θεώρηση συνδυασμό φορτίων.

Ο ρόλος της ταξινόμησης των διατομών είναι να αναγνωρίσει την έκταση στην οποία η αντίσταση και η στρωφική ικανότητα των διατομών περιορίζονται από την αντίστασή τους σε τοπικό λυγισμό.

Οι διατομές κατατάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες και καθορίζονται ως εξής:

- Διατομές κατηγορίας 1: είναι εκείνες που μπορούν να σχηματίσουν πλαστική άρθρωση με την απαιτούμενη από την πλαστική ανάλυση δυνατότητα στρωφής χωρίς απομείωση της αντοχής τους.
- Διατομές κατηγορίας 2: είναι εκείνες που μπορούν να αναπτύξουν την πλαστική ροπή αντοχής τους αλλά έχουν περιορισμένη δυνατότητα στρωφής λόγω τοπικού λυγισμού.
- Διατομές κατηγορίας 3: είναι εκείνες στις οποίες η τάση στην ακραία θλιβόμενη ίνα του χαλύβδινου μέλους μπορεί να φτάσει την αντοχή διαρροής, αλλά ο τοπικός λυγισμός είναι πιθανόν να εμποδίσει την ανάπτυξη της πλαστικής ροπής αντοχής.
- Διατομές κατηγορίας 4: είναι εκείνες στις οποίες ο τοπικός λυγισμός θα επέλθει πριν την ανάπτυξη της τάσης διαρροής σε ένα ή περισσότερα μέρη της διατομής (Ευρωκώδικας 9).



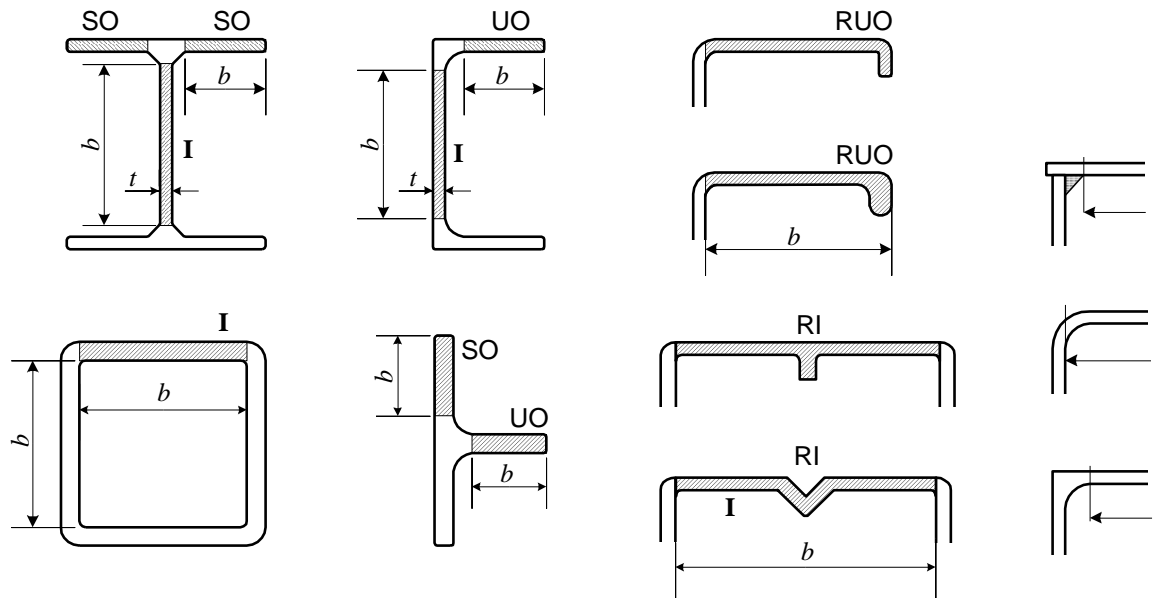
Εικόνα 16: Καμπύλες, χωρίς διαστάσεις, για διατομές όλων των κλάσεων

Σε διατομές κατηγορίας 4, προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι απομειώσεις στην αντοχή λόγω των επιδράσεων του τοπικού λυγισμού, χρησιμοποιούνται τα ενεργά πλάτη, όπως παρουσιάζονται πιο κάτω.

Κατά την διαδικασία ταξινόμησης των διατομών, αναγνωρίζονται οι παρακάτω βασικοί τύποι των λεπτότοιχων στοιχείων:

- a) επίπεδα προεξέχοντα στοιχεία
- b) επίπεδα εσωτερικά στοιχεία
- c) καμπύλα εσωτερικά στοιχεία

Αυτά τα στοιχεία μπορεί να είναι μη-ενισχυμένα ή ενισχυμένα με διαμήκεις νευρώσεις δυσκαμψίας ή με χείλη ή βολβούς, όπως παρουσιάζονται πιο κάτω (Ευρωκώδικας 9).



(a) Μη ενισχυμένα -----

(b) Ενισχυμένα -----

(c) Γωνιακά

| | | | | |
|---------------------|----|-----------------------------|-----|---|
| Συμβολισμοί: | SO | Συμμετρικώς προεξέχοντα | RI | Ενισχυμένα, εσωτερικά |
| | UO | Ασύμμετρα προεξέχοντα | RUO | Ενισχυμένα, μη συμμετρικώς προεξέχοντα |
| | I | Εσωτερικό τμήμα διατομής | | |

Σχήμα 1: Στοιχεία διατομών-τμήματα διατομών

2.2.1. Ταξινόμηση των στοιχείων των διατομών

Η κατάταξη των στοιχείων των διατομών σχετίζεται με τις τιμές της παραμέτρου λυγηρότητας β , και διαχωρίζονται σε στοιχεία σε δοκούς και στοιχεία σε θλιβόμενες ράβδους:

Στοιχεία σε δοκούς

$$\beta \leq \beta_1 : \text{κατηγορία 1}$$

$$\beta_1 < \beta \leq \beta_2 : \text{κατηγορία 2}$$

$$\beta_2 < \beta \leq \beta_3 : \text{κατηγορία 3}$$

$$\beta_3 < \beta : \text{κατηγορία 4}$$

Στοιχεία σε θλιβόμενες ράβδους

$$\beta \leq \beta_2 : \text{κατηγορία 1 or 2}$$

$$\beta_2 < \beta \leq \beta_3 : \text{κατηγορία 3}$$

$$\beta_3 < \beta : \text{κατηγορία 4}$$

Οι τιμές των β_1 , β_2 και β_3 δίνονται στον πιο κάτω Πίνακα 2.2, όπως παρουσιάζονται στον Ευρωκώδικα 9.

Πίνακας 2: Παράμετροι λυγηρότητας β_1/ε , β_2/ε και β_3/ε

| Ταξινόμηση υλικού σύμφωνα με τον Πίνακα 3.2 | Εσωτερικό στοιχείο | | | Προεξέχον στοιχείο | | |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | β_1/ε | β_2/ε | β_3/ε | β_1/ε | β_2/ε | β_3/ε |
| Κατηγορία A, χωρίς συγκολλήσεις | 11 | 16 | 22 | 3 | 4,5 | 6 |
| Κατηγορία A, με συγκολλήσεις | 9 | 13 | 18 | 2,5 | 4 | 5 |
| Κατηγορία B, χωρίς συγκολλήσεις | 13 | 16,5 | 18 | 3,5 | 4,5 | 5 |
| Κατηγορία B, με συγκολλήσεις | 10 | 13,5 | 15 | 3 | 3,5 | 4 |

$\varepsilon = \sqrt{250/f_o}$, f_o in N/mm²

Πηγή: Ευρωκώδικας 9

Ο Πίνακα 2 αναφέρεται σε στοιχεία διατομής με συγκολλήσεις και στοιχεία διατομής χωρίς συγκολλήσεις. Τα πρώτα θεωρούνται τα στοιχεία που περιέχουν συγκόλληση σε ένα άκρο ή σε οποιοδήποτε σημείο στο πλάτος τους. Τα δεύτερα, θεωρούνται τα στοιχεία στα οποία οι συγκολλήσεις είναι εγκάρσιες στον άξονα του μέλους και η θέση τους συμπίπτει με πλευρική δέσμευση.

Κατά την ταξινόμηση των στοιχείων σε μέλη υπό κάμψη, αν οι μεγαλύτερες τάσεις στα στοιχεία είναι μικρότερες από ότι στις ίνες με τις μεγαλύτερες τάσεις στη διατομή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τροποποιημένη σχέση $\varepsilon = \sqrt{(250/f_o)(z_1/z_2)}$. Σ' αυτή τη σχέση, z_1 είναι η απόσταση από τον ελαστικό ουδέτερο άξονα της ενεργού διατομής έως τις ίνες με τις μεγαλύτερες τάσεις στη διατομή και z_2 είναι η απόσταση από τον ελαστικό ουδέτερο άξονα της ενεργού διατομής έως το θεωρούμενο τμήμα. Οι z_1 και z_2 πρέπει να υπολογίζονται στην ενεργό διατομή μέσω επαναληπτικής διαδικασίας (τουλάχιστον δύο βήματα) (Ευρωκώδικας 9).

2.3. Αντίσταση σε τοπικό λυγισμό

Ο τοπικός λυγισμός σε μέλη κατηγορίας 4 λαμβάνεται γενικά υπόψη αντικαθιστώντας την πραγματική διατομή με μία ενεργό διατομή.

Η ενεργός διατομή προκύπτει με την εισαγωγή ενός συντελεστή τοπικού λυγισμού ρ_c για να μειωθεί το πάχος. Ο συντελεστής ρ_c εφαρμόζεται σε οποιοδήποτε στοιχείο κατηγορίας 4 με ομοιόμορφο πάχος, το οποίο υπόκειται ολόκληρο ή μερικώς σε θλίψη. Τα στοιχεία που δεν έχουν ομοιόμορφο πάχος απαιτούν ειδική μελέτη.

Ο συντελεστής ρ_c δίνεται από τις πιο κάτω σχέσεις, ξεχωριστά για τα διάφορα στοιχεία της διατομής, σε όρους του λόγου β/ε , όπου ο όρος β προκύπτει από την παράγραφο 6.1.4.3 του ΕΚ 9, ο όρος ε ορίζεται στον Πίνακα 2 που παρουσιάστηκε και οι σταθερές C_1 και C_2 στον Πίνακα 3. Οι σχέσεις μεταξύ ρ_c και β/ε συνοψίζονται στο Σχήμα 2.2.

$$\rho_c = 1,0 \quad \text{if } \beta \leq \beta_3$$

$$\rho_c = \frac{C_1}{(\beta/\varepsilon)} - \frac{C_2}{(\beta/\varepsilon)^2} \quad \text{if } \beta > \beta_3$$

Πίνακας 3: Σταθερές C_1 και C_2 σε εξισώσεις για ρ_c

| Ταξινόμηση υλικού σύμφωνα με τον Πίνακα 2.2 | Εσωτερικό τμήμα | | Προεξέχον τμήμα | |
|---|-----------------|-------|-----------------|-------|
| | C_1 | C_2 | C_1 | C_2 |
| Κατηγορία A, χωρίς συγκολλήσεις | 32 | 220 | 10 | 24 |
| Κατηγορία A, με συγκολλήσεις | 29 | 198 | 9 | 20 |
| Κατηγορία B, χωρίς συγκολλήσεις | 29 | 198 | 9 | 20 |
| Κατηγορία B, με συγκολλήσεις | 25 | 150 | 8 | 16 |

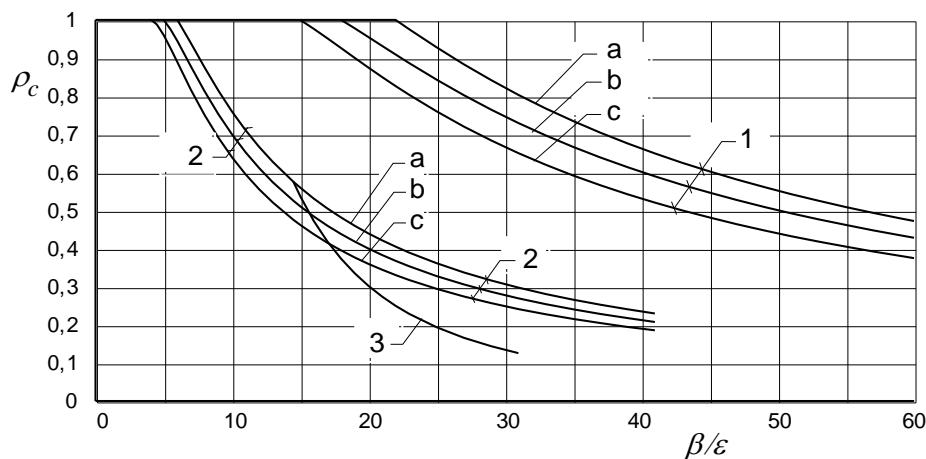
Πηγή: Ευρωκώδικας 9

Για επίπεδα προεξέχοντα στοιχεία σε μη συμμετρικές διατομές (Σχήμα 1), ο ρ_c προκύπτει από τις παραπάνω σχέσεις που ισχύουν για επίπεδα προεξέχοντα στοιχεία σε συμμετρικές διατομές, αλλά δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερος από $120/(\beta/\varepsilon)^2$.

Ο ΕΚ 9 δίνει διαφορετικές τιμές για τον συντελεστή ρ_c , ανάλογα με τις πιο κάτω περιπτώσεις:

- Στην περίπτωση που παρουσιάζονται ενισχυμένα στοιχεία διατομών, τότε πρέπει να θεωρηθούν όλοι οι πιθανοί τρόποι λυγισμού και να χρησιμοποιηθεί η μικρότερη τιμή του συντελεστή ρ_c .
- Στην περίπτωση του τρόπου λυγισμού 1, ο συντελεστής ρ_c πρέπει να εφαρμοστεί στην επιφάνεια της ενίσχυσης καθώς και στο πάχος του βασικού ελάσματος.
- Για ενισχυμένα προεξέχοντα τμήματα διατομών μπορεί να χρησιμοποιηθεί η καμπύλη για τα προεξέχοντα στοιχεία, αλλιώς η καμπύλη για τα εσωτερικά στοιχεία διατομής του Σχήματος 2.2.

Σε ότι αφορά διατομές με απαίτηση διαξονικής κάμψη ή συνδιασμό κάμψης και αξονικού



φορτίου, ο προσδιορισμός του συντελεστή ρ_c γίνεται αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 6.3.3(4) του Ευροκώδικα 9.

1) Εσωτερικά στοιχεία και κυκλικοί σωλήνες, 2) Συμμετρικά προεξέχοντα, 3) Μη-συμμετρικά προεξέχοντα

a) κατηγορία A, χωρίς συγκολλήσεις,

b) κατηγορία A, με συγκολλήσεις ή κατηγορία B, χωρίς συγκολλήσεις

c) κατηγορία B, με συγκολλήσεις

Σχήμα 2: Σχέση μεταξύ ρ_c και β/ϵ για εξωτερικά τμήματα, εσωτερικά τμήματα και κυκλικούς σωλήνες

2.3.1. Παράμετροι λυγηρότητας

Η λυγηρότητα που παρουσιάζουν οι διατομές, και συγκεκριμένα η ευπάθεια των μη ενισχυμένων στοιχείων τους σε τοπικό λυγισμό, καθορίζεται από την παράμετρο β , που σύμφωνα με το Κεφάλαιο 6, παράγραφος 6.1.4.3 του Ευρωκώδικα 9, έχει τις πιο κάτω τιμές:

- a) επίπεδα εσωτερικά στοιχεία χωρίς μεταβολή τάσεων ή επίπεδα προεξέχοντα στοιχεία χωρίς μεταβολή τάσεων ή μέγιστη θλίψη στο άκρο

$$\beta = b/t$$

- b) εσωτερικά στοιχεία με μεταβολή τάσεων που έχει ως αποτέλεσμα τον ουδέτερο άξονα στο κέντρο

$$\beta = 0,40 b/t$$

- c) εσωτερικά στοιχεία με μεταβολή τάσεων και προεξέχοντα με μέγιστη θλίψη στη ρίζα $\beta = \eta b/t$

όπου:

b είναι το πλάτος του στοιχείου της διατομής

t είναι το πάχος της διατομής

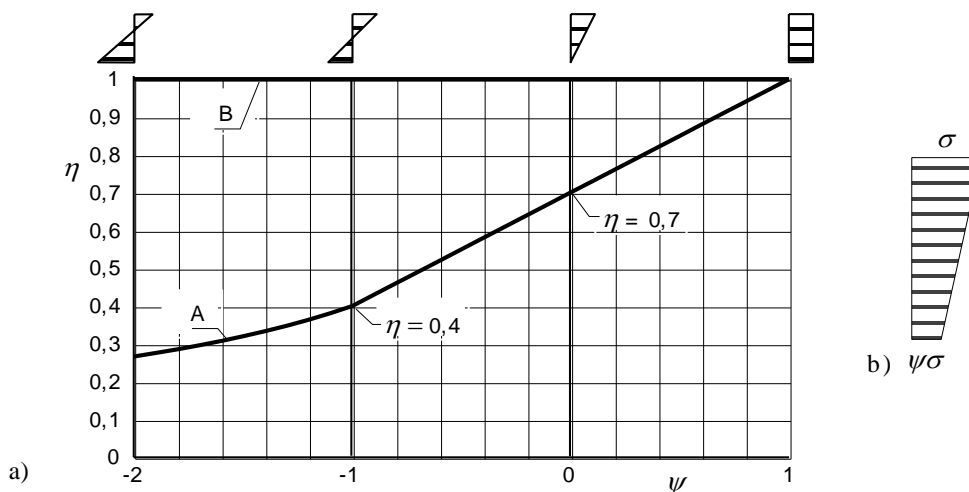
η είναι ο συντελεστής μεταβολής τάσεων που δίνεται από τις σχέσεις:

$$\eta = 0,70 + 0,30\psi \quad (1 \geq \psi \geq -1),$$

$$\eta = 0,80/(1 - \psi) \quad (\psi < -1), \text{ (Βλέπε Σχήμα 3)}$$

όπου

ψ είναι ο λόγος των τάσεων στα άκρα του ελάσματος υπό εξέταση σχετικά με την μέγιστη θλιπτική τάση. Γενικά, ο ουδέτερος άξονας πρέπει να είναι ο ελαστικός ουδέτερος άξονας, αλλά στον έλεγχο αν η διατομή είναι κατηγορίας 1 ή 2 είναι επιτρεπτή η χρήση του πλαστικού ουδέτερου άξονα (Ευρωκώδικας 9).

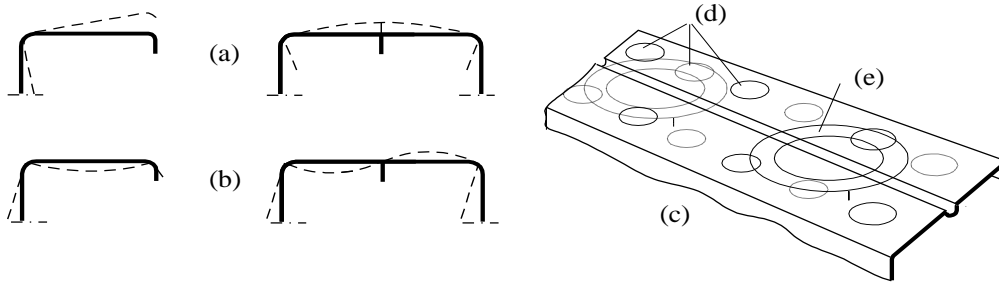


Σχήμα 3: Επίπεδα εσωτερικά στοιχεία υπό μεταβολή τάσεων, τιμές του η . Για εσωτερικά στοιχεία ή προεξέχοντα (μέγιστη θλίψη στη ρίζα) χρησιμοποίησε καμπύλη Α. Για προεξέχοντα (μέγιστη θλίψη στο χείλος) χρησιμοποίησε γραμμή Β.

Έχοντας καθορίσει την ευπάθεια των ενισχυμένων επίπεδων στοιχείων των διατομών σε τοπικό λυγισμό, ο Ευροκώδικας 9 έρχεται να θεωρήσει τρεις πιθανούς τρόπους λυγισμού, οι οποίοι έχουν προέλθει μετά από την εξέταση των διατομών (στην ευπάθεια τους) σε λυγισμό. Να σημειωθεί, ότι για κάθε τρόπο ισχύουν διαφορετικές τιμές του β .

Οι τρεις τρόποι παρουσιάζονται πιο κάτω, και αναπαριστούνται στο Σχήμα 4.

- a) Τρόπος 1: το ενισχυμένο στοιχείο λυγίζει ως μονάδα, έτσι ώστε η ενίσχυση λυγίζει με την ίδια καμπυλότητα όπως το στοιχείο. Αυτός ο τρόπος συχνά αναφέρεται ως συστροφικός λυγισμός.
- b) Τρόπος 2: τα υπό-στοιχεία και η ενίσχυση λυγίζουν ως μεμονωμένα στοιχεία με τη μεταξύ τους ένωση να παραμένει ευθεία.
- c) Τρόπος 3: αυτός είναι ένας συνδυασμός των Τρόπων 1 και 2 κατά τον οποίο οι ήβιο των υπό-στοιχείων επαλληλίζονται, οπότε προκύπτει ο λυγισμός ολόκληρου του στοιχείου. Αυτό υποδεικνύεται στο Σχήμα 4(c).



(a) Τρόπος 1, (b) Τρόπος 2, (c) Τρόπος 3, (d) Ήβρι υπο-στοιχείων, (e) Ήβρι ολόκληρων των ενισχυμένων στοιχείων

Σχήμα 4: Τρόποι λυγισμού για επίπεδα ενισχυμένα στοιχεία

2.4. Αντίσταση διατομών

2.4.1. Γενικά

Η τιμή σχεδιασμού για τα αποτελέσματα μιας δράσης σε κάθε διατομή δεν πρέπει να υπερβαίνει την αντίστοιχη αντοχή σχεδιασμού και εφόσον πολλά αποτελέσματα δράσεων ασκούνται ταυτόχρονα, το συνδυασμένο αποτέλεσμα δεν πρέπει να υπερβαίνει την αντίσταση για το συγκεκριμένο συνδυασμό. Οι επιρροές διατμητικής υστέρησης καθώς και του τοπικού λυγισμού πρέπει να λαμβάνονται υπόψη με ένα ενεργό πάχος. Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ισοδύναμο ενεργό πλάτος. Οι τιμές σχεδιασμού της αντίστασης εξαρτώνται από την κατάταξη της διατομής. Έλεγχος ελαστικής αντίστασης, μπορεί να εκτελείται για όλες τις κατηγορίες διατομών υπό την προϋπόθεση ότι για τον έλεγχο των διατομών κατηγορίας 4 χρησιμοποιούνται οι ενεργές ιδιότητες των διατομών.

Όσον αφορά στην αντίσταση μπορεί να χρησιμοποιείται το παρακάτω κριτήριο διαρροής, για ένα κρίσιμο σημείο της διατομής, εκτός εάν εφαρμόζεται άλλος τύπος αλληλεπίδρασης, που αναφέρεται στον ΕΚ 9, 6.2.7 έως 6.2.10.

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_o/\gamma_{M1}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_o/\gamma_{M1}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_o/\gamma_{M1}}\right)\left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_o/\gamma_{M1}}\right) + 3\left(\frac{\tau_{Ed}}{f_o/\gamma_{M1}}\right)^2 \leq C$$

$$\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_o/\gamma_{M1}} \leq 1, \quad \frac{\sigma_{z,Ed}}{f_o/\gamma_{M1}} \leq 1 \quad \text{και} \quad \frac{\sqrt{3}\tau_{Ed}}{f_o/\gamma_{M1}} \leq 1$$

όπου:

$\sigma_{x,Ed}$ είναι η τιμή σχεδιασμού της τοπικής διαμήκουσ τάσης στο υπό θεώρηση σημείο

$\sigma_{z,Ed}$ είναι η τιμή σχεδιασμού της τοπικής εγκάρσιας τάσης στο υπό θεώρηση σημείο

τ_{Ed} είναι η τιμή σχεδιασμού της τοπικής διατμητικής τάσης στο υπό θεώρηση σημείο

$C \geq 1$ είναι σταθερά, και ορίζεται στο Εθνικό Προσάρτημα στο κριτήριο 6.15. Ο ΕΚ 9 προτείνει την τιμή $C = 1,2$.

2.4.2. Ιδιότητες διατομών

Οι διατομές παρουσιάζουν διαφορετικές ιδιότητες, ανάλογα με την κατηγορία που κατατάσσονται. Υπάρχουν οι πιο κάτω δυο κατηγορίες:

- Πλήρης διατομές (A_g), όπου οι ιδιότητες πρέπει να καθορίζονται χρησιμοποιώντας τις ονομαστικές της διαστάσεις. Οι οπές των κοχλιώσεων, σύμφωνα με τον Ευροκώδικα 9, δεν χρειάζεται να αφαιρεθούν, αλλά πρέπει να γίνεται πρόβλεψη για μεγαλύτερα ανοίγματα και τα υλικά αποκατάστασης της συνέχειας δεν πρέπει να περιλαμβάνονται.
- Καθαρή διατομή (A_{net}) πρέπει να λαμβάνεται ως η ολική της επιφάνεια μείον τις κατάλληλες μειώσεις για όλες τις οπές, για άλλα ανοίγματα και για θερμικά επηρεασμένες ζώνες (ΘΕΖ). Αξίζει να σημειωθεί ότι, για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων της καθαρής διατομής, η μείωση για μία οπή κοχλία πρέπει να είναι η ολική επιφάνεια της οπής στο επίπεδο του άξονά της. Για οπές κοχλιών βυθισμένης κεφαλής θα πρέπει να γίνεται κατάλληλη πρόβλεψη για το βυθισμένο τμήμα. Ο ΕΚ 9 έρχεται να επισημάνει, ότι η συνολική επιφάνεια που θα αφαιρεθεί για οπές κοχλιών πρέπει να είναι το μέγιστο άθροισμα των επιφανειών των οπών σε κάθε διατομή κάθετη στον άξονα του μέλους, υπό την προϋπόθεση οι οπές των κοχλιών δεν έχουν διάταξη μορφής ζικ-ζακ.

Όπου οι οπές κοχλιών έχουν διάταξη μορφής ζικ-ζακ, η συνολική επιφάνεια που θα αφαιρεθεί για κοχλίες είναι η μεγαλύτερη από (βλέπε Σχήμα 2.5):

- a) τη μείωση για οπές που δεν έχουν διάταξη ζικ-ζακ όπως αναφέρθηκαν πιο πάνω,
- b) τη μείωση ίση με $\sum t d - \sum t b_s$ όπου b_s είναι το μικρότερο από

$$s^2/(4p) \quad \text{ή} \quad 0,65s$$

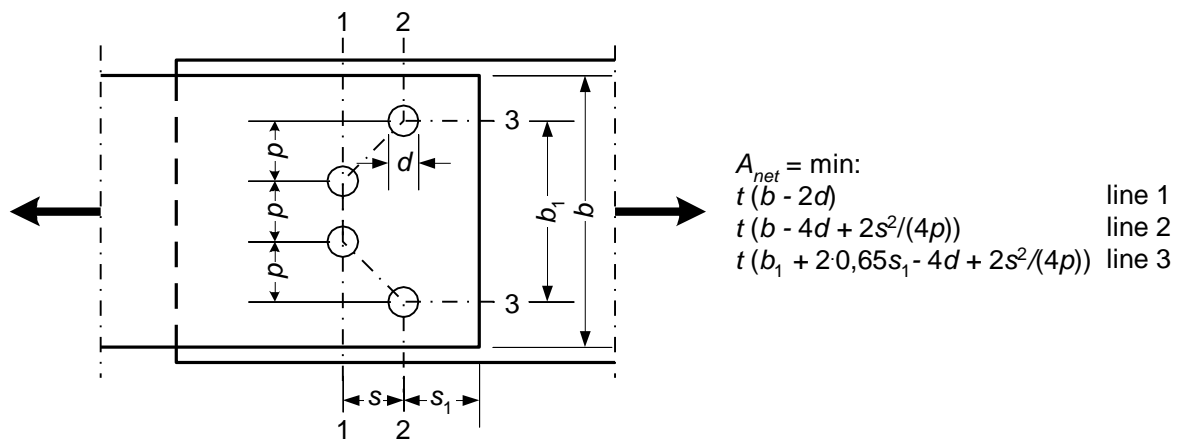
όπου:

d είναι η διάμετρος της οπής

s είναι στη διάταξη του ζικ-ζακ, η απόσταση των κέντρων δύο διαδοχικών οπών, μετρούμενη παράλληλα με τον άξονα του μέλους

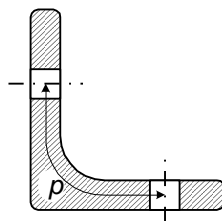
p είναι η απόσταση των κέντρων των δύο ίδιων οπών μετρούμενη κάθετα στον άξονα του μέλους

t είναι το πάχος (ή το ενεργό πάχος σε ένα μέλος που περιέχει υλικό ΘΕΖ).



Σχήμα 5: Οπές ζικ-ζακ και κρίσιμες γραμμές θραύσης 1, 2 και 3

Για γωνιακά ή άλλα μέλη με οπές σε περισσότερα από ένα επίπεδα, η απόσταση p θα πρέπει να μετράται κατά μήκος του μέσου άξονα του υλικού όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.



Σχήμα 6: Γωνιακά με οπές και στα δύο σκέλη

2.4.3. Εφελκυσμός

Η τιμή σχεδιασμού της εφελκυστικής δύναμης N_{Ed} πρέπει να ικανοποιεί την σχέση:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1,0$$

Στην περίπτωση που ένα μέλος υπόκειται σε εφελκυστική δύναμη μόνο, η αντίσταση που θα παρουσιάσει δίνεται ως η μικρότερη τιμή από τις τρεις πιο κάτω εκφράσεις:

- Γενική διαρροή κατά μήκος του μέλους: $N_{o,Rd} = A_g f_o / \gamma_{M1}$
- Τοπική αστοχία σε διατομή με οπές: $N_{u,Rd} = 0,9 A_{net} f_u / \gamma_{M2}$
- Τοπική αστοχία σε διατομή ΘΕΖ: $N_{u,Rd} = A_{eff} f_u / \gamma_{M2}$

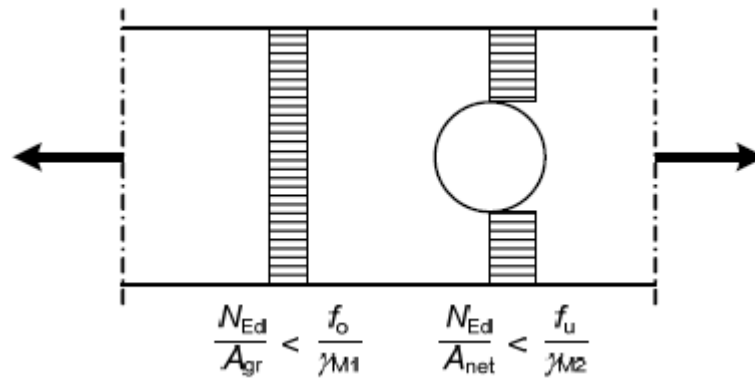
όπου:

A_g είναι είτε η πλήρης διατομή, είτε η μειωμένη διατομή για να ληφθεί υπόψη η εξασθένηση ΘΕΖ εξαιτίας της διαμήκουσ συγκόλλησης. Στην τελευταία περίπτωση η μειωμένη διατομή A_g υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας $\rho_{o,haz}$ φορές την επιφάνεια των ΘΕΖ.

A_{net} είναι η καθαρή διατομή, με μείωση για τις οπές και μείωση όπου απαιτείται για να ληφθεί υπόψη η επίδραση της εξασθένησης ΘΕΖ στην καθαρή διατομή διαμέσου της οπής. Η τελευταία αφαίρεση βασίζεται στο μειωμένο πάχος $\rho_{u,haz}$.

A_{eff} είναι η ενεργός διατομή βάση του μειωμένου πάχους $\rho_{u,haz}$.

Να σημειωθεί ότι η εκκεντρότητα λόγω της μετατόπισης των κεντρικών αξόνων των ασύμμετρων διατομών, μπορεί να αγνοηθεί (Ευρωκώδικας 9).



Σχήμα 7: Αντοχή διαμήκους και καθαρής διατομής.

Για γωνιακά που συνδέονται μέσω του ενός σκέλους τους, ο ΕΚ 9 δίνει περαιτέρω πληροφορίες στο υποκεφάλαιο 6.3.1.5, καθώς και για οπές τύπου ζικ-ζακ που δίνει πληροφορίες στο υποκεφάλαιο 6.2.2.2. Παρόμοια θεώρηση πρέπει να γίνεται επίσης σε άλλους τύπους διατομών που συνδέονται μέσω εξωτερικών στοιχείων τους, όπως διατομές μορφής T και U.

Καθώς τα εφελκόμενα μέλη δεν εκτίθενται σε λυγισμό, τότε μπορούν να είναι πολύ λεπτά. Προκειμένου όμως να αποφευχθούν κραδασμοί και εκτροπές από απρόβλεπτη εγκάρσια φόρτιση, τα εφελκόμενα μέλη δεν θα πρέπει να είναι πάρα πολύ λεπτά. Συχνά ένας περιορισμός που χρησιμοποιείται για τις κύριες κατασκευές είναι $L/i < 240$ και $L/i < 300$ για τις δευτεροβάθμιες κατασκευές, με εξαίρεση τα εφελκόμενα μέλη που είναι προεντεταμένα (Höglund, T., 2008)

2.4.4. Θλίψη

Η ενότητα αυτή περιορίζεται σε δομικά στοιχεία που υπόκεινται σε κεντρικά επιβαλλόμενα φορτία χωρίς να προκαλούν ροπή. Ένα υποστήλωμα αποτελεί βασικό στοιχείο για τις περισσότερες κατασκευές, καθώς η γνώση της συμπεριφοράς του είναι αναγκαία για την ερμηνεία και κατανόηση των απαιτήσεων των προδιαγραφών.

Το μήκος λυγισμού ενός υποστηλώματος μπορεί να οριστεί από το φορτίο λυγισμού ή το οριακό φορτίο. Όπως θα δούμε και πιο κάτω, ο τοπικός λυγισμός θα επηρεάσει την συνολική αντίσταση λυγισμού. Το φορτίο λυγισμού, που συχνά καλείται φορτίο λυγισμός κατά Euler (N_E) ή πλαστικό φορτίο λυγισμού (κρίσιμο φορτίο N_{cr}), μπορεί να οριστεί ως το φορτίο που υποθέτει μια εκτρεπόμενη θέση ενώ θεωρητικά βρίσκεται σε ευθεία γραμμή. Το οριακό φορτίο είναι το μέγιστο φορτίο που μπορεί να αντέξει ένα υποστήλωμα. Σηματοδοτεί το όριο

μεταξύ της σταθερής και της ασταθής θέσης παραμόρφωσης ενός υποστηλώματος που επιτυγχάνεται σταδιακά, σε αντίθεση με το φορτίο λυγισμού που είναι ένα ακαριαίο φαινόμενο.

Ο λυγισμός μπορεί να επέλθει μόνο για κεντρικά φορτία, ακριβώς στη διεύθυνση του υποστυλώματος. Ωστόσο, η αντοχή των δομικών στοιχείων, εξαρτάται κατά πόσο υπάρχουν ατέλειες, εκκεντρότητα του φορτίου, εγκάρσια φορτία, τοπικός λυγισμός, μη γραμμική καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων, παραμένουσες τάσεις ή ΘΕΖ. Οι περισσότερες δοκιμές σε υποστυλώματα δεν κατάφεραν να υπερκεράσουν τις επιπτώσεις των μεταβλητών, και έτσι η ζώνη διασποράς για καμπύλες υποστυλώματος είχαν αποτέλεσμα λόγω του μέγιστου φορτίου και όχι λόγω του φορτίου λυγισμού.

Η συνήθης διαδικασία για τον καθορισμό της καμπύλης του υποστυλώματος ήταν περίπου η ίδια με αυτή που ίσχυε πριν ογδόντα χρόνια. Η καμπύλη του υποστυλώματος λαμβανόταν ως η ευθεία η οποία προσαρμοζόταν καλύτερα ανάμεσα στα σημεία της δοκιμής, παρόλο που οι μοντέρνοι υπολογισμοί μπορούν να εξηγήσουν, σε πολλές περιπτώσεις, τη λεπτομερή συμπεριφορά εφόσον είναι γνωστές οι τέλειες.

Για να λάβουμε υπόψη τη μετατροπή της καμπύλης του υποστυλώματος μέσω της καμπύλης Euler στο όριο διαρροής, εμπλέκονται περισσότερο ή λιγότερο περίπλοκοι διορθωτικοί συντελεστές, χρησιμοποιώντας αρχικές εκκεντρότητες ή μη γραμμικές καμπύλες υλικών. Έχει αποδειχθεί ότι για υποθετική περίπτωση αντοχής, κεντρικά φορτισμένες, πακτωμένα υποστυλώματα, η μεταβαλλόμενη καμπύλη οφείλεται σε, πρώτα απ' όλα στην παρουσία παραμένουσων τάσεων στην διατομή. Εντούτοις, οι παραμένουσες τάσεις είναι μικρές σε διατομές που είναι , άλλες ατέλειες όπως μη γραμμικές καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων και θερμικά επηρεαζόμενων ζωνών είναι σημαντικές για υποστυλώματα από αλουμίνιο (Höglund, T., 2008).

Η τιμή σχεδιασμού της αξονικής θλιπτικής δύναμης N_{Ed} πρέπει να ικανοποιεί την σχέση:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0$$

Η αντοχή σχεδιασμού σε ομοιόμορφη θλίψη $N_{c,Rd}$ λαμβάνει την μικρότερη τιμή από τις $N_{u,Rd}$ και $N_{c,Rd}$ όπου :

- σε διατομές με μη πληρωμένες οπές: $N_{u,Rd} = A_{net} f_u / \gamma_{M2}$

➤ άλλες διατομές: $N_{c,Rd} = A_{eff} f_o / \gamma_{M1}$

στις οποίες:

A_{net} είναι η καθαρή διατομή, με μείωση της διατομής για τις μη πληρωμένες οπές και εξασθένηση ΘΕΖ εάν είναι αναγκαίο (περισσότερες πληροφορίες δίνονται στον κεφάλαιο 6.2.2.2 του ΕΚ 9). Για οπές που βρίσκονται σε περιοχές μειωμένου πάχους οι μειώσεις μπορούν να βασίζονται στο μειωμένο πάχος και όχι στο ολικό πάχος.

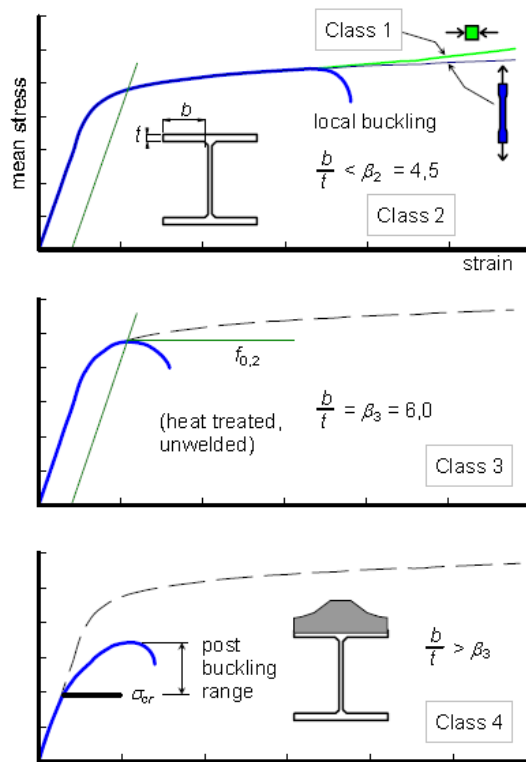
A_{eff} είναι η ενεργός διατομή βασιζόμενη σε μειωμένο πάχος λαμβάνοντας υπόψη τον τοπικό λυγισμό και την εξασθένηση στις θερμικά επηρεασμένες ζώνες, αλλά αγνοώντας τις μη πληρωμένες οπές.

2.4.5. Ροπή κάμψης

Σε αντίθεση με τον εφελκυσμό και την θλίψη, οι οποίες είναι αξονικές καταπονήσεις, η κάμψη είναι μία σύνθετη καταπόνηση στην οποία τα φορτία επιβάλλονται κάθετα στον κεντροβαρικό άξονα και δημιουργούν αφενός παραμορφώσεις (καμπύλωση) στην δοκό του δοκιμίου και αφετέρου επάγουν τάσεις στο εσωτερικό της δοκού (Κ.Λ. Βασιλείου, 2010).

2.4.5.1. Διαρροή και τοπικός λυγισμός

Η οριακή κατάσταση αστοχίας της δοκού μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους ανάλογα, με τη γεωμετρία της (το εύρος L , την αναλογία b / t των επιμέρους τμημάτων κλπ.), τη φόρτιση καθώς και το είδος της σύνεσης αλλά και της στήριξης. Η αστοχία είναι πιο συχνά συνδεδεμένη με το τοπικό λυγισμό των συμπιεσμένων μερών των διατομών. Εξαιρέσεις αποτελούν συμπαγής διατομές, όπως πλήρη ορθογωνικές και κυκλικές διατομές και στηρίξεις που αποτελούνται από υλικά με μικρή ολκιμότητα όπου η αστοχία μπορεί να επέλθει λόγω εφελκυσμού.



Σχήμα 8: Καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης θλιβόμενου πέλματος σε διατομές διαφορετικής κλάσης

2.4.5.2. Βασικές αρχές

Η τιμή σχεδιασμού της ροπής κάμψης M_{Ed} σε κάθε διατομή πρέπει να ικανοποιεί την σχέση:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1,0$$

Σε μια διατομή με οπές η σχεδιαστική τιμή της ροπής αντίστασης, M_{Rd} είναι η μικρότερη τιμή από $M_{u,Rd}$ και $M_{c,Rd}$, όπου $M_{u,Rd}$ είναι η σχεδιαστική τιμή σε εφελκυσμό του f_u/γ_{M2} για καθαρή διατομή και $M_{c,Rd}$ είναι η σχεδιαστική τιμή του ορίου διαρροής f_o/γ_{M1} χωρίς να ληφθούν υπόψη οι οπές. Σε περίπτωση που υπάρχει Θ.Ε.Ζ, πρέπει αυτή να λαμβάνεται υπόψη.

- $M_{u,Rd} = W_{net} f_u / \gamma_{M2}$ σε καθαρή διατομή
- $M_{c,Rd} = \alpha W_{el} f_o / \gamma_{M1}$ σε κάθε διατομή

όπου:

α είναι ο συντελεστής μορφής (βλέπε Πίνακα 4)

W_{el} είναι η ελαστική ροπή αντίστασης της πλήρους διατομής (βλέπε υποκεφάλαιο 6.2.5.2 του ΕΚ 9)

W_{net} είναι η ελαστική ροπή αντίστασης της καθαρής διατομής λαμβάνοντας υπόψη τις σπές και την εξασθένηση στις θερμικά επηρεασμένες ζώνες, σε περίπτωση που είναι συγκολλητή (βλέπε 6.2.5.2 του ΕΚ 9). Η τελευταία μείωση βασίζεται στο μειωμένο πάχος $\rho_{u,haz}t$.

Πίνακας 4: Τιμές του συντελεστή μορφής α

| Κατηγορία διατομής | Χωρίς συγκολλήσεις | Με διαμήκεις συγκολλήσεις |
|--------------------|--------------------|---------------------------|
| 1 | W_{pl} / W_{el} | $W_{pl,haz} / W_{el}$ |
| 2 | W_{pl} / W_{el} | $W_{pl,haz} / W_{el}$ |
| 3 | $\alpha_{3,u}$ | $\alpha_{3,w}$ |
| 4 | W_{eff} / W_{el} | $W_{eff,haz} / W_{el}$ |

Πηγή: Ευρωκώδικας 9

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι σχέσεις που δίνονται στον πιο πάνω πίνακα, είναι προς την συντηρητική τους πλευρά. Για πιο ακριβή αποτελέσματα / τιμές, δίνονται στο Παράρτημα F του ΕΚ.

Στον Πίνακα 4 οι διάφορες σταθερές διατομής W και $\alpha_{3,u}, \alpha_{3,w}$ ορίζονται ως:

- W_{pl} : πλαστική ροπή αντίστασης της πλήρους διατομής
- W_{eff} : ενεργός ελαστική ροπή αντίστασης, υπολογισμένη χρησιμοποιώντας μειωμένο πάχος t_{eff} για μέρη κατηγορίας 4.
- $W_{el,haz}$: ενεργός ελαστική ροπή αντίστασης της πλήρους διατομής, υπολογισμένη χρησιμοποιώντας μειωμένο πάχος $\rho_{o,haz}t$ για το υλικό ΘΕΖ.
- $W_{pl,haz}$: ενεργός πλαστική ροπή αντίστασης της πλήρους διατομής, υπολογισμένη χρησιμοποιώντας μειωμένο πάχος $\rho_{o,haz}t$ για το υλικό ΘΕΖ.
- $W_{eff,haz}$: ενεργός ελαστική ροπή αντίστασης, υπολογισμένη χρησιμοποιώντας μειωμένο πάχος $\rho_c t$ για τα στοιχεία κατηγορίας 4 ή μειωμένο πάχος $\rho_{o,haz}t$ για το υλικό ΘΕΖ, όποιο είναι μικρότερο.

$\alpha_{3,u} = 1$ ή εναλλακτικά λαμβάνεται ως εξής:

$$\alpha_{3,u} = \left[1 + \left(\frac{\beta_3 - \beta}{\beta_3 - \beta_2} \right) \left(\frac{W_{pl}}{W_{el}} - 1 \right) \right]$$

$\alpha_{3,w} = W_{el,haz} / W_{el}$ ή εναλλακτικά μπορεί να λαμβάνεται ως εξής:

$$\alpha_{3,w} = \left[\frac{W_{el,haz}}{W_{el}} + \left(\frac{\beta_3 - \beta}{\beta_3 - \beta_2} \right) \left(\frac{W_{pl,haz} - W_{el,haz}}{W_{el}} \right) \right]$$

όπου:

β είναι η παράμετρος λυγηρότητας για το πιο κρίσιμο στοιχείο στη διατομή

β_2 και β_3 είναι οι οριακές τιμές για το ίδιο στοιχείο σύμφωνα με τον Πίνακα 6.2.

Το κρίσιμο στοιχείο στη διατομή καθορίζεται από την μικρότερη τιμή των παραμέτρων β_2 / β_3 . Επιπλέον, θα πρέπει η αντοχή του μέλους να εξετασθεί σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό όπως προβλέπεται από τον ΕΚ 9, στο υποκεφάλαιο 6.3.2.

2.4.6. Τέμνουσα

Η τιμή σχεδιασμού της διατμητικής δύναμης V_{Ed} σε κάθε διατομή πρέπει να ικανοποιεί την σχέση:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} \leq 1,0$$

όπου:

V_{Rd} η διατμητική αντοχή σχεδιασμού της διατομής.

Για μη-λυγερές διατομές, $h_w / t_w < 39\varepsilon$, βλέπε 6.5.5(2)

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_o}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$

όπου A_v είναι η επιφάνεια διάτμησης ίση με:

a) Για διατομές που περιέχουν κορμούς διάτμησης

$$A_v = \sum_{i=1}^n \left[(h_w - \sum d)(t_w)_i - (1 - \rho_{o,haz}) b_{haz} (t_w)_i \right]$$

όπου:

h_w το ύψος του κορμού μεταξύ των πελμάτων

b_{haz} είναι το συνολικό ύψος του υλικού ΘΕΖ μεταξύ του καθαρού ύψους του κορμού μεταξύ των πελμάτων. Για διατομές χωρίς συγκολλήσεις, $\rho_{o,haz} = 1$. Εάν η ΘΕΖ εκτείνεται σε όλο το ύψος του κορμού $b_{haz} = h_w - \sum d$

t_w είναι το πάχος του κορμού

d είναι η διάμετρος των οπών κατά μήκος του επιπέδου διάτμησης

n ο αριθμός των κορμών

b) Για συμπαγή ράβδο και στρογγυλό σωλήνα

$$A_v = \eta_v A_e$$

όπου:

$\eta_v = 0,8$ για συμπαγή ράβδο

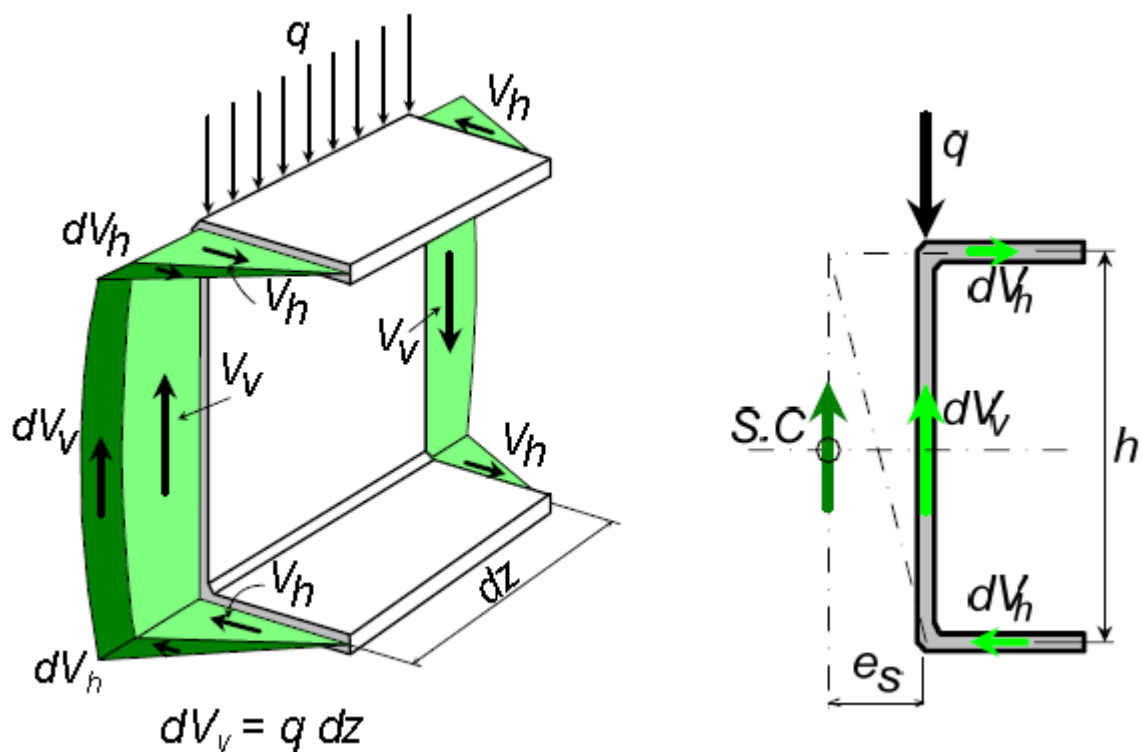
$\eta_v = 0,6$ για στρογγυλό σωλήνα

A_e είναι το εμβαδόν της πλήρους διατομής μίας μη συγκολλητής διατομής και το εμβαδόν της ενεργού διατομής που προκύπτει λαμβάνοντας μειωμένο πάχος $\rho_{o,haz}t$ για το υλικό ΘΕΖ μίας συγκολλητής διατομής (Ευρωκώδικας 9).

2.4.7. Στρέψη

2.4.7.1. Κέντρο διάτμησης

Οι διατομές αλουμινίου που προέρχονται από διέλαση συνήθως παίρνουν οποιοδήποτε σχήμα για να εξυπηρετούν διάφορες χρήσεις και σκοπούς. Για το λόγο αυτό συχνά περιπλέκουν τις διατομές τους, οι οποίες δεν είναι συμμετρικές. Το κέντρο διάτμησης (Κ.Δ.), σε αυτή την περίπτωση δεν συμπίπτει με το κέντρο βάρους (Κ.Β.). Αν τα κάθετα φορτία δρουν εκτός του κέντρου διάτμησης, τότε στην δοκό θα εφαρμοστεί μια στρεπτική ροπή. Στο Σχήμα 12 το κέντρο διάτμησης παρουσιάζεται έξω από το πλέγμα.



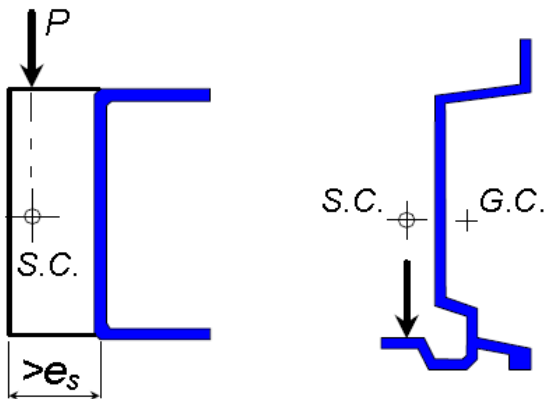
Σχήμα 9: Ροή και κέντρο διάτμησης.

Όταν ένα φορτίο εφαρμόζεται στην κορυφή της φλάντζας, η δοκός θα επιφορτιστεί με μια στρεπτική ροπή FEd όπου e_s είναι η απόσταση από το κέντρο διάτμησης μέχρι το κέντρο του πλέγματος.

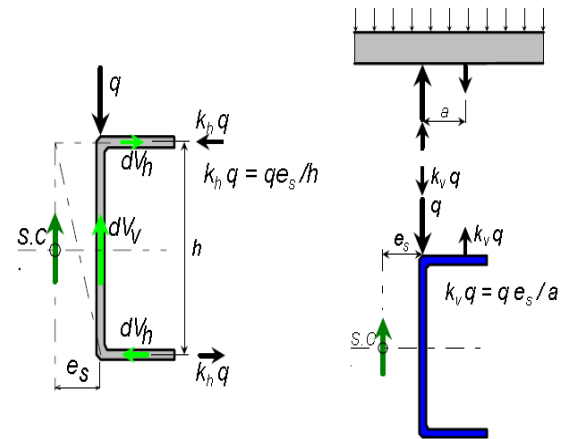
Για να αποφευχθεί η στρέψη ή να ελαττωθεί η πίεση που προέρχεται από την στρέψη, πρέπει (Σχήμα 17 και 18)

- η μετακίνηση του φορτίου πάνω στο κέντρο διάτμησης με πρόσθετες ενισχύσεις εκτός του πλέγματος.

- ο σχεδιασμός της δοκού να γίνει με τρόπο ώστε το φορτίο να δρα κάτω από το κέντρο διάτμησης.
- να προστεθεί πλάγια στήριξη στις φλάντζες. Bracing forces: $k_h \cdot q = qe_s/h$
- να συνδεθεί η δοκός με την πλάκα φόρτισης. Vertical forces : $k_v \cdot q = qe_s/a$
- να χρησιμοποιηθούν κοιλοδοκοί οι οποίοι έχουν πολύ μεγαλύτερη αντίσταση στην στρέψη παρά τις ανοιχτές διατομές. (Höglund, T., 2008)



Σχήμα 10: Σχεδιασμός για αποφυγή στρέψης



Σχήμα 11: Δυνάμεις για να εμποδιστεί η στρέψη

2.4.7.2. Μηχανισμοί Στρέψης

Στρέψη, όπως παρουσιάστηκε και πιο πάνω, δημιουργείται κατά την καταπόνηση δοκών από εγκάρσια φορτία μη διερχόμενα από το κέντρο διάτμησης της διατομής και λόγω επιβαλλόμενων στροφών. Οι μηχανισμοί παραλαβής της στρέψης είναι δυο, η ομοιόμορφη στρέψη ή στρέψη χωρίς στρέβλωση και η ανομοιόμορφη στρέψη ή στρέψη με στρέβλωση. Γενικότερα, όλοι οι μηχανισμοί της στρέψης πρέπει να ικανοποιούν το πιο κάτω κριτήριο όπως δίνεται από τον ΕΚ 9:

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd}} \leq 1,0$$

όπου T_{Ed} είναι η τιμή σχεδιασμού της στρεπτικής ροπής

- Στρέψη χωρίς στρέβλωση: Η αντίσταση στρέψης για ένα μέλος με ανοιχτή διατομή δίνεται από την σχέση:

$$T_{Rd} = W_{T,pl} \frac{f_o}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$

όπου $W_{T,pl}$ είναι η πλαστική στρεπτική ροπή αντίστασης (Höglund, T., 2008).

- Στρέψη με στρέβλωση: Η παρούσα πτυχιακή εργασία δεν θα ασχοληθεί καθόλου με το κεφάλαιο στρέψη με στρέβλωση. Περισσότερες πληροφορίες δίνονται στο Κεφάλαιο 6, υποκεφάλαιο 6.2.7.6 του ΕΚ 9.

2.4.8. Κάμψη και διάτμηση

Όταν υπάρχει διατμητική δύναμη πρέπει λαμβάνεται υπόψη η επιρροή της στη ροπή αντοχής. Όπου η διατμητική δύναμη V_{Ed} είναι μικρότερη από τη μισή διατμητική αντοχή V_{Rd} , η επίδρασή της στη ροπή αντοχής μπορεί να αγνοείται, εκτός από εκεί όπου ο λυγισμός λόγω τέμνουσας μειώνει την αντοχή της διατομής.

Διαφορετικά, η μειωμένη ροπή αντοχής πρέπει να λαμβάνεται ως η αντοχή σχεδιασμού της διατομής, υπολογιζόμενη χρησιμοποιώντας μειωμένη αντοχή διαρροής ίση με

$$f_{o,V} = f_o \left(1 - (2V_{Ed} / V_{Rd} - 1)^2 \right)$$

όπου V_{Rd} προκύπτει από το υποκεφάλαιο 6.2.6 του ΕΚ 9.

Στην περίπτωση διατομής μορφής I ίσου πέλματος που κατατάσσεται σε κατηγορία 1 ή 2 υπό κάμψη, η προκύπτουσα τιμή της μειωμένης ροπής αντοχής $M_{v,Rd}$ είναι:

$$M_{v,Rd} = t_f b_f (h - t_f) \frac{f_o}{\gamma_{M1}} + \frac{t_w h_w^2}{4} \frac{f_{o,V}}{\gamma_{M1}}$$

όπου h είναι το συνολικό ύψος της διατομής και h_w είναι το ύψος του κορμού μεταξύ εσωτερικών πελμάτων.

Στην περίπτωση διατομής μορφής I ίσου πέλματος που κατατάσσεται σε κατηγορία 3 υπό κάμψη, η προκύπτουσα τιμή της $M_{v,Rd}$ δίνεται από την έκφραση (6.39), αλλά με τον παρονομαστή 4 στο δεύτερο όρο να αντικαθίσταται με 6.

Για διατομές που κατατάσσονται σε κατηγορία 4 υπό κάμψη ή επηρεάζονται από εξασθένηση ΘΕΖ, βλέπε υποκεφάλαιο 6.7.6 του ΕΚ 9.

Όπου υπάρχει στρέψη η V_{Rd} αντικαθίσταται με $V_{T,Rd}$, αλλά $f_{o,V} = f_o$ για $V_{Ed} \leq 0,5V_{T,Rd}$.

Για την αλληλεπίδραση της κάμψης, της διατμητικής δύναμης και των εγκάρσιων φορτίων βλέπε υποκεφάλαιο 6.7.8 του ΕΚ 9 (Ευρωκώδικας 9).

2.4.9. Κάμψη και αξονική δύναμη

Ο έλεγχος διατομής επαρκεί για δοκούς – υποστηλώματα που υπόκεινται σε εφελκυσμό και κάμψη, εξαιρουμένου της περίπτωσης που η ροπή κάμψης μπορεί να προκαλέσει στρεπτικοκαμπτικό λυγισμό. Συνεπώς, τα λεπτά μέλη πρέπει να ελέγχονται για την αντοχή τους σε στρεπτικοκαμπτικό λυγισμό, αντιμετωπίζοντας την αξονική δύναμη και την ροπή κάμψης ως διανυσματικά μεγέθη. Τα μέλη υποβάλλονται σε συνδυασμό κάμψης και αξονικής δύναμης, έτσι ώστε να ικανοποιούν τις ενδείξεις για τις αντοχές των τμημάτων των δοκών. (Höglund, T., 2008)

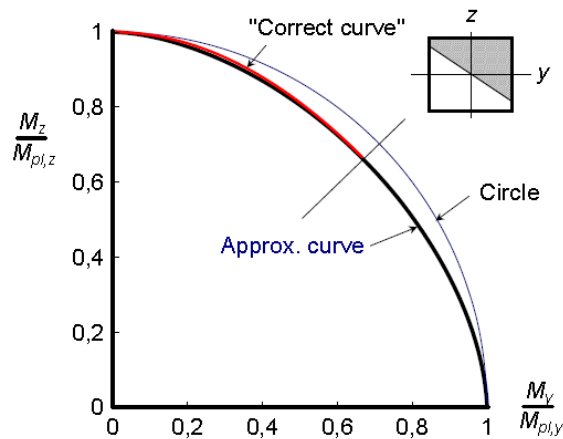
2.4.10. Αντοχή μελών των υποστηλωμάτων

Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί η αντοχή των μελών των υποστηλωμάτων, όταν υποβληθούν σε θλίψη σε συνδυασμό με διαξονική κάμψη. Θα ασχοληθούμε μόνο με κοντά υποστηλώματα, για τα οποία η επίδραση της ροπής κάμψης στις πλευρικές παραμορφώσεις είναι αμελητέα. Ως αποτέλεσμα, η μέγιστη αντοχή εμφανίζεται όταν το σύνολο της διατομής είναι πλήρως πλαστικό ή όταν ξεπεράσει το όριο διαρροής της ελαστοπλαστικής περιοχής του μαλακού χάλυβα ή όταν η μέγιστη αντοχή αποκτά μια προδιαγραφόμενη τιμή στην περίπτωση που υπάρχει hardening material όπως είναι το αλουμίνιο. Αυτό είναι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που παρουσιάζονται σε ότι αφορά την αντοχή των μελών. Material yielding or failure is the primary cause of the strength limit of the member. Μέθοδοι ανάλυσης οι οποίοι καθορίζουν το όριο αντοχής των μελών θα παρουσιαστούν πιο κάτω, με βάση τον Ευρωκώδικα 9. (Höglund, T., 2008)

2.4.10.1. Διαξονική κάμψη ορθογωνικής διατομής

Για μια ορθογωνική διατομή, προκύπτει η πιο κάτω μαθηματική σχέση, η οποία ισχύει για αξονική δύναμη ίση με το μηδέν.

Η περιγραφή του άνω μέρους (M_z / M_{PL} , $z > 2/3$) είναι:



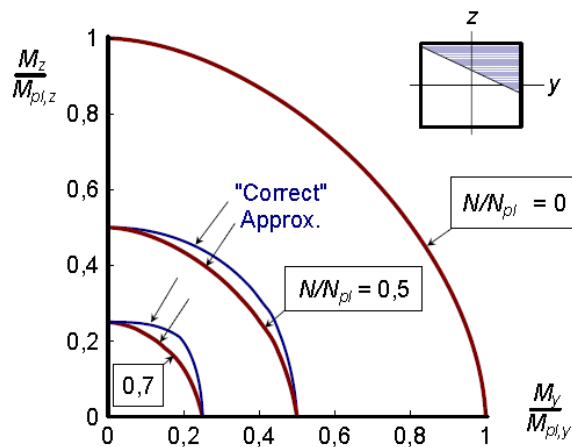
Σχήμα 12 Διαξονική κάμψη της δοκού με ορθογωνική διατομή για $N = 0$

$$\frac{M_z}{M_{pl,z}} + \frac{3}{4} \left[\frac{M_y}{M_{pl,y}} \right]^2 \leq 1,00$$

Για το άλλο μισό της καμπύλης, οι άξονες y και z αλλάζουν θέση. Η παρακάτω γραφική παράσταση είναι μια προσέγγιση για τον προσδιορισμό των τιμών των $M_z/M_{pl,z}$. Η διαφορά των αποτελεσμάτων μεταξύ των σχέσεων είναι μικρότερη από το 1%.

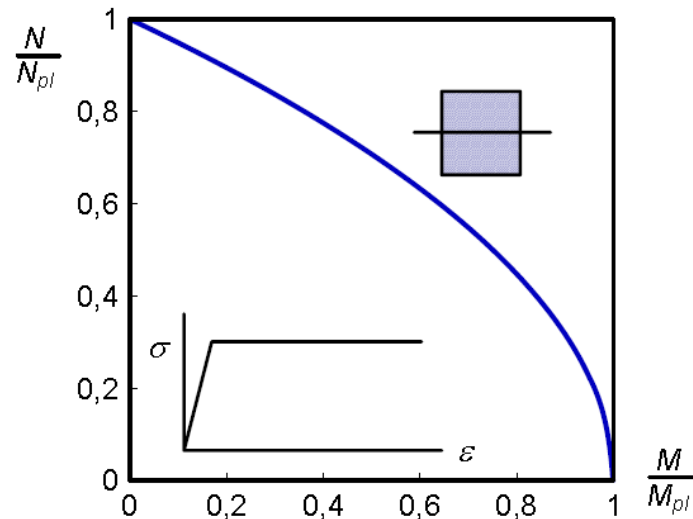
$$\left[\frac{M_y}{M_{pl,y}} \right]^{1,7} + \left[\frac{M_z}{M_{pl,z}} \right]^{1,7} \leq 1,00$$

Με την προσθήκη μιας αξονικής δύναμης, η σχέση απεικονίζεται από την “correct” καμπύλη στο Σχήμα 20.



Σχήμα 13. Καμπύλες αλληλεπίδρασης για ορθογωνικές δοκούς - υποστρώματα όταν υποβληθούν σε αξονική δύναμη και διαξονική κάμψη

Οι καμπύλες είναι κυρτές και η κυρτότητά τους αυξάνεται όσο αυξάνεται και η αξονική δύναμη. Η πιο κάτω εξίσωση αντιστοιχεί στις καμπύλες “approx.”, οι οποίες παρέχουν αποτελέσματα προς την ασφαλή πλευρά, εξαιρουμένων των περιπτώσεων όπου η $M_y=0$ και η $M_z=0$. Η πιο κάτω σχέση αντιστοιχεί στην παραβολή του Σχήματος 21.



Σχήμα 14: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης ορθογωνικής διατομής δομικά στοιχεία, ιδανικό για ελαστο - πλαστικά υλικά

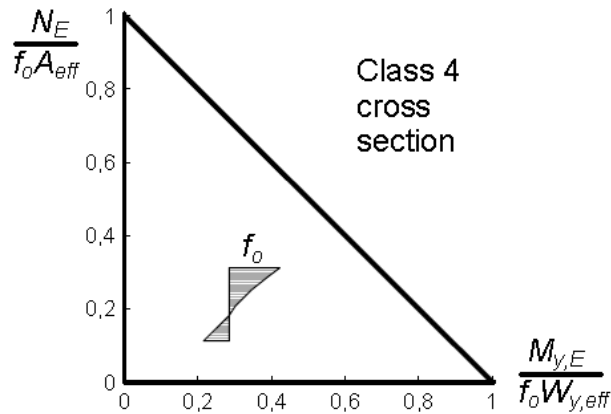
Μια βασική προϋπόθεση για τις κυρτές καμπύλες αλληλεπίδρασης είναι ότι η λυγηρότητα σε διάφορα τμήματα διατομών είναι τόσο μικρή που μπορούν να διαρρεύσουν σε θλίψη. Εάν η λυγηρότητα είναι μεγάλη, τότε η τελική αντίσταση είναι μειωμένη λόγω τοπικού λυγισμού (διατομή κατηγορίας 4), και ο συντελεστής $\alpha = W_{eff}/W_{el}$, όπου το W_{eff} είναι η μειωμένη ροπή αντίστασης, που έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση τοπικού λυγισμού. Οι παράγοντες που απαρτίζουν την εξίσωση για τις διατομές κλάσης 4 μπορούν να είναι μικρότεροι τις μονάδας, σε αντίθεση με τους εκθέτες που θα πρέπει να είναι μεγαλύτεροι της μονάδας (Höglund, T., 2008)

Για να μην επέλθει διαρροή πρέπει:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{eff} f_o} + \frac{M_{Ed}}{W_{eff} f_o} = 1$$

και τότε:

$$\sigma = \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} + \frac{M_{Ed}}{W_{eff}} = f_o$$



Σχήμα 15: Σχέση αλληλεπίδρασης για λεπτότοιχες διατομές

2.4.10.2. Κοίλες και συμπαγείς διατομές

Οι κοίλες και συμπαγείς διατομές πρέπει να ικανοποιούν το παρακάτω κριτήριο:

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\omega_0 N_{Rd}} \right)^\psi + \left[\left(\frac{M_{y,Ed}}{\omega_0 M_{y,Rd}} \right)^{1,7} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{\omega_0 M_{z,Rd}} \right)^{1,7} \right]^{0,6} \leq 1,00$$

όπου $\psi = 1,3$ για κοίλες διατομές και $\psi = 2$ για συμπαγείς διατομές. Εναλλακτικά, η ψ μπορεί να ληφθεί $\alpha_y \alpha_z$, αλλά ισχύει $1 \leq \psi \leq 1,3$ για κοίλες διατομές και $1 \leq \psi \leq 2$ για συμπαγείς διατομές.

2.4.10.3. Μέλη με τοπικές συγκολλήσεις

Η εν λόγω πτυχιακή εργασία δεν εξετάσει τα μέλη με τοπικές συγκολλήσεις. Περισσότερες πληροφορίες δίνονται στο Ευρωκωδικά 9, στο μέρος 1-1, κεφάλαιο 6, παράγραφος 6.2.9.3..

2.4.11. Κάμψη, διάτμηση και αξονική δύναμη

Όπου συνυπάρχουν τέμνουσα και αξονική δύναμη, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση τόσο της τέμνουσας όσο και της αξονικής δύναμης στη ροπή αντοχής.

Υπό την προϋπόθεση ότι η τιμή σχεδιασμού της διατμητικής δύναμης V_{Ed} δεν υπερβαίνει το 50% της αντοχής σε διάτμηση V_{Rd} δεν χρειάζεται να γίνει μείωση των αντοχών όπως ορίζεται για κάμψη και αξονική δύναμη στην 6.2.9 παράγραφο του ΕΚ, εκτός από περιπτώσεις όπου ο λυγισμός λόγω τέμνουσας μειώνει την αντοχή της διατομής (ΕΚ 9, μέρος 1-1, κεφάλαιο 6, παράγραφος 6.7.6).

Όπου η V_{Ed} υπερβαίνει το 50% της V_{Rd} , η αντοχή σχεδιασμού της διατομής στους συνδυασμούς της ροπής και της αξονικής δύναμης πρέπει να υπολογίζεται χρησιμοποιώντας μειωμένη αντοχή διαρροής

$$(1 - \rho) f_o$$

για την επιφάνεια διάτμησης όπου:

$$\rho = (2V_{Ed} / V_{Rd} - 1)^2$$

2.5. Αντοχή μελών σε λυγισμό

2.5.1. Θλιβόμενα μέλη

Μέλη υποκειμένα σε αξονική θλίψη μπορεί να αστοχήσουν με έναν από τους παρακάτω τρόπους:

- καμπτικός λυγισμός
- στρεπτικός ή στρεπτοκαμπτικός λυγισμός
- τοπική σύνθλιψη

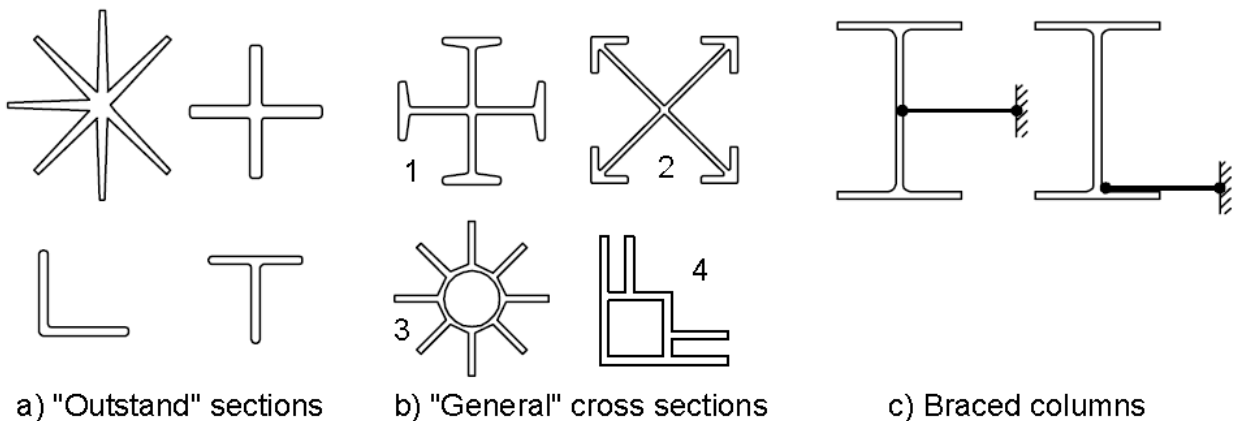
2.5.1.1. Καμπτικός και Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός.

Για μέλη με μικρή στρεπτική δυσκαμψία όπως γωνιές, ταυ και σταυροειδή τμήματα ο στρεπτικός λυγισμός πρέπει να ληφθεί υπό όψιν.

Η πιθανότητα για στρεπτικό λυγισμό μπορεί να αγνοηθεί για τα ακόλουθα:

- Τμήματα με κλειστά κουφώματα.
- Διπλά συμμετρικά τμήματα I, που να μην είναι στερεωμένα.
- Τμήματα που να αποτελούνται αποκλειστικά από εξωτερικά ακτινωτά τμήματα για παράδειγμα γωνιές, ταυ, σταυροειδή το οποία κατατάσσονται στην κατηγορία 1 των επιμήκη διατομών (cross section).

Για τμήματα όπως γωνιές, ταυ (T), σταυροειδή που αποτελούνται αποκλειστικά από εξωτερικά ακτινωτά τμήματα, ο τοπικός και στρεπτικός λυγισμός είναι στενά συνδεδεμένοι. Όταν μιλάμε για τον στρεπτικό λυγισμό τμημάτων που περιέχουν μη ενισχυμένα outstands πρέπει να δίνεται η ευκαιρία, όπου είναι εφικτό, για ύπαρξη ΘΕΖ υλικού όταν καθορίζεται το A_{eff} , αλλά καμία μείωση δεν πρέπει να γίνεται όσον αφορά τον τοπικό λυγισμό $p_c=1$ (Höglund, T., 2008).



Σχήμα 16: Διατομές όπου είναι επιρρεπείς στον τοπικό λυγισμό

Οι διατομές που έχουν ενισχυμένες προεξοχές, θα είναι κρίσιμες από την άποψη τοπικού λυγισμού, με αποτέλεσμα να πρέπει να θεωρηθούν "general" και να πρέπει να προσδιοριστή το A_{eff} .

Η παράμετρος λυγηρότητας λ_c δίνεται από:

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{f_o A}{N_{cr}}}$$

όπου,

N_{cr} , ελαστική κρίσιμη δύναμη για τον αντίστοιχο τρόπο λυγισμού βασιζόμενη στις ιδιότητες της πλήρους διατομής.

Ο αντίστοιχος έλεγχος που πρέπει να γίνει στην περίπτωση που ένα στοιχείο υπόκειται σε καμπτικό και στρεπτικό ή στρεπτοκαμπτικό λυγισμού είναι ο εξής:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$$

όπου:

N_{Ed} είναι η τιμή σχεδιασμού της θλιπτικής δύναμης

$N_{b,Rd}$ είναι η αντοχή σχεδιασμού λυγισμού του θλιβόμενου μέλους

Η αντοχή του θλιβόμενου μέλους σε λυγισμό $N_{b,Rd}$ λαμβάνεται ως:

$$N_{b,Rd} = \kappa \chi A_{eff} f_o / \gamma_{M1}$$

όπου:

χ είναι ο μειωτικός συντελεστής για την αντίστοιχη μορφή λυγισμού όπως δίνεται στην 6.3.1.2 του ΕΚ 9.

κ είναι ο συντελεστής για να ληφθεί υπόψη η εξασθένηση λόγω συγκολλήσεων. Στην περίπτωση μελών με διαμήκεις συγκολλήσεις κ δίνεται στον Πίνακα 6.5 (ΕΚ 9) για καμπτικό λυγισμό και $\kappa=1$ για στρεπτικό ή στρεπτοκαμπτικό λυγισμό. Στην

περίπτωση μελών με εγκάρσιες συγκολλήσεις $\kappa = \omega_x$ σύμφωνα με την 6.3.3.3 του ΕΚ 9.

A_{eff} είναι η ενεργός επιφάνεια για να ληφθεί υπόψη ο τοπικός λυγισμός για διατομές κατηγορίας 4. Για στρεπτικό και στρεπτοκαμπτικό λυγισμό βλέπε Πίνακα 6.7 του ΕΚ 9.

$A_{\text{eff}} = A$ για διατομές κατηγορίας 1, 2 ή 3

2.5.1.2. Καμπύλες λυγισμού

Σε μέλη υπό αξονική θλίψη, η τιμή του χ για την κατάλληλη ανοιγμένη λυγηρότητα $\bar{\lambda}$ πρέπει να καθορίζεται από την αντίστοιχη καμπύλη λυγισμού σύμφωνα με τη σχέση:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad \text{άλλα } \chi < 1,0$$

όπου:

$$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{\text{eff}} f_o}{N_{\text{cr}}}}$$

α είναι ο συντελεστής ατελειών

$\bar{\lambda}_0$ είναι το όριο του οριζόντιου κλάδου

N_{cr} είναι το ελαστικό κρίσιμο φορτίο για την αντίστοιχη μορφή λυγισμού βασισμένο στις ιδιότητες της πλήρους διατομής. Ο συντελεστής ατελειών α και το όριο του οριζόντιου κλάδου $\bar{\lambda}_0$ που αντιστοιχεί στην κατάλληλη καμπύλη λυγισμού προκύπτει από τον Πίνακα 5 για καμπτικό λυγισμό και από τον Πίνακα 6 για στρεπτικό ή στρεπτοκαμπτικό λυγισμό. Οι τιμές για τον μειωτικό συντελεστή χ για την κατάλληλη σχετική λυγηρότητα $\bar{\lambda}$ μπορούν να αποκτηθούν από το Σχήμα 28 για καμπτικό λυγισμό και από το Σχήμα 29 για στρεπτικό ή στρεπτοκαμπτικό λυγισμό.

Για λυγηρότητα $\bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_0$ ή $N_{Ed} \leq \bar{\lambda}_0^2 N_{cr}$ οι επιδράσεις λυγισμού μπορούν να αγνοηθούν και να εφαρμόζεται μόνο ο έλεγχος διατομής (Ευρωκώδικας 9)

Πίνακας 5: Τιμές του συντελεστή κ για μέλη με διαμήκεις συγκολλήσεις

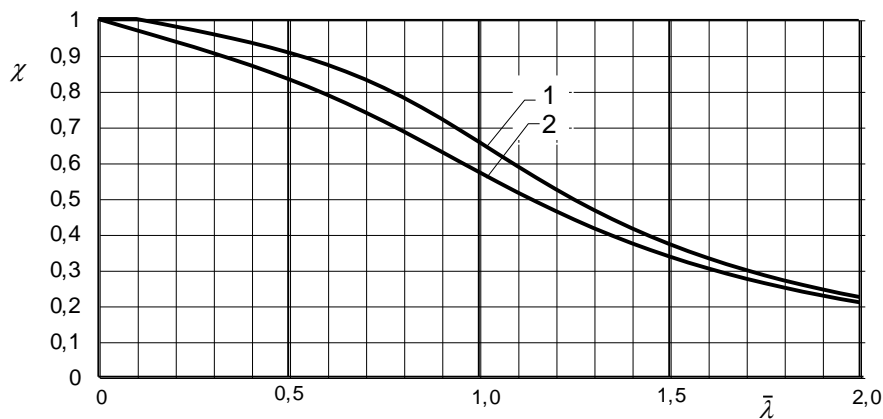
| Υλικό κατηγορίας A σύμφωνα με τον Πίνακα 3.2 | Υλικό κατηγορίας B σύμφωνα με τον Πίνακα 3.2 |
|--|--|
| $\kappa = 1 - \left(1 - \frac{A_1}{A}\right) 10^{-\bar{\lambda}} - \left(0,05 + 0,1 \frac{A_1}{A}\right) \bar{\lambda}^{-1,3(1-\bar{\lambda})}$ <p>με $A_1 = A - A_{haz}(1 - \rho_{a,haz})$ όπου A_{haz} = περιοχή ΘΕΖ</p> | $\kappa = 1 \text{ if } \bar{\lambda} \leq 0,2$ $\kappa = 1 + 0,04(4\bar{\lambda})^{(0,5-\bar{\lambda})} - 0,22\bar{\lambda}^{1,4(1-\bar{\lambda})}$ <p>αν $\bar{\lambda} > 0,2$</p> |

Πηγή: Ευρωκώδικας 9

Πίνακας 6: Τιμές των α και $\bar{\lambda}_0$ για καμπτικό λυγισμό

| Κατηγορία λυγισμού υλικού σύμφωνα με τον Πίνακα 3.2 | α | $\bar{\lambda}_0$ |
|---|----------|-------------------|
| Κατηγορία A | 0,20 | 0,10 |
| Κατηγορία B | 0,32 | 0,00 |

Πηγή: Ευρωκώδικας 9



- 1 Υλικό κατηγορίας A,
- 2 Υλικό κατηγορίας B

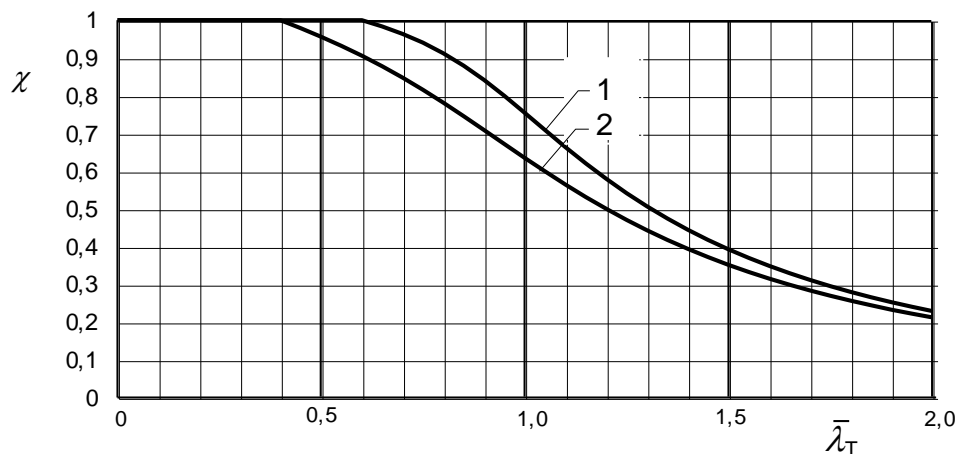
Σχήμα 17: Συντελεστής μείωσης χ για καμπτικό λυγισμό

Πίνακας 7: Τιμές των α , $\bar{\lambda}_0$ και A_{eff} για στρεπτικό και στρεπτοκαμπτικό λυγισμό

| Διατομή | α | $\bar{\lambda}_0$ | A_{eff} |
|---|----------|-------------------|--------------------------------|
| Γενικά ¹⁾ | 0,35 | 0,4 | A_{eff} ¹⁾ |
| Διατομές ακτινωτής μορφής ²⁾ | 0,20 | 0,6 | A ²⁾ |

- 1) Για διατομές που περιέχουν ενισχυμένα προεξέχοντα στοιχεία, τέτοια που ο τρόπος 1 θα ήταν κρίσιμος έναντι τοπικού λυγισμού (βλέπε 6.1.4.3(2) ΕΚ 9), το μέλος θεωρείται ως "γενικό" και το A_{eff} ορίζεται λαμβάνοντας υπόψη είτε τον τοπικό λυγισμό, είτε το υλικό ΘΕΖ ή και τα δύο μαζί.
- 2) Για διατομές όπως γωνιακά, μορφής ταυ, σταυροειδείς, ακτινωτής μορφής, ο τοπικός και στρεπτικός λυγισμός σχετίζονται στενά. Ορίζοντας την A_{eff} πρέπει να ληφθεί υπόψη, όπου είναι αναγκαίο, η παρουσία υλικού ΘΕΖ, αλλά χωρίς μείωση του τοπικού λυγισμού οπότε $\rho_c = 1$.

Πηγή: Ευρωκώδικας 9



1 Διατομές ακτινωτής μορφής,

2 Γενικές διατομές

Σχήμα 18: Συντελεστής μείωσης χ για στρεπτικό και στρεπτοκαμπτικό λυγισμό

2.5.1.3. Λυγηρότητα για καμπτικό λυγισμό

Η σχετική λυγηρότητα $\bar{\lambda}$ δίνεται από:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{\text{eff}} f_o}{N_{\text{cr}}}} = \frac{L_{\text{cr}}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{A_{\text{eff}} f_o}{A E}}$$

όπου:

L_{cr} είναι το μήκος λυγισμού στο επίπεδο λυγισμού που θεωρείται

i είναι η ακτίνα αδρανείας περί τον αντίστοιχο άξονα και προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας τα χαρακτηριστικά της πλήρους διατομής

Το μήκος λυγισμού L_{cr} θεωρείται ως kL , όπου L είναι το μήκος μεταξύ των σημείων πλευρικής στήριξης, όπου για μία θλιβόμενη ράβδο-πρόβολο, L είναι το μήκος του. Η τιμή του k , του συντελεστή μήκους λυγισμού για θλιβόμενες ράβδους, πρέπει να καθορίζεται μέσα από τις συνοριακές συνθήκες. Στον Πίνακα 8 παρέχονται οι αντίστοιχες οδηγίες (Ευρωκώδικας 9)

Πίνακας 8: Συντελεστής μήκους λυγισμού k για θλιβόμενες ράβδους

| Συνοριακές συνθήκες | k |
|--|------|
| 1. Δεσμευμένο κατά θέση και δεσμευμένο κατά διεύθυνση και στα δύο άκρα | 0,7 |
| 2. Δεσμευμένο κατά θέση και στα δύο άκρα και δεσμευμένο κατά διεύθυνση σε ένα άκρο | 0,85 |
| 3. Δεσμευμένο κατά θέση και στα δύο άκρα, αλλά μη δεσμευμένο κατά διεύθυνση | 1,0 |
| 4. Δεσμευμένο κατά θέση σε ένα άκρο και δεσμευμένο κατά διεύθυνση και στα δύο άκρα | 1,25 |
| 5. Δεσμευμένο κατά θέση και δεσμευμένο κατά διεύθυνση σε ένα άκρο και μερικώς δεσμευμένο κατά διεύθυνση αλλά μη δεσμευμένο κατά θέση στο άλλο άκρο | 1,5 |
| 6. Δεσμευμένο κατά θέση και δεσμευμένο κατά διεύθυνση στο ένα άκρο, αλλά μη δεσμευμένο κατά θέση στο άλλο άκρο | 2,0 |

Πηγή: Ευρωκώδικας 9

2.5.1.4. Λυγηρότητα για στρεπτικό και στρεπτοκαμπτικό λυγισμό

Για μέλη με ανοικτές διατομές πρέπει να ληφθεί υπόψη η πιθανότητα ότι η αντοχή του μέλους σε στρεπτικό ή στρεπτοκαμπτικό λυγισμό μπορεί να είναι μικρότερη από την αντοχή του σε καμπτικό λυγισμό. Η σχετική λυγηρότητα $\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_T$ για στρεπτικό και στρεπτοκαμπτικό λυγισμό πρέπει να λαμβάνεται ως:

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A_{\text{eff}} f_o}{N_{\text{cr}}}}$$

όπου:

A_{eff} είναι η διατομή σύμφωνα με τον Πίνακα 7.

N_{cr} είναι το ελαστικό κρίσιμο φορτίο για στρεπτικό λυγισμό, λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση με τον καμπτικό λυγισμό, όπου είναι απαραίτητο (στρεπτοκαμπτικός λυγισμός) (Ευρωκώδικας 9).

2.5.2. Μέλη υπό κάμψη

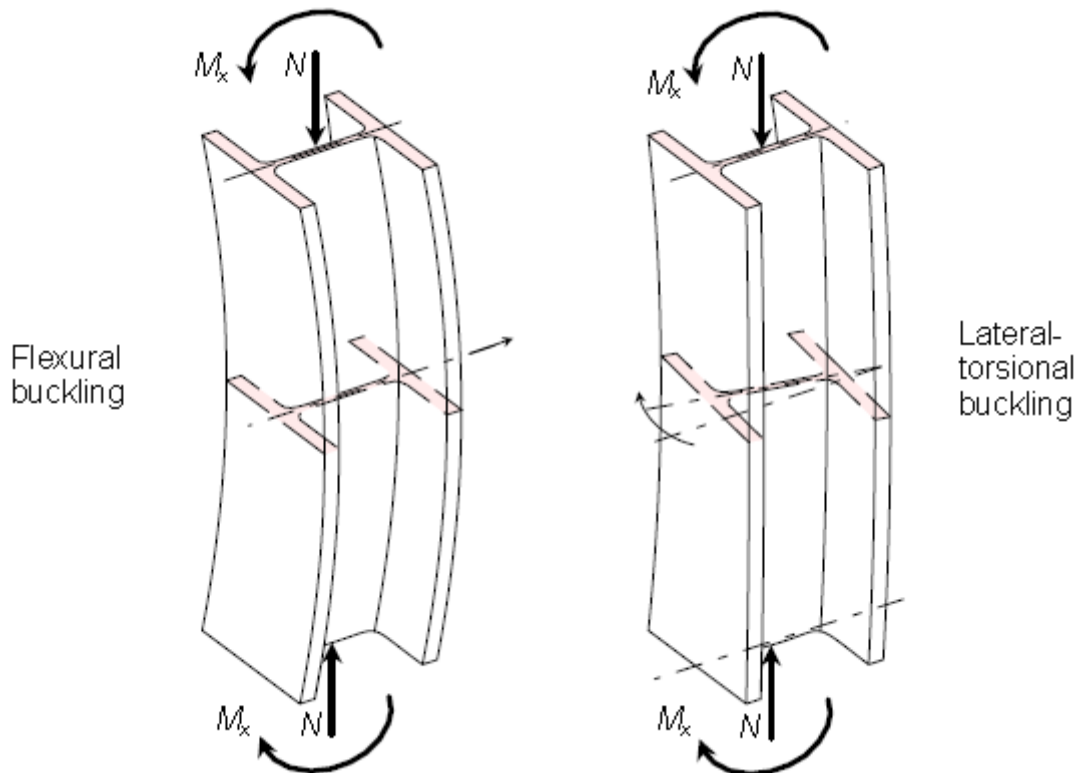
Όταν μιλάει κανείς για κάμψη, πρέπει να λάβει υπόψη του, τον τρόπο με τον οποίο φορτίζεται το δομικό στοιχείο (δοκός – υποστύλωμα), έτσι ώστε να μπορεί να καταλήξει σε ποια από τις παρακάτω περιπτώσεις ανήκει. Υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις, που δεν είναι αρκετά κατανοητό για το αν ένα υποστύλωμα αστόχησε λόγω κάμψης, είτε λόγω λυγισμού, είτε λόγω στρέψης. Η αλήθεια είναι ότι στις πλύστες των περιπτώσεων υπάρχει συνδυασμός τον πιο πάνω περιπτώσεων, με αποτέλεσμα να μην μπορεί κανείς να μιλήσει με βεβαιότητα για αστοχία που οφείλετε μόνο σε κάμψη.

Οι παρακάτω περιπτώσεις πρέπει να εξεταστούν:

- a) Κάμψη, με ενδεχόμενη συνυπάρχουσα διάτμηση
- b) Διάτμηση
- c) Φέρουσα ικανότητα κορμού
- d) Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός (Höglund, T., 2008)

2.5.2.1. Μέλη υπό κάμψη και αξονική θλίψη

Μια δοκός – υποστυλώμα που βρίσκεται σε θλίψη και κάμψη μπορεί να αστοχήσει από καμπτικό λυγισμό ή από στρεπτοκαμπτικό λυγισμό. Αυτές οι παραμορφώσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 29.



Σχήμα 19: Καμπτικός και στρεπτοκαμπτικός λυγισμός.

Η αντίσταση που παρουσιάζουν δοκοί – υποστυλώματα από αλουμίνιο, σε ότι αφορά καμπτικό και στρεπτοκαμπτικό λυγισμό, εξαρτάται από ένα αριθμό παραγόντων:

- η γεωμετρία, όπως το μήκος της δοκού – υποστυλώματος, το σχήμα της διατομής καθώς και οι συνοριακές συνθήκες.
- υλικά που σχετίζονται, όπως οι καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων, παραμένουσες τάσεις και θερμικά επηρεαζόμενες ζώνες.
- αρχικές ατέλειες
- συνθήκες φόρτισης (Höglund, T., 2008)

Σύμφωνα με τον ΕΚ 9, εάν εκτελείται ανάλυση δεύτερης τάξης χρησιμοποιώντας τις ατέλειες που δίνονται στην 5.3.2 του ΕΚ 9, η ευστάθεια μελών σταθερής διατομής διπλής συμμετρίας

που δεν είναι ευαίσθητη σε στρεπτικές παραμορφώσεις πρέπει να ελέγχεται σύμφωνα με τις παρακάτω παραγράφους, όπου διάκριση γίνεται μεταξύ:

- μελών που δεν είναι ευεπίφορα σε στρεπτικές παραμορφώσεις, π.χ. κοίλες κυκλικές διατομές ή διατομές όπου η στρέψη παρεμποδίζεται (μόνο καμπτικός λυγισμός)
- μελών που είναι ευεπίφορα σε στρεπτικές παραμορφώσεις, π.χ. μέλη με ανοικτές διατομές, στα οποία δεν παρεμποδίζεται η στρέψη (στρεπτοκαμπτικός (πλευρικός) λυγισμός ή καμπτικός λυγισμός)

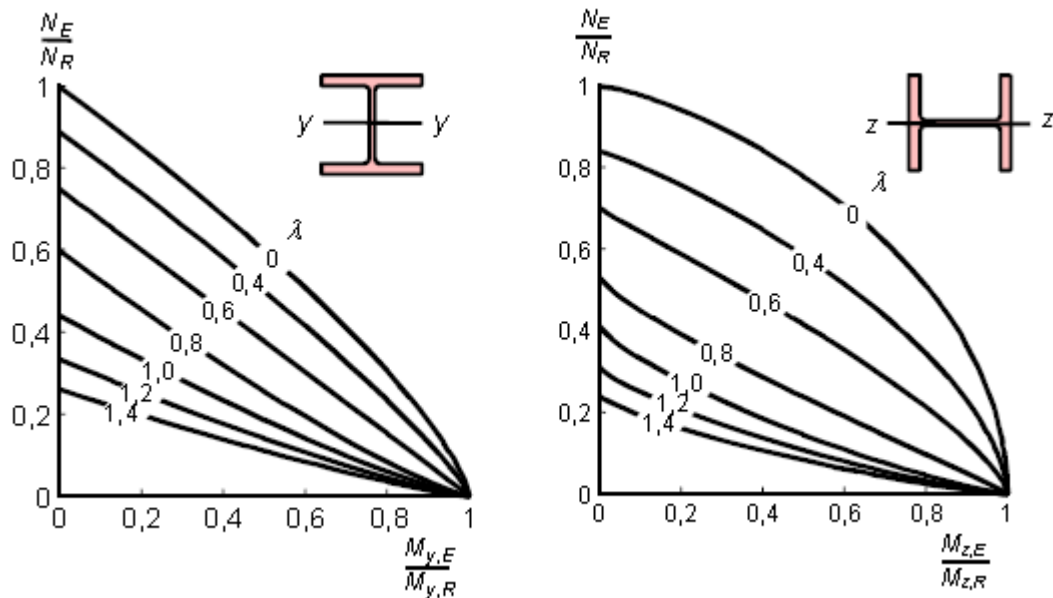
Οι έλεγχοι που πρέπει να διεξάγονται για μέλη που είναι ευεπίφορα σε στρεπτικές παραμορφώσεις είναι:

- καμπτικός λυγισμός
- στρεπτοκαμπτικός (πλευρικός) λυγισμός

Πιο κάτω αναφέρονται αναλυτικά οι έλεγχοι αυτοί, όπου για τον υπολογισμό των αντοχών N_{Rd} , $M_{y,Rd}$ και $M_{z,Rd}$ πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η εξασθένηση ΘΕΖ λόγω διαμήκη συγκολλήσεων (ΕΚ 9, 6.2.4 και 6.2.5). Η παρουσία τοπικών εξασθενήσεων ΘΕΖ από τις εγκάρσιες συγκολλήσεις και η παρουσία οπών πρέπει να αντιμετωπιστούν σύμφωνα με τις 6.3.3.3 και 6.3.3.4 αντίστοιχα του ΕΚ.

2.5.2.2. Καμπτικός λυγισμός

Τα αποτελέσματα της δευτερεύουσας ροπής, διαφοροποιούν την μορφή των καμπύλων αλληλεπίδρασης, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 20.



Σχήμα 20: Διαγράμμα αλληλεπίδρασης της κάμψης σε δοκού – υποστηλώματος Η στους άξονες z και y.

Για δοκούς, υποστηλώματα με μικρές παράμετρος λυγηρότητας, οι δευτερεύουσες ροπές είναι μικρές με αποτέλεσμα οι καμπύλες να μην παρουσιάζουν καμία αλλαγή από τις τυπικές καμπύλες αλληλεπίδρασης. Με την αύξηση του λόγου λυγηρότητας, kL/i , οι καμπύλες αρχίζουν να εκτρέπονται προς τα κάτω, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται κοίλες καμπύλες για πολύ μεγάλους λόγους. Αυτή η συμπεριφορά, για μεγάλους λόγους λυγηρότητας, επιτυγχάνεται με την μείωση των εκθετών που αποτελούν τις εξισώσεις αλληλεπίδρασης για τα τμήματα των δοκών – υποστηλωμάτων. Αυτό, με την σειρά του, πραγματοποιείται όταν οι εκθέτες, των εξισώσεων για τον καμπτικό λυγισμό των αξονικά θλιβόμενων μελών, πολλαπλασιαστούν με ένα μειωτικό συντελεστή χ . Οι προκύπτουσες εκφράσεις είναι οι εξής:

- Για κάμψη περί τον ισχυρό άξονα (y-άξονα):

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\chi_y \omega_x N_{Rd}} \right)^{\xi_{yc}} + \frac{M_{y,Ed}}{\omega_0 M_{y,Rd}} \leq 1,00$$

- Για κάμψη περί τον ασθενή άξονα (z-άξονα):

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\chi_z \omega_x N_{Rd}} \right)^{\eta_c} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{\omega_0 M_{z,Rd}} \right)^{\xi_{zc}} \leq 1,00$$

όπου:

$$\eta_c = 0,8 \text{ ή εναλλακτικά ίσο με } \eta_c = \eta_0 \chi_z \text{ αλλά } \eta_c \geq 0,8$$

$$\xi_{yc} = 0,8 \text{ ή εναλλακτικά ίσο με } \xi_{yc} = \xi_0 \chi_y \text{ αλλά } \xi_{yc} \geq 0,8$$

$$\xi_{zc} = 0,8 \text{ ή εναλλακτικά ίσο με } \xi_{zc} = \xi_0 \chi_z \text{ αλλά } \xi_{zc} \geq 0,8$$

η_0 και ξ_0 είναι σύμφωνα με την 6.2.9.1 του ΕΚ 9.

$\omega_x = \omega_0 = 1$ για δοκούς-υποστυλώματα χωρίς τοπικές συγκολλήσεις και με ίσες ροπές στα άκρα. Αλλιώς, βλέπε 6.3.3.3 και 6.3.3.4, του ΕΚ 9 αντίστοιχα.

Σημειώνεται ότι αυτές οι εξισώσεις είναι ίδιες με τις εξισώσεις στη παράγραφο 2.2.10.2. της παρούσας πτυχιακής, εκτός από το γεγονός ότι στις δυο πιο πάνω εξισώσεις προστέθηκε στον παρονομαστή το χ_y και το χ_z αντίστοιχα. Αυτό σημαίνει ότι οι παρονομαστές (των δυο εξισώσεων) είναι ίσοι με την αντίσταση τοπικού λυγισμού για το αξονικά θλιβόμενο υποστύλωμα στα επίπεδα x-z και x-y αντίστοιχα. Επιπλέον, ο όρος $M_{y,Ed}/M_{y,Rd}$ στην δεύτερη εξίσωση αλληλεπίδρασης της παραγράφου 2.2.10.2, διαγράφεται και ο καμπτικός λυγισμός λαμβάνεται υπόψη μόνο στο επίπεδο x-y.

- Για συμπαγείς διατομές χρησιμοποιείται το κριτήριο, για κάμψη περί τον ασθενή άξονα (z-άξονα), με τους εκθέτες ίσους με 0,8 ή

$$\eta_c = 2\chi \text{ αλλά } \eta_c \geq 0,8$$

$$\xi_c = 1,56\chi \text{ αλλά } \xi_c \geq 0,8$$

- Οι κοίλες διατομές και σωλήνες πρέπει να ικανοποιούν το παρακάτω κριτήριο:

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\chi_{\min} \omega_x N_{Rd}} \right)^{\psi_c} + \frac{1}{\omega_0} \left[\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \right)^{1,7} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \right)^{1,7} \right]^{0,6} \leq 1,00$$

όπου $\psi_c = 0,8$ ή εναλλακτικά μπορεί να είναι ίσο με $1,3\chi_y$ ή $1,3\chi_z$ εξαρτώμενο από τη διεύθυνση του λυγισμού, αλλά $\psi_c \geq 0,8$. $\chi_{\min} = \min(\chi_y, \chi_z)$

- Για άλλες διατομές απλής συμμετρίας, και κάμψη περί οποιονδήποτε άξονα, μπορεί να χρησιμοποιείται η σχέση για κάμψη περί τον ισχυρό άξονα (y-άξονα), όπου οι $\xi_{yc}, M_{y,Ed}, M_{y,Rd}$ και χ_y αντικαθίστανται με $\xi_{zc}, M_{z,Ed}, M_{z,Rd}$ και χ_z

Οι συμβολισμοί στα πιο πάνω κριτήρια - εξισώσεις είναι:

N_{Ed} είναι η τιμή σχεδιασμού της αξονικής θλιπτικής δύναμης

$M_{y,Ed}, M_{z,Ed}$ είναι οι τιμές σχεδιασμού της ροπής κάμψης περί τον y- και z-άξονα. Οι ροπές υπολογίζονται σύμφωνα με τη θεωρία πρώτης τάξης

$N_{Rd} = \kappa A f_o / \gamma_{M1}$ or $\kappa A_{eff} f_o / \gamma_{M1}$ για διατομές κατηγορίας 4 (περισσότερες πληροφορίες αναγράφονται στον ΕΚ 9, 6.3.1).

χ_y και χ_z είναι οι μειωτικοί συντελεστές για λυγισμό στο επίπεδο z-x και στο επίπεδο y-x αντίστοιχα

$M_{y,Rd} = \alpha_y W_y f_o / \gamma_{M1}$ αντοχή σε ροπή κάμψης περί τον άξονα y

$M_{z,Rd} = \alpha_z W_z f_o / \gamma_{M1}$ αντοχή σε ροπή κάμψης περί τον άξονα z

α_y, α_z είναι οι συντελεστές μορφής, αλλά α_y και α_z δεν πρέπει να λαμβάνονται μεγαλύτεροι από 1,25 (περισσότερες πληροφορίες δίνονται στον ΕΚ 9, 6.2.5 και 6.2.9.1(1)) (Höglund, T., 2008).

3. Πειραματική και Θεωρητική προσέγγιση αλουμινίου

3.1. Αλουμίνιο σε κάμψη

Μέσα από το ευρύ φάσμα εφαρμογών που έχει το αλουμίνιο, παρατηρείται η έκθεσή του σε διάφορες οριακές καταστάσεις αστοχία που αναφέρθηκαν πιο πάνω, όπως π.χ. ο εφελκυσμός, η θλίψη, η κάμψη, ο λυγισμός κτλ.

Η κάμψη, αποτελεί μια από τις πιο βασικές μορφές αστοχίας που «ταλαιπωρεί» το αλουμίνιο, όταν αυτό χρησιμοποιείται. Ακόμη και τα υποστυλώματα, που υποφέρουν από αστοχία λόγω λυγισμού, πολλές φορές παρουσιάζουν προβλήματα λόγω αστοχίας σε κάμψη. Εργοστάσια, διαφόρων χρήσεων γήπεδα και γενικότερα κατασκευές με μεγάλα ανοίγματα (κατασκευασμένα με αλουμίνιο), υποβάλλουν το αλουμίνιο σε μια τέτοια οριακή κατάσταση (κάμψη).

Μια δοκός που στηρίζεται σε δυο υποστυλώματα για παράδειγμα, αναπτύσσει εντατικά μεγέθη όπως είναι η κάμψη. Έτσι, έγινε προσπάθεια προσομοίωσης αυτής της κατάστασης μέσω πειραματικής διαδικασίας, έτσι ώστε να διαπιστωθεί ο τρόπος αντίδρασης του αλουμινίου, όταν υπόκειται σε κάμψη.

3.2. Μέλη υπό κάμψη

Σύμφωνα με τα πιο πάνω, δεν θα μπορούσε να αφήσει κανένα αδιάφορο ο έλεγχος των μελών του αλουμινίου σε κάμψη, αφού αποτελεί ένα από τα πιο συνήθη και σοβαρά εντατικά μεγέθη που το ταλαιπωρούν. Τοποθετώντας, κοιλοδοκούς διαφόρων διαστάσεων πάνω στις δυο στηρίξεις που έφερε η μηχανή κάμψης «CONTROLS, 50-C1400/*-50-C1401/*», υποβάλλονταν σε διαφόρων ειδών φορτίσεις.

Οι κοιλοδοκοί που χρησιμοποιήθηκαν είχαν διαστάσεις 50x50x2, 80x80x4, 100x100x2, 100x100x4 και υποβλήθηκαν σε αντοχή θραύσης δοκιμίου. Το μηχάνημα (βλέπε Παράρτημα 1) στο οποίο υποβλήθηκαν τα δοκίμια, είχε δυο ειδών διατάξεις φόρτισης, οι οποίες παρουσιάζονται στο Παράρτημα 2.

Ανάλογα με την διάταξη φόρτισης που, υποβαλλόταν το κάθε δοκίμιο, υπολογιζόταν για το κάθε ένα η μέγιστη ροπή κάμψης, αφού το μοντέλο μηχανής «CONTROLS, 50-C1400/*-50-C1401/*», έδινε την δύναμη στην οποία παρουσιαζόταν θραύση. Η μέγιστη πειραματική τιμή

ροπή κάμψης για επιβολή ενός φορτίου ($M_{\max1}$) και δυο φορτίων ($M_{\max2}$) έκκεντρα των δοκιμίων αντίστοιχα, παρουσιάζονται πιο κάτω.

$$M_{\max1} = (F \cdot L) / 4$$

και

$$M_{\max2} = F \cdot \alpha$$

Με τον τρόπο αυτό, υπολογίστηκε η μέγιστη πειραματική ροπή κάμψης για κάθε δοκίμιο.

Η πειραματική ροπή κάμψης του κάθε δοκιμίου, συγκρίθηκε με την ροπή που έδινε ο ΕΚ 9 μέσα από τις εξισώσεις:

$$M_{u,Rd} = W_{net} \cdot f_u / \gamma_{M2} \quad \text{σε καθαρή διατομή και}$$

$$M_{c,Rd} = \alpha W_{el} \cdot f_o / \gamma_{M1} \quad \text{σε κάθε διατομή}$$

όπου:

$M_{u,Rd}$ = αντίσταση σχεδιασμού σε κάμψη της καθαρής διατομής

$M_{c,Rd}$ = αντίσταση σχεδιασμού κάμψης σε κάθε διατομή

α = συντελεστής μορφής, ο οποίος καθορίζεται ανάλογα με την κατάταξη διατομών σε κλάσης

W_{net} = ελαστική ροπή αντίστασης της καθαρής διατομής λαμβάνοντας υπόψη τις οπές και την εξασθένηση ΘΕΖ, εάν είναι συγκολλητή.

W_{el} = ελαστική ροπή αντίστασης της πλήρους διατομής

f_u = χαρακτηριστική τιμή της εφελκυστικής αντοχής θραύσης

f_o = χαρακτηριστική τιμή του συμβατικού ορίου διαρροής 0.2 %

γ_{M1} = επιμέρους συντελεστής αντοχής διατομών ανεξαρτήτως κατηγορίας

γ_{M2} = επιμέρους συντελεστής αντοχής διατομών σε εφελκυσμό μέχρι τη θραύση

Η εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της θεωρητικής ροπής κάμψης είναι η (2), αφού το μοντέλο μηχανής κάμψης «CONTROLS, 50-C1400/*-50-C1401/*», έδινε την δύναμη που προκαλούσε θραύση στα δοκίμια..

Με τον τρόπο αυτό, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων της θεωρητικής με την πειραματική τιμή ροπής κάμψης για κάθε διατομή.

3.2.1. Γενικά

Οι διαστάσεις των διατομών που θα χρησιμοποιηθούν είναι οι ακόλουθες:

Πίνακας 9: Διαστάσεις διατομών και αριθμός τεμαχίων

| Αριθμός τεμαχίων | Διαστάσεις Διατομής |
|------------------|---------------------|
| 6 | 50x50x2 |
| 4 | 80x80x4 |
| 4 | 100x100x2 |
| 6 | 100x100x4 |

Το μοντέλο μηχανής κάμψης «CONTROLS, 50-C1400/*-50-C1401/*» μπορεί να επιβάλει κάθετο φορτίο στο κέντρο μιας δοκού ή ακόμη και δυο φορτία έκκεντρα δεξιά και αριστερά από το κέντρο της δοκού όπως παρουσιάζεται στο Παράρτημα 2. Το άνοιγμα της δοκού μπορεί να καθοριστεί από το κάθε χρήστη, ανάλογα με τις απαιτήσεις που θέτει και θέλει να πετύχει. Για την συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία, η διεξαγωγή των πειραμάτων έγινε με 60 cm άνοιγμα.

3.2.1.1. Ταξινόμηση διατομών σε κλάση

Αρχικά θα πρέπει να γίνει κατάταξη των διατομών σε κλάσεις. Ο ρόλος της ταξινόμησης των διατομών είναι να αναγνωρίσει την έκταση στην οποία η αντίσταση και η στρωφική ικανότητα των διατομών περιορίζονται από την αντίστασή τους σε τοπικό λυγισμό (ΕΚ 9).

Από το Σχήμα 6.1 του ΕΚ 9, αποφασίστηκε σε τι είδους στοιχεία διατομής έχουμε. Οι διατομές που θα χρησιμοποιηθούν είναι τετραγωνικές και σύμφωνα με το Σχήμα 6.1, τα στοιχεία τους είναι μη ενισχυμένα.

Η ευπάθεια ενός μη ενισχυμένου επίπεδου στοιχείου σε τοπικό λυγισμό καθορίζεται από την παράμετρο β , που έχει τις παρακάτω τιμές:

- a. επίπεδα εσωτερικά στοιχεία χωρίς μεταβολή τάσεων ή επίπεδα προεξέχοντα στοιχεία χωρίς μεταβολή τάσεων ή μέγιστη θλίψη στο άκρο $\beta = b/t$
- β. εσωτερικά στοιχεία με μεταβολή τάσεων που έχει ως αποτέλεσμα τον ουδέτερο άξονα στο κέντρο $\beta = 0,40 b/t$
- c. εσωτερικά στοιχεία με μεταβολή τάσεων και προεξέχοντα με μέγιστη θλίψη στη ρίζα $\beta = n b/t$

όπου:

b είναι το πλάτος του στοιχείου της διατομής

t είναι το πάχος της διατομής

n είναι ο συντελεστής μεταβολής τάσεων που δίνεται από τις σχέσεις:

$$n = 0,70 + 0,30\psi \quad (1 \geq \psi \geq -1),$$

$$n = 0,80/(1 - \psi) \quad (\psi < -1), \text{ βλέπε Σχήμα 6.2, ΕΚ 9}$$

όπου

ψ είναι ο λόγος των τάσεων στα άκρα του ελάσματος υπό εξέταση σχετικά με την μέγιστη θλιπτική τάση. Γενικά, ο ουδέτερος άξονας πρέπει να είναι ο ελαστικός ουδέτερος άξονας, αλλά στον έλεγχο αν η διατομή είναι κατηγορίας 1 ή 2 είναι επιτρεπτή η χρήση του πλαστικού ουδέτερου άξονα.

Οι διατομές ανήκουν στην περίπτωση α , και επομένως η παράμετρος β είναι ίση με:

$$\beta = b/t$$

Με την χρήση της πιο πάνω εξίσωση, υπολογίστηκε η παράμετρος β για κάθε διατομή όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 10.

Πίνακας 10: Υπολογισμός παραμέτρου β

| Διαστάσεις Διατομής | Πάχος Διατομής t | Πλάτος b | Υπολογισμός β |
|---------------------|--------------------|------------|---------------------|
| 50x50x2 | 2 | 46 | 23 |
| 80x80x4 | 4 | 72 | 18 |
| 100x100x2 | 2 | 96 | 48 |
| 100x100x4 | 4 | 92 | 23 |

Για να γίνει κατάταξη των διατομών σε κλάσεις θα πρέπει:

Στοιχεία σε δοκούς

$$\beta \leq \beta_1 : \text{κατηγορία 1}$$

$$\beta_1 < \beta \leq \beta_2 : \text{κατηγορία 2}$$

$$\beta_2 < \beta \leq \beta_3 : \text{κατηγορία 3}$$

$$\beta_3 < \beta : \text{κατηγορία 4}$$

Στοιχεία σε θλιβόμενες ράβδους

$$\beta \leq \beta_2 : \text{κατηγορία 1 or 2}$$

$$\beta_2 < \beta \leq \beta_3 : \text{κατηγορία 3}$$

$$\beta_3 < \beta : \text{κατηγορία 4}$$

Οι τιμές των παραμέτρων β_1 , β_2 και β_3 υπολογίζονται από τον Πίνακα 11.

Πίνακας 11: Τιμές παραμέτρων λυγηρότητας β_1 , β_2 και β_3

| Ταξινόμηση υλικού σύμφωνα με τον Πίνακα 3.2 | Εσωτερικό στοιχείο | | |
|---|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | β_1 / ε | β_2 / ε | β_3 / ε |
| Κατηγορία A, χωρίς | 11 | 16 | 22 |
| Κατηγορία A, με συγκολλήσεις | 9 | 13 | 18 |
| Κατηγορία B, χωρίς | 13 | 16,5 | 18 |
| Κατηγορία B, με συγκολλήσεις | 10 | 13,5 | 15 |
| $\varepsilon = \sqrt{250/f_0}$, f_0 in N/mm ² | | | |

Πηγή: Ευρωκώδικας 9

Η παράμετρος f_0 , σύμφωνα με τον Πίνακα 12, είναι ίση με 190. Επομένως, η τιμή ε υπολογίζεται ως εξής:

$$\varepsilon = \sqrt{250/f_o} = \sqrt{250/190} = 1.15$$

Όλες οι διατομές είναι κατηγορίας αλουμινίου «ALLOY 6063», T6, πάχους $t < 20$, $f_o = 190$, και $f_u = 220$. Με τα στοιχεία αυτά, ανατρέχοντας στον Πίνακα 3.2b του ΕΚ 9 προκύπτει η ταξινόμηση του υλικού για τις διατομές όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 12.

Πίνακας 12: Κατηγορία κατάταξης υλικού

| Alloy EN-AW | Product form | Temper | Thick-ness t mm | f_o | f_u | A | $f_{o,haz}$ | $f_{u,haz}$ | HAZ-factor | | BC | n_p |
|-------------|--------------|--------|-------------------|-------|-------|-----|-------------|-------------|------------|------|----|-------|
| 6063 | EP,ET,ER | T6 | $t \leq 25$ | 160 | 195 | 8 | 65 | 110 | 0,41 | 0,56 | A | 24 |
| | DT | | $t \leq 20$ | 190 | 220 | 10 | | | 0,34 | 0,50 | A | 31 |

Πηγή: Ευρωκώδικας 9

Σύμφωνα με τον Πίνακα 12, η κατάταξη του υλικού για όλες τις διατομές είναι Κατηγορίας Α.

Με τον συνδυασμό των Πινάκων 11 και 12 υπολογίστηκαν οι παράμετρος β_1 , β_2 , β_3 όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 13, και θα είναι όλοι οι ίδιοι για όλες τις διατομές αφού η κατάταξη των υλικών τους είναι η ίδια.

Πίνακας 13: Υπολογισμός παραμέτρων β_1 , β_2 και β_3

| ε | β_1/ε | β_1 |
|---------------|-----------------------|-----------|
| 1.15 | 11 | 12.65 |

| ε | β_2/ε | β_2 |
|---------------|-----------------------|-----------|
| 1.15 | 16 | 18.4 |

| ε | β_3/ε | β_3 |
|---------------|-----------------------|-----------|
| 1.15 | 22 | 25.3 |

Η κατάταξη των διατομών σε κλάσεις παρουσιάζεται στον Πίνακα 14.

Πίνακας 14: Κατάταξη διατομών σε κλάση

| Διαστάσεις Διατομής | β | β_1 | β_2 | β_3 | Σχέση β με β_1, β_2 και β_3 | Κλάση |
|---------------------|---------|-----------|-----------|-----------|---|-------|
| 50x50x2 | 23 | 12.65 | 18.4 | 25.3 | $\beta_2 < \beta < \beta_3$ | 3 |
| 80x80x4 | 18 | | | | $\beta < \beta_2$ | 1 ή 2 |
| 100x100x2 | 48 | | | | $\beta > \beta_3$ | 4 |
| 100x100x4 | 23 | | | | $\beta_2 < \beta < \beta_3$ | 3 |

Η διατομή 100x100x2 ανήκει σε κατηγορία κλάσης 4. Για διατομές κατηγορίας 4 θα πρέπει να ακολουθείται συγκεκριμένη διαδικασία η οποία παρουσιάζεται πιο κάτω.

Ο τοπικός λυγισμός σε μέλη κατηγορίας 4 λαμβάνεται γενικά υπόψη αντικαθιστώντας την πραγματική διατομή με μία ενεργό διατομή. Η ενεργός διατομή προκύπτει με την εισαγωγή ενός συντελεστή τοπικού λυγισμού ρ_c για να μειωθεί το πάχος. Ο συντελεστής ρ_c εφαρμόζεται σε οποιοδήποτε στοιχείο κατηγορίας 4 με ομοιόμορφο πάχος, το οποίο υπόκειται ολόκληρο ή μερικώς σε θλίψη. Στοιχεία τα οποία δεν έχουν ομοιόμορφο πάχος, απαιτούν ειδική μελέτη. Στην προκειμένη περίπτωση όλα τα στοιχεία έχουν ομοιόμορφο πάχος (Ευρωκώδικας 9)

Ο συντελεστής ρ_c δίνεται από τις σχέσεις (1) ή (2), ξεχωριστά για τα διάφορα στοιχεία της διατομής, σε όρους του λόγου β/ε , όπου ο όρος β υπολογίζεται όπως ακριβώς ειπώθηκε πιο πάνω, ο όρος $\varepsilon = 1.15$ (υπολογίστηκε πιο πάνω) και οι σταθερές C_1 και C_2 από τον Πίνακα 15. Η σχέση που θα χρησιμοποιηθεί είναι η (2), αφού για την διατομή 100x100x2 το β είναι μεγαλύτερο από το β_3 ($\beta = 48$ και $\beta_3 = 25.3$). Οι σχέσεις μεταξύ ρ_c και β/ε συνοψίζονται στο Σχήμα 21.

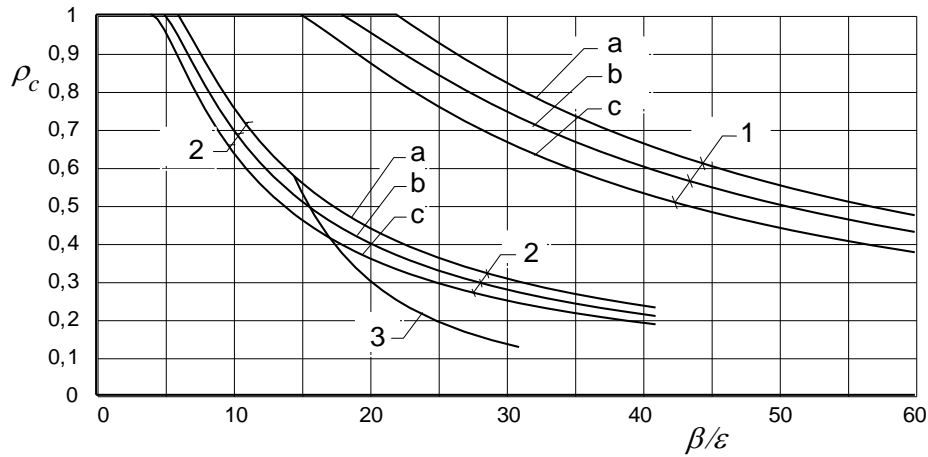
$$\rho_c = 1,0 \quad \text{if } \beta \leq \beta_3 \quad (1)$$

$$\rho_c = \frac{C_1}{(\beta/\varepsilon)} - \frac{C_2}{(\beta/\varepsilon)^2} \quad \text{if } \beta > \beta_3 \quad (2)$$

Πίνακας 15: Υπολογισμός σταθερών C_1 και C_2

| Ταξινόμηση υλικού σύμφωνα με τον Πίνακα 3.2 | Εσωτερικό τμήμα | |
|---|-----------------|-------|
| | C_1 | C_2 |
| Κατηγορία A, χωρίς συγκολλήσεις | 32 | 220 |
| Κατηγορία A, με συγκολλήσεις | 29 | 198 |
| Κατηγορία B, χωρίς συγκολλήσεις | 29 | 198 |
| Κατηγορία B, με συγκολλήσεις | 25 | 150 |

Πηγή: Ευρωκώδικας 9



1 Εσωτερικά στοιχεία και κυκλικοί σωλήνες, 2 Συμμετρικά προεξέχοντα, 3 Μη-συμμετρικά προεξέχοντα

- a) κατηγορία A, χωρίς συγκολλήσεις,
- b) κατηγορία A, με συγκολλήσεις ή κατηγορία B, χωρίς συγκολλήσεις
- c) κατηγορία B, με συγκολλήσεις

Σχήμα 21: Σχέση μεταξύ ρ_c και β/ε για εξωτερικά τμήματα, εσωτερικά τμήματα και κυκλικούς σωλήνες

Από τον Πίνακα 15 οι σταθερές C_1 και C_2 είναι ίσες με 32 και 220 αντίστοιχα. Χρησιμοποιώντας τον Πίνακα 15 και την σχέση (2) ο συντελεστής ρ_c μπορεί να υπολογιστεί.

$$\rho_c = \frac{C_1}{(\beta/\varepsilon)} - \frac{C_2}{(\beta/\varepsilon)^2}$$

$$\rho_c = \frac{32}{(48/1.15)} - \frac{220}{(48/1.15)^2} = 0.64$$

όπου:

$$\beta = 48$$

$$\varepsilon = 1.15$$

Ο συντελεστής μείωσης ρ_c μας δίνει το ποσοστό που πρέπει να μειωθεί το πάχος της θλιβόμενης πλευράς της διατομής, έτσι ώστε να υπολογιστεί το ενεργό πάχος t . Επομένως,

αφού το t για όλες της πλευρές της διατομής είναι 2 cm, στην πλευρά που θα επιβληθεί το φορτίο (θλιβόμενη πλευρά), το ενεργό πάχος t θα είναι ίσο:

$$t = 2 * 1 - 0.64 = 1.36 \text{ cm}$$

$$t_{\text{eff}} = 2 - 1.36 = 0.64 \text{ cm}$$

Για τον υπολογισμό της ελαστικής ροπής, W_{el} , θα πρέπει όλες οι πλευρές να έχουν πάχος 2 cm, εκτός από την πλευρά που θα επιβληθεί το φορτίο (θλιβόμενη πλευρά) η οποία θα έχει πάχος $t = t_{\text{eff}} = 0.64 \text{ cm}$

Πιο κάτω παρουσιάζεται ο υπολογισμός του W_{el} για την κοιλοδοκό 100x100x2 που ανήκει στην κλάση 4.

3.2.2. Θεωρητική προσέγγιση

Οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν από τον ΕΚ 9 για έλεγχο του αλουμινίου σε κάμψη είναι οι εξής:

$$M_{u,Rd} = W_{net} f_u / \gamma_{M2} \text{ σε καθαρή διατομή και} \quad (3)$$

$$M_{c,Rd} = \alpha W_{el} f_o / \gamma_{M1} \text{ σε κάθε διατομή} \quad (4)$$

Ο υπολογισμό του συντελεστή μορφής α παρουσιάζεται στον Πίνακα 16.

Πίνακας 16: Τιμές του συντελεστή μορφής α

| Κατηγορία διατομής | Χωρίς συγκολλήσεις | Με διαμήκεις συγκολλήσεις |
|--|------------------------|----------------------------|
| 1 | $W_{pl} / W_{el}^{*)}$ | $W_{pl,haz} / W_{el}^{*)}$ |
| 2 | W_{pl} / W_{el} | $W_{pl,haz} / W_{el}$ |
| 3 | $\alpha_{3,u}$ | $\alpha_{3,w}$ |
| 4 | W_{eff} / W_{el} | $W_{eff, haz} / W_{el}$ |
| *) ΣΗΜΕΙΩΣΗ Αυτές οι εξισώσεις είναι προς την συντηρητική πλευρά. Για πιο ακριβείς τιμές, συστάσεις δίνονται στο Παράρτημα F | | |

Πηγή: Ευρωκώδικας 9

Στον Πίνακα 16 οι διάφορες σταθερές διατομής W και $\alpha_{3,u}$, $\alpha_{3,w}$ ορίζονται ως:

W_{pl} πλαστική ροπή αντίστασης της πλήρους διατομής

W_{eff} ενεργός ελαστική ροπή αντίστασης, υπολογισμένη χρησιμοποιώντας μειωμένο πάχος t_{eff} για κατηγορίας 4

$W_{el,haz}$ ενεργός ελαστική ροπή αντίστασης της πλήρους διατομής, υπολογισμένη χρησιμοποιώντας μειωμένο πάχος $\rho_{o,haz}t$ για το υλικό ΘΕΖ

$W_{pl,haz}$ ενεργός πλαστική ροπή αντίστασης της πλήρους διατομής, υπολογισμένη χρησιμοποιώντας μειωμένο πάχος $\rho_{o,haz}t$ για το υλικό ΘΕΖ

$W_{eff,haz}$ ενεργός ελαστική ροπή αντίστασης, υπολογισμένη χρησιμοποιώντας μειωμένο πάχος $\rho_c t$ για τα στοιχεία κατηγορίας 4 ή μειωμένο πάχος $\rho_{o,haz}t$ για το υλικό ΘΕΖ, όποιο είναι μικρότερο

$\alpha_{3,u} = 1$ ή εναλλακτικά λαμβάνεται ως εξής:

$$\alpha_{3,u} = \left[1 + \left(\frac{\beta_3 - \beta}{\beta_3 - \beta_2} \right) \left(\frac{W_{pl}}{W_{el}} - 1 \right) \right]$$

$\alpha_{3,w} = W_{el,haz} / W_{el}$ ή εναλλακτικά μπορεί να λαμβάνεται ως εξής:

$$\alpha_{3,w} = \left[\frac{W_{el,haz}}{W_{el}} + \left(\frac{\beta_3 - \beta}{\beta_3 - \beta_2} \right) \left(\frac{W_{pl,haz} - W_{el,haz}}{W_{el}} \right) \right]$$

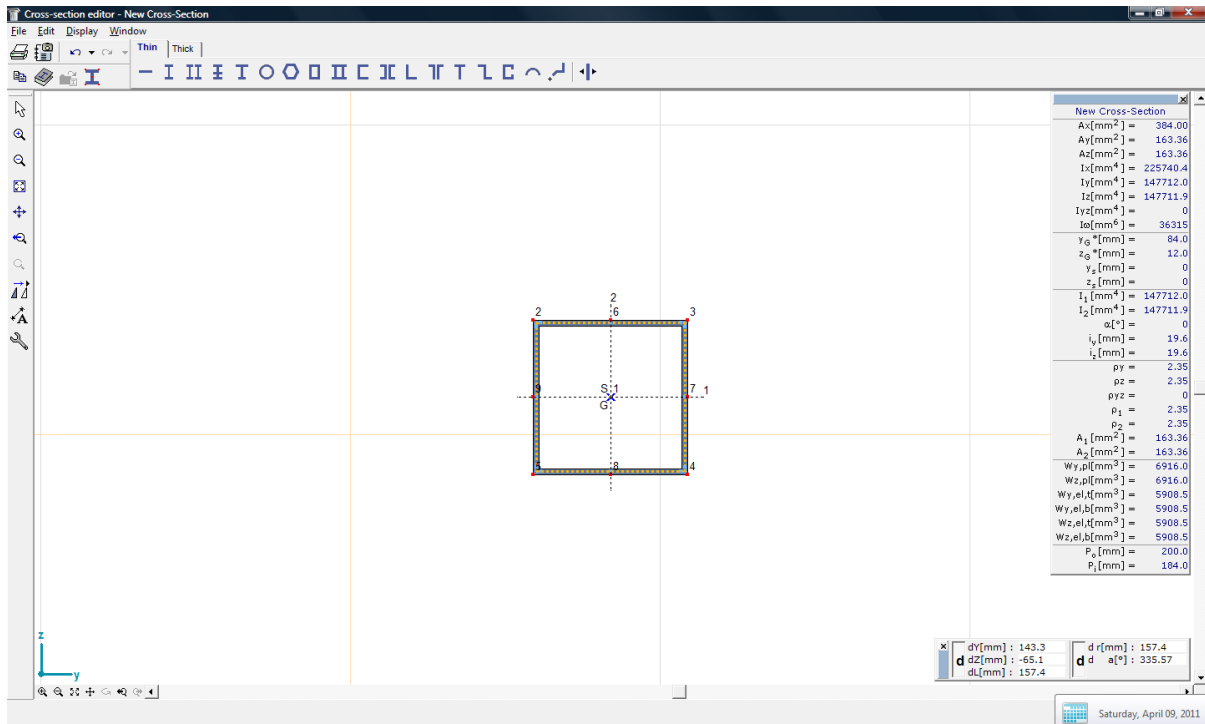
όπου:

β είναι η παράμετρος λυγηρότητας για το πιο κρίσιμο στοιχείο στη διατομή

β_2 και β_3 είναι οι οριακές τιμές για το ίδιο στοιχείο σύμφωνα με τον Πίνακα 6.2.

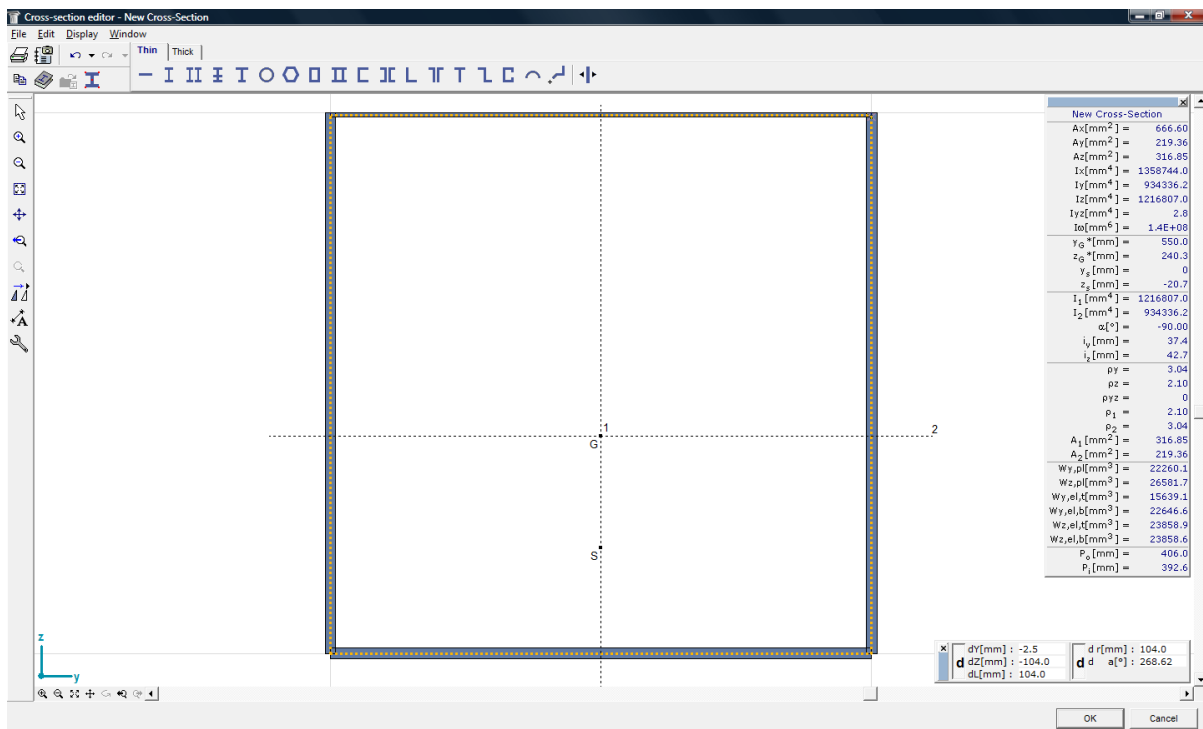
Γνωρίζοντας την κατηγορία των διατομών, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 14, μπορεί να υπολογιστεί η τιμή του α για κάθε μια διατομή. Οι διατομές ταξινομούνται σε κατηγορία κλάσης 1,2,3 και 4 (Πίνακας 14), που σύμφωνα με τον Πίνακα 16 η τιμή που θα έχει ο συντελεστής μορφής α θα είναι ίσος με 1, αφού η πλαστική καθώς και η ενεργός ελαστική ροπή αντίστασης είναι ίσες με την ελαστική ροπή αντίστασης.

Ο υπολογισμός της ελαστικής ροπής αντίστασης, W_{el} , έγινε μέσω του προγράμματος “AxisVM”. Ορίζοντας τις διαστάσεις της διατομής, υπολογίζει διάφορες παραμέτρους της όπως π.χ. την ροπή αδρανείας και στους δυο άξονες, το εμβαδόν διατομής κλπ. Η διατομή 50x50x2, μαζί με όλες τις παραμέτρους της παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.



Εικόνα 17: Υπολογισμός ελαστικής ροπής αδρανείας W_{el} διατομής 50x50x2, μέσω του προγράμματος “AxisVM”

Για την διατομή 100x100x2, που ανήκει στην κλάση 4, ο σχεδιασμός της διατομής στο πρόγραμμα “AxisVM” είχε την μορφή που παρουσιάζεται στην Εικόνα 18.



Εικόνα 18: Υπολογισμός ελαστικής ροπής αδρανείας W_{el} διατομής 100x100x2, μέσω του προγράμματος “AxisVM”

Όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 18, η άνω πλευρά της διατομής (θλιβόμενη), σχεδιάστηκε με πάχος 0.64 cm, αντί για 2 cm που είναι όλες οι άλλες πλευρές της κοιλοδοκού.

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίστηκε η W_{el} και για τις υπόλοιπες διατομές, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 17.

Πίνακας 17: Υπολογισμός W_{el} για τις διατομές μέσω του προγράμματος “AxisVM”

| Διαστάσεις Διατομής | Ελαστική ροπή W_{el} (mm ³) | Ελαστική ροπή W_{el} (m ³) |
|---------------------|---|--|
| 50x50x2 | 47267.60 | 4.72676E-05 |
| 80x80x4 | 29346.10 | 2.93461E-05 |
| 100x100x2 | 15639.1 | 1.56391E-05 |
| 100x100x4 | 47267.60 | 4.72676E-05 |

Γνωρίζοντας την W_{el} και εφαρμόζοντας την σχέση (3), μπορεί να υπολογιστεί η ροπή $M_{c,Rd}$ όπως φαίνεται στον Πίνακα 18.

Πίνακας 18: Υπολογισμός ροπής $M_{c,Rd}$

| $M_{c,Rd}$ | | | | | |
|------------------------------|----------------------------|--|-------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| Διαστάσεις Διατομής | α | W_{el} (m³) | f_o (kPa) | γ_{M1}^* | $M_{c,Rd}$ |
| 50x50x2 | 1 | 5.909E-06 | 190000 | 1.1 | 1.021 |
| 80x80x4 | 1 | 2.935E-05 | 190000 | 1.1 | 5.069 |
| 100x100x2 | 1 | 1.564E-05 | 190000 | 1.1 | 2.752 |
| 100x100x4 | 1 | 4.727E-05 | 190000 | 1.1 | 8.164 |

*) Για τον συντελεστή γ_{M1} ο ΕΚ 9 προτείνει την τιμή 1,1.

Στην συνέχεια, γνωρίζοντας ότι η W_{net} είναι ίση με την W_{el} (δεν υπάρχουν οπές στην διατομή) και εφαρμόζοντας την εξίσωση (4) για όλες τις διατομές δημιουργείται ο Πίνακας 19.

Πίνακας 19: Υπολογισμός ροπής $M_{u,Rd}$

| $M_{u,Rd}$ | | | | |
|------------------------------|---|-------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| Διαστάσεις Διατομής | W_{net} (m³) | f_u (kPa) | γ_{M2}^* | $M_{u,Rd}$ |
| 50x50x2 | 5.9089E-06 | 220000 | 1.25 | 1.040 |
| 80x80x4 | 2.9346E-05 | 220000 | 1.25 | 5.165 |
| 100x100x2 | 1.555E-05 | 220000 | 1.25 | 2.701 |
| 100x100x4 | 4.7268E-05 | 220000 | 1.25 | 8.319 |

*) Για τον συντελεστή γ_{M2} ο ΕΚ 9 προτείνει την τιμή 1,25.

Με την πιο πάνω διαδικασία, υπολογίστηκαν οι θεωρητικές τιμές ροπής κάμψης ($M_{c,Rd}$, $M_{u,Rd}$) των διαφόρων διατομών αλουμινίου.

3.2.3. Πειραματική προσέγγιση

Αντίστοιχα, στους εργαστηριακούς ελέγχους ανάλογα με την διάταξη του οργάνου, θα χρησιμοποιηθούν οι κατάλληλοι τύποι που δίνονται από την στατική επίλυση μιας δοκού και αφορούν την μέγιστη ροπή κάμψης.

$$M_{\max 1} = FL/4 \text{ για επιβολή ενός φορτίου στο κέντρο της δοκού} \quad (5)$$

$$M_{\max 2} = Fa \text{ για επιβολή δυο φορτίων έκκεντρα της δοκού} \quad (6)$$

όπου:

$M_{\max 1}$ = η μέγιστη ροπή για επιβολή ενός φορτίου

$M_{max 2}$ = η μέγιστη ροπή για επιβολή δυο φορτίων έκκεντρα της δοκού

F = η δύναμη που εφαρμόζεται στην δοκό

L = το μήκος του ανοίγματος μεταξύ των στηρίξεων

α = το μήκος από την στήριξη μέχρι την επιβολή του φορτίου

Για τους εργαστηριακούς ελέγχους θα χρησιμοποιηθούν 4 δοκίμια από κάθε διατομή. Τα 2 από τα 4 δοκίμια της κάθε διατομής, θα υποβληθούν σε δυο φορτία έκκεντρα της δοκού, ενώ τα υπόλοιπα σε ένα φορτίο κεντρικά της δοκού (βλέπε Παράρτημα 2).

Στο κάθε δοκίμιο αναγράφεται το είδος του αλουμινίου (Alloy 6063-T6), η διαστάσεις τις κάθε διατομής καθώς και την κατηγορία που ανήκει η κάθε διατομή. Οι κατηγορίες που δημιουργήθηκαν αναφέρονται πιο κάτω και αφορούν διατομές ιδίων διαστάσεων.

Πίνακας 20: Κατηγοριοποίηση διατομών

| Κατηγορία Διατομής | | Διαστάσεις Διατομών |
|--------------------|----|---------------------|
| A | A1 | 50x50x2 |
| | A2 | 50x50x2 |
| | A3 | 50x50x2 |
| | A4 | 50x50x2 |
| B | B1 | 80x80x4 |
| | B2 | 80x80x4 |
| | B3 | 80x80x4 |
| | B4 | 80x80x4 |
| Γ | Γ1 | 100x100x2 |
| | Γ2 | 100x100x2 |
| Δ | Δ1 | 100x100x4 |
| | Δ2 | 100x100x4 |
| | Δ3 | 100x100x4 |
| | Δ4 | 100x100x4 |

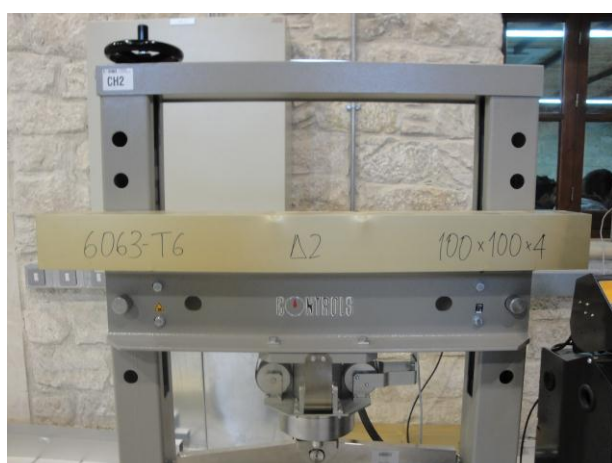
Η δοκιμή τερματίζεται, μόλις παρουσιαστεί στα δοκίμια θραύση. Τα αποτελέσματα των δοκιμών για τις διατομές αλουμινίου παρουσιάζονται στις πιο κάτω Εικόνες.



Εικόνα 19: Παραμόρφωση δοκιμίου Δ1 για επιβολή ενός φορτίου



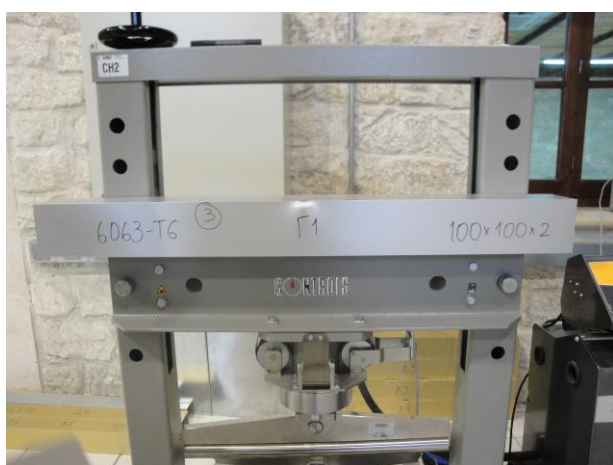
Εικόνα 20: Παραμόρφωση δοκιμίου Δ1



Εικόνα 21: Επιβολή δυο φορτίων έκκεντρα του δοκιμίου Δ2



Εικόνα 22: Παραμόρφωση δοκιμίου Δ2



Εικόνα 23: Επιβολή ενός φορτίου κεντρικά του δοκιμίου Γ1



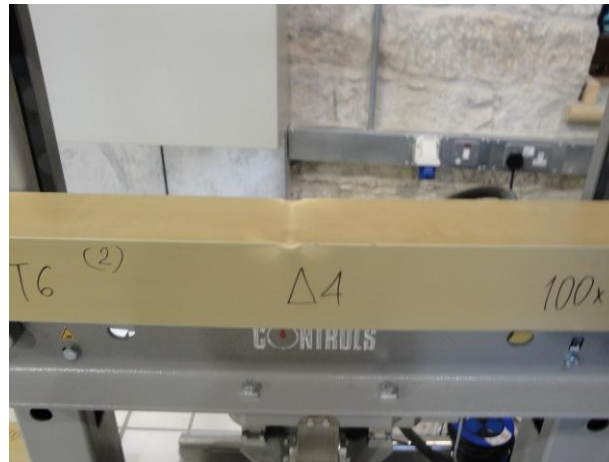
Εικόνα 24: Παραμόρφωση δοκιμίου Γ1



Εικόνα 25: Υποβολή του δοκιμίου Δ3 στο μοντέλο μηχανής κάμψης «CONTROLS 50-C1400/*-50-C1401/*»



Εικόνα 26: Επιβολή ενός φορτίου κεντρικά του δοκιμίου Δ4



Εικόνα 27: Παραμόρφωση δοκιμίου Δ4



Εικόνα 28: Παραμόρφωση δοκιμίου Δ3



Εικόνα 29: Επιβολή δυο φορτίων έκκεντρα του δοκιμίου Δ3

Για περισσότερες Εικόνες που διεξήχθησαν από την πειραματική διαδικασία, βλέπε Παράρτημα 3.

Στο τέλος κάθε δοκιμής καταγράφεται η δύναμη στην οποία το δοκίμιο παρουσίασε θραύση. Γνωρίζοντας την δύναμη παραμόρφωσης του κάθε δοκιμίου και χρησιμοποιώντας την εξίσωση (5), υπολογίστηκε η μέγιστη ροπή, M_{max2} της κάθε διατομής, για επιβολή ενός φορτίου στο κέντρο της.

Πίνακας 21: Υπολογισμός M_{max1}

| M_{max1} | | | | |
|------------------|---------------------|--------|-------|------------------|
| Αριθμός Δοκιμίων | Διαστάσεις Διατομής | F (kN) | L (m) | M_{max1} (kNm) |
| 2 | 50x50x2 | 8.394 | 0.6 | 1.259 |
| | 50x50x2 | 8.457 | 0.6 | 1.269 |
| 2 | 80x80x4 | 31.46 | 0.6 | 4.719 |
| | 80x80x4 | 31.541 | 0.6 | 4.731 |
| 2 | 100x100x2 | 18.788 | 0.6 | 2.818 |
| | 100x100x2 | 19.338 | 0.6 | 2.901 |
| 2 | 100x100x4 | 41.668 | 0.8 | 8.334 |
| | 100x100x4 | 51.769 | 0.6 | 7.765 |

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζεται η M_{max2} , της κάθε διατομής, για επιβολή δυο φορτίων έκκεντρα από το κέντρο της κάθε μιας, χρησιμοποιώντας την εξίσωση (6).

Πίνακας 22: Υπολογισμός M_{max2}

| M_{max2} | | | | |
|------------------|---------------------|---------|--------------|------------------|
| Αριθμός Δοκιμίων | Διαστάσεις Διατομής | F (kN) | α (m) | M_{max2} (kNm) |
| 2 | 50x50x2 | 5.804 | 0.2 | 1.1608 |
| | 50x50x2 | 6.053 | 0.2 | 1.2106 |
| 2 | 80x80x4 | 22.88 | 0.2 | 4.576 |
| | 80x80x4 | 23.469 | 0.2 | 4.6938 |
| 2 | 100x100x4 | 39.304 | 0.2 | 7.8608 |
| | 100x100x4 | 38.2395 | 0.2 | 7.6479 |

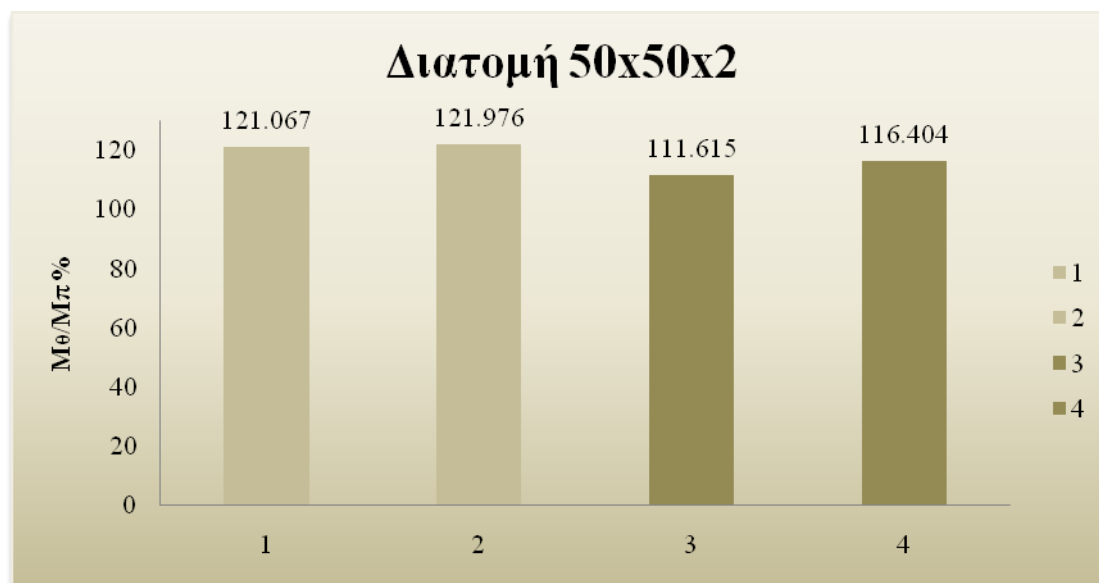
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Με τα αποτελέσματα από τους Πίνακες 19, 21 και 22 δημιουργήθηκαν διάφορες γραφικές παραστάσεις. Η κάθε μια από αυτές υποδηλώνει την σχέση της θεωρητικής ροπής ($M_{u,Rd}$) με τις πειραματικές τιμές ροπής κάμψης M_{max1} και M_{max2} .

Πίνακας 23: M_{θ} , M_{max1} και M_{max2} για την διατομή 50x50x2

| Διαστάσεις Διατομής | M_{θ} | $(M_{\theta}/M_{\theta})*100$ | Μπ | | $(M_{\pi}/M_{\theta})*100$ | |
|---------------------|--------------|-------------------------------|------------|-----------------------|----------------------------|---------|
| 50x50x2 | 1.04 | 100 | M_{max1} | 1 ^η δοκιμή | 1.2591 | 121.067 |
| | | | | 2 ^η δοκιμή | 1.2685 | 121.976 |
| | | | M_{max2} | 1 ^η δοκιμή | 1.1608 | 111.615 |
| | | | | 2 ^η δοκιμή | 1.2106 | 116.404 |

Από τον Πίνακα 23 δημιουργήθηκε η Εικόνα 30.



Εικόνα 30: Σχέση $M_{u,Rd}$ με M_{max1} και M_{max2} για την διατομή 50x50x2

*Σημείωση: Η Μπ συμπεριλαμβάνει την M_{max1} και M_{max2} , και η $M_{\theta} = M_{u,Rd}$

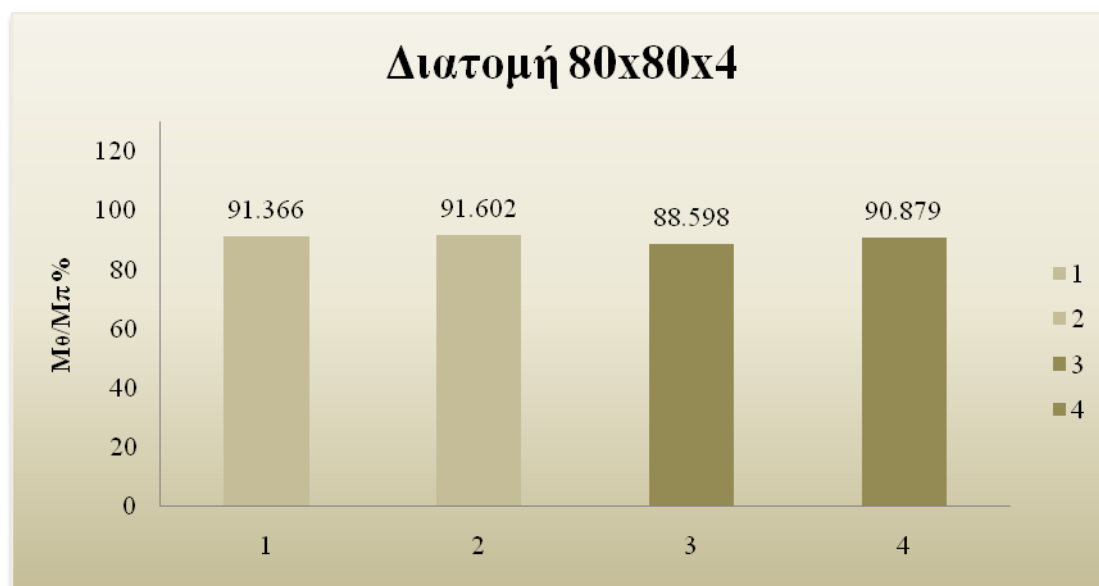
Στην Εικόνα 30 παρουσιάζονται τα ποσοστά των ροπών M_{max1} και M_{max2} σε σχέση με το ποσοστό της ροπής M_{θ} , που έχει τιμή 1.04 και αποτελεί το 100%. Οι στήλες 1 και 2 αντιπροσωπεύουν την τιμή της ροπής M_{max1} για την πρώτη και την δεύτερη δοκιμή αντίστοιχα και οι στήλες 3 και 4 την τιμή της ροπής M_{max2} για την πρώτη και την δεύτερη δοκιμή αντίστοιχα.

Παρατηρείται, ότι όλες οι τιμές για τις ροπές M_{max1} και M_{max2} ξεπερνούν την ροπή M_{θ} . Η (M_{max1}) και για τις δυο δοκιμές ξεπερνά και την M_{max2} .

Πίνακας 24: M_{θ} , M_{max1} και M_{max2} για την διατομή 80x80x4

| Διαστάσεις Διατομής | M_{θ} | $(M_{\theta}/M_{\theta})*100$ | M_{π} | | $(M_{\pi}/M_{\theta})*100$ | |
|---------------------|--------------|-------------------------------|------------|-----------------------|----------------------------|--------|
| | | | | | | |
| 80x80x4 | 5.17 | 100 | M_{max1} | 1 ^η δοκιμή | 4.719 | 91.366 |
| | | | | 2 ^η δοκιμή | 4.731 | 91.602 |
| | | | M_{max2} | 1 ^η δοκιμή | 4.576 | 88.598 |
| | | | | 2 ^η δοκιμή | 4.694 | 90.879 |

Από τον Πίνακα 24 δημιουργήθηκε το Εικόνα 31.



Εικόνα 31: M_{θ} , M_{max1} και M_{max2} για την διατομή 80x80x4

*Σημείωση: Η M_{π} συμπεριλαμβάνει την M_{max1} και M_{max2} , και η $M_{\theta} = M_{u,Rd}$

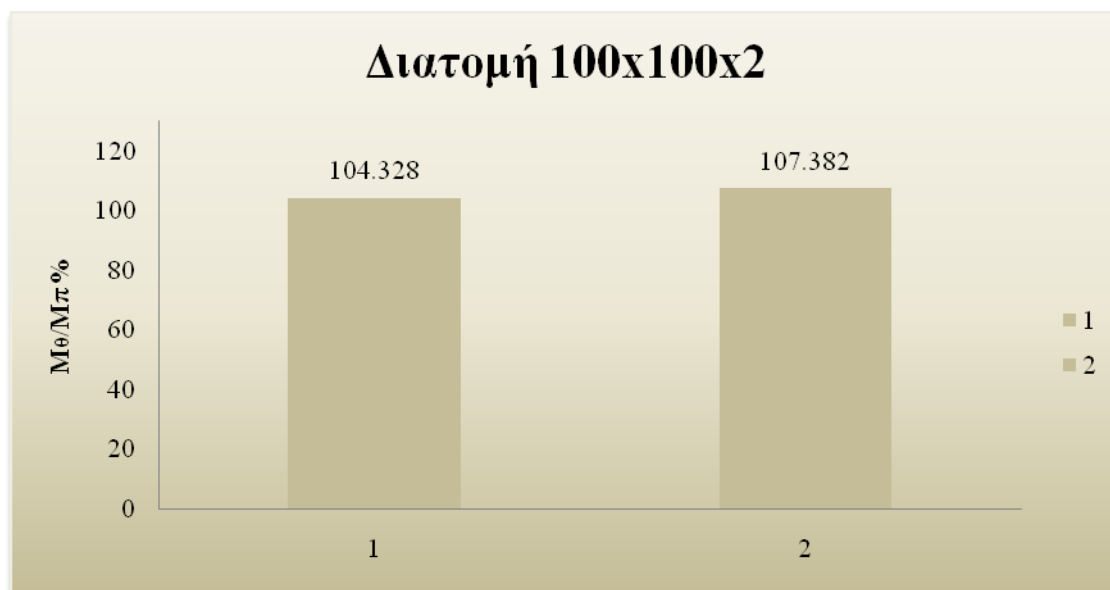
Στην Εικόνα 31 παρουσιάζονται τα ποσοστά των ροπών M_{max1} και M_{max2} σε σχέση με το ποσοστό της ροπής M_{θ} , που έχει τιμή 5.17 και αποτελεί το 100%. Οι στήλες 1 και 2 αντιπροσωπεύουν την τιμή της ροπής M_{max1} για την πρώτη και την δεύτερη δοκιμή αντίστοιχα και οι στήλες 3 και 4 την τιμή της ροπής M_{max2} για την πρώτη και την δεύτερη δοκιμή αντίστοιχα.

Παρατηρείται, ότι όλες οι τιμές για τις ροπές M_{max1} και M_{max2} είναι μικρότερες από την ροπή M_{θ} . Η M_{max2} της πρώτης δοκιμής παρουσιάζει το μικρότερο ποσοστό M_{θ}/M_{π} %. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι η M_{π} (M_{max2} της 1^{ης} δοκιμής) παρουσιάζει μεγαλύτερη απόκλιση από την M_{θ} ($M_{u,Rd}$).

Πίνακας 25: M_{θ} , M_{max1} για την διατομή 100x100x2

| Διαστάσεις Διατομής | M_{θ} | $(M_{\theta}/M_{\theta})*100$ | M_{π} | | $(M_{\pi}/M_{\theta})*100$ | |
|---------------------|--------------|-------------------------------|------------|-----------------------|----------------------------|---------|
| | | | M_{max1} | | | |
| 100x100x2 | 2.701 | 100 | | 1 ^η δοκιμή | 2.818 | 104.328 |
| | | | | 2 ^η δοκιμή | 2.901 | 107.382 |

Από τον Πίνακα 25 δημιουργήθηκε το Εικόνα 32.



Εικόνα 32: M_{θ} , M_{max1} για την διατομή 100x100x2

*Σημείωση: Η M_{π} συμπεριλαμβάνει την M_{max1} , και η $M_{\theta} = M_{u,Rd}$

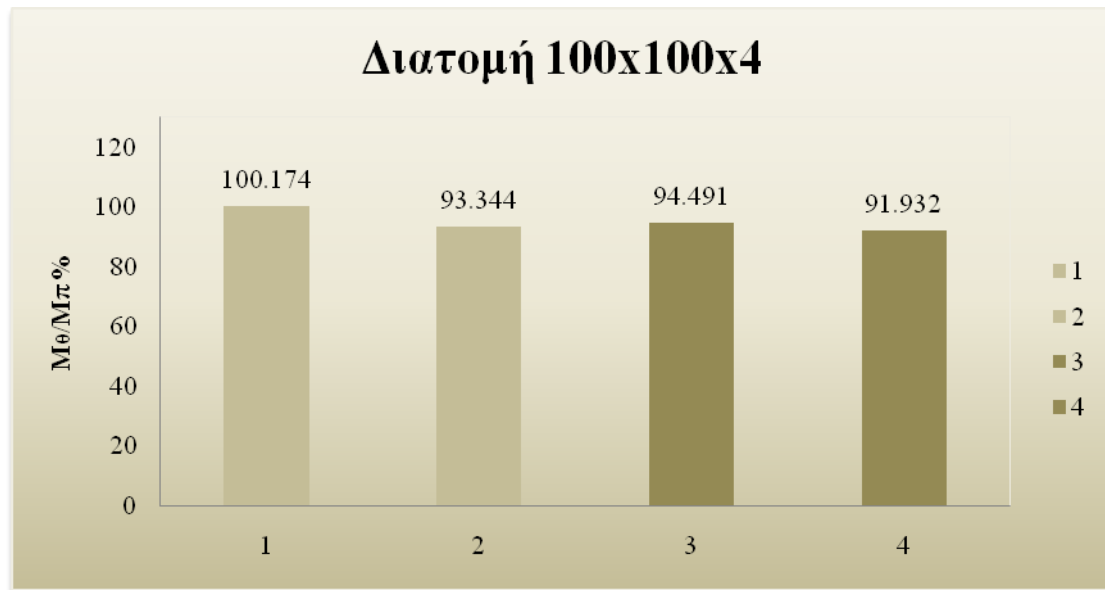
Στο Εικόνα 32 παρουσιάζονται τα ποσοστά της ροπής M_{max1} σε σχέση με το ποσοστό της ροπής M_{θ} , που έχει τιμή 2.701 και αποτελεί το 100%. Οι στήλες 1 και 2 αντιπροσωπεύουν την τιμή της ροπής M_{max1} για την πρώτη και την δεύτερη δοκιμή αντίστοιχα.

Παρατηρείται ότι και οι δυο τιμές της ροπής M_{max1} είναι λίγο πιο ψηλές σε σχέση με την ροπή M_{θ} . Προσεγγίζουν αρκετά καλά την ροπή M_{θ} .

Πίνακας 26: M_{θ} , M_{max1} και M_{max2} για την διατομή 100x100x4

| Διαστάσεις Διατομής | M_{θ} | $(M_{\theta}/M_{\theta})*100$ | M_{π} | | $(M_{\pi}/M_{\theta})*100$ | |
|---------------------|--------------|-------------------------------|------------|------------|----------------------------|---------|
| | | | M_{max1} | M_{max2} | | |
| 100x100x4 | 8.319 | 100 | M_{max1} | 1η δοκιμή | 8.334 | 100.174 |
| | | | | 2η δοκιμή | 7.765 | 93.344 |
| | | | M_{max2} | 1η δοκιμή | 7.861 | 94.491 |
| | | | | 2η δοκιμή | 7.648 | 91.932 |

Από τον Πίνακα 26 δημιουργήθηκε η Εικόνα 33.



Εικόνα 33: M_{θ} , M_{max1} και M_{max2} για την διατομή 100x100x4

*Σημείωση: Η M_{π} συμπεριλαμβάνει την M_{max1} και M_{max2} , και η $M_{\theta} = M_{u,Rd}$

Στο Εικόνα 33 παρουσιάζονται τα ποσοστά των ροπών M_{max1} και M_{max2} σε σχέση με το ποσοστό της ροπής M_{θ} , που έχει τιμή 8.32 και αποτελεί το 100%. Οι στήλες 1 και 2 αντιπροσωπεύουν την τιμή της ροπής M_{max1} για την πρώτη και την δεύτερη δοκιμή αντίστοιχα και οι στήλες 3 και 4 την τιμή της ροπής M_{max2} για την πρώτη και την δεύτερη δοκιμή αντίστοιχα.

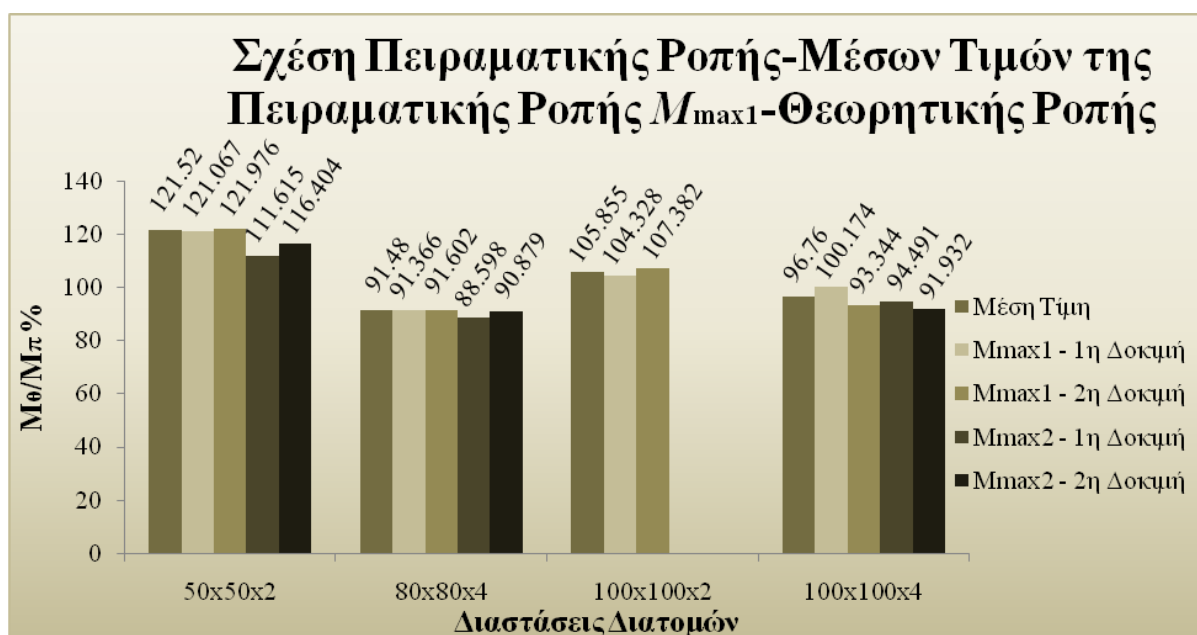
Παρατηρείται, ότι όλες σχεδόν οι τιμές για τις ροπές M_{max1} και M_{max2} είναι μικρότερες από την ροπή M_{θ} , εκτός από την τιμή της στήλης 1, η οποία ξεπερνά κατά πολύ λίγο την τιμή της M_{θ} .

Στην συνέχεια, υπολογίστηκε ο μέσος όρος των δυο δοκιμών (για κάθε διατομή) για κάθε μια από τις ροπές M_{max1} (Πίνακας 27) και M_{max2} (Πίνακας 28) και σε συνδυασμό με τις προηγούμενες εικόνες (30,31,32 και 33), δημιουργήθηκε η Εικόνα 34 και 35, η οποία περιλαμβάνει τις πειραματικές τιμές M_{max1} και M_{max2} καθώς και το μέσο όρο των δυο δοκιμών για τις αναφερθείσες ροπές.

Πίνακας 27: Υπολογισμός μέσης τιμή δοκιμών, για κάθε διατομή, για την ροπή M_{max1} .

| Διαστάσεις Διατομής | M_{θ} | $(M_{\theta}/M_{\theta}) * 100$ | M_{π} | | | $M_{\pi,aver}$ | $(M_{\pi,aver}/M_{\theta}) * 100$ |
|------------------------|--------------|---------------------------------|------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------------------|
| | | | M_{max1} | 1 ^η | 2 ^η | | |
| 50x50x2 | 1.04 | 100 | M_{max1} | 1 ^η | 1.2591 | 1.263825 | 121.5216 |
| | | | | 2 ^η | 1.268 | | |
| 80x80x4 | 5.165 | 100 | M_{max1} | 1 ^η | 4.719 | 4.725075 | 91.48411 |
| | | | | 2 ^η | 4.731 | | |
| 100x100x2 | 2.701 | 100 | M_{max1} | 1 ^η | 2.818 | 2.85945 | 106.4598 |
| | | | | 2 ^η | 2.901 | | |
| 100x100x4 | 8.319 | 100 | M_{max1} | 1 ^η | 8.334 | 8.049475 | 96.75899 |
| | | | | 2 ^η | 7.765 | | |

Με τον Πίνακα 27 δημιουργήθηκε η Εικόνα 34, η οποία δίνει την συνολική εικόνα, για κάθε διατομή, της σχέσης πειραματικής – θεωρητική ροπής. Επιπλέον, παρουσιάζεται και η μέση τιμή, της κάθε δοκιμής για κάθε δοκίμιο, για την M_{max1} (ροπή για επιβολή ενός φορτίου), η οποία προσδίδει καλύτερα αποτελέσματα.



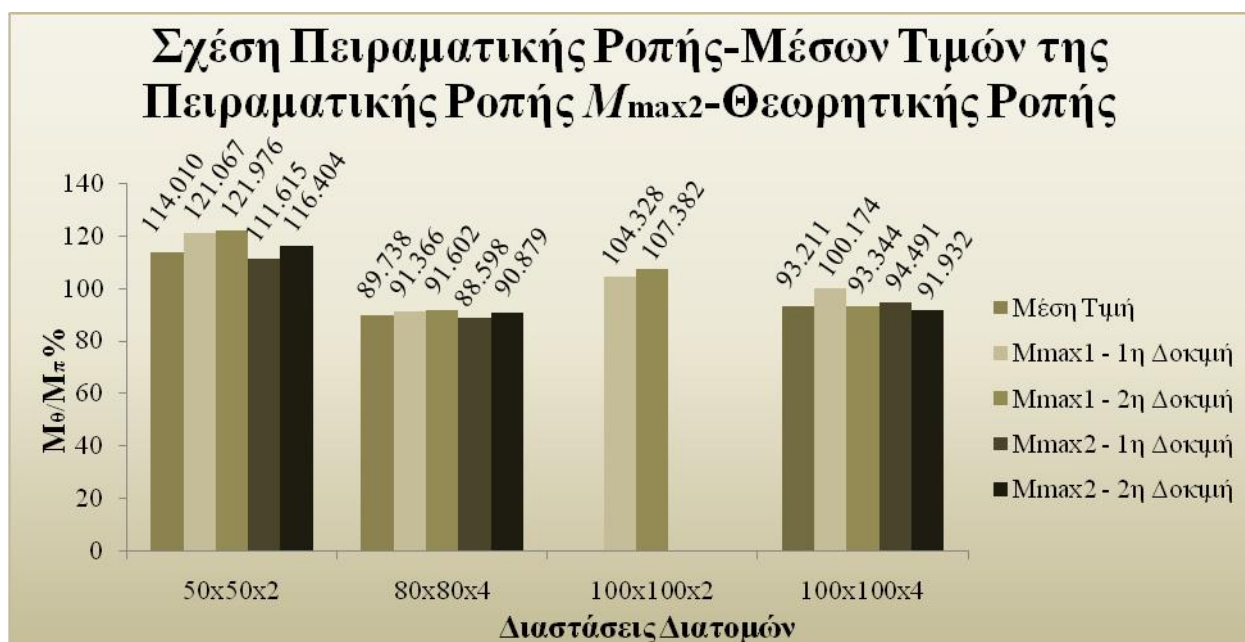
Εικόνα 34: Σχέση Πειραματικής Ροπής - Μέσων Τιμών της Πειραματικής Ροπής M_{max1} - Θεωρητικής Ροπής

Στην Εικόνα 34, όλες οι διατομές προσεγγίζουν αρκετά ικανοποιητικά και σε πολύ μεγάλο βαθμό την θεωρητική ροπή ($M_{\theta} = M_{u,Rd}$). Μεγαλύτερη σύγκλιση των αποτελεσμάτων μεταξύ των δυο ροπών, παρουσιάζεται στις διατομές 80x80x4 και 100x100x4. Μεγαλύτερη απόκλιση παρουσιάζεται στις δυο δοκιμές της πειραματικής ροπής M_{max1} , στη διατομή 50x50x2.

Πίνακας 28: Υπολογισμός μέσης τιμή δοκιμών, για κάθε διατομή, για την ροπή M_{max2} .

| Διαστάσεις Διατομής | M_θ | $(M_\theta/M_\theta)*100$ | M_π | | $M_{\pi,aver}$ | $(M_{aver}/M_\theta)*100$ | |
|------------------------|------------|---------------------------|------------|----------------|----------------|---------------------------|----------|
| 50x50x2 | 1.04 | 100 | M_{max2} | 1 ^η | 1.160 | 1.1857 | 114.0096 |
| | | | | 2 ^η | 1.210 | | |
| 80x80x4 | 5.16 | 100 | M_{max2} | 1 ^η | 4.576 | 4.6349 | 89.73819 |
| | | | | 2 ^η | 4.693 | | |
| 100x100x4 | 8.32 | 100 | M_{max2} | 1 ^η | 7.861 | 7.75435 | 93.21143 |
| | | | | 2 ^η | 7.648 | | |

Με τον Πίνακα 28 δημιουργήθηκε η Εικόνα 35, η οποία δίνει την συνολική εικόνα, για κάθε διατομή, της σχέσης πειραματικής – θεωρητική ροπής. Επιπλέον, παρουσιάζεται και η μέση τιμή, για κάθε δοκίμιο, για την M_{max2} (ροπή για επιβολή δυο φορτίων), η οποία προσδίδει καλύτερα αποτελέσματα.



Εικόνα 35: Σχέση Πειραματικής Ροπής - Μέσων Τιμών της Πειραματικής Ροπής M_{max2} - Θεωρητικής Ροπής

Στην Εικόνα 35, όλες οι διατομές προσεγγίζουν αρκετά ικανοποιητικά και σε πολύ μεγάλο βαθμό την θεωρητική ροπή ($M_\theta = M_{u,Rd}$). Μεγαλύτερη σύγκλιση των αποτελεσμάτων μεταξύ των δυο ροπών, παρουσιάζεται στις διατομές 80x80x4 και 100x100x4. Μεγαλύτερη απόκλιση παρουσιάζεται στη διατομή 100x100x2. Μεγαλύτερη απόκλιση παρουσιάζεται στις δυο δοκιμές της πειραματικής ροπής M_{max1} , στη διατομή 50x50x2.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μέσα από την πειραματική διαδικασία, δημιουργήθηκαν Εικόνες, οι οποίες καθορίζουν την σχέση της θεωρητικής ροπής (M_{θ}) με την μέγιστη πειραματική ροπή για επιβολή, ενός φορτίου (M_{max1}) και δυο φορτίων (M_{max2}).

Απώτερος σκοπός, ήταν να εξετάσουμε την συσχέτιση μεταξύ των θεωρητικών ροπών (M_{θ}), όπως αυτές προκύπτουν από τον ΕΚ 9, και των αντίστοιχων αντοχών (M_{max1} και M_{max2}), που υπολογίζονται από πειραματικές διατάξεις.

Η σχέση μεταξύ των δυο, είναι αλληλένδετη και εξαρτώμενη από πολλούς παράγοντες. Για την διεξαγωγή των πειραμάτων και για την διεκπεραίωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας, εξετάστηκε η σχέση μεταξύ των ροπών όταν μεταβάλλονται μόνο οι διαστάσεις της διατομής. Οι Εικόνες 30, 31, 32, 33, 34, 35 βοήθησαν στο να γίνει πιο ξεκάθαρη και πιο κατανοητή η σχέση που έχουν οι δυο ροπές.

Θα ήταν πραγματικά ουτοπικό, αν κανείς περίμενε να υπάρχει πλήρης ταύτιση των δυο αποτελεσμάτων. Αυτό όμως που σίγουρα θα περίμενε κανείς να παρατηρήσει, θα ήταν μια πλήρης συσχέτιση μεταξύ των δυο μεγεθών, πράγμα που επιτεύχθηκε σε αρκετά μεγάλο βαθμό. Τα αποτελέσματα από τις Εικόνες που δίνουν την σχέση θεωρητικής - πειραματικής ροπής, είναι αρκετά ικανοποιητικά αφού οι αποκλίσεις που παρουσιάζουν είναι εντός των επιτρεπτών ορίων (δεν ξεπερνά σχεδόν καμία τιμή το 10%). Παρατηρείται ότι σε μερικές περιπτώσεις η απόκλιση είναι μεγαλύτερη, απ' ό,τι σε άλλες. Πιθανοί λόγοι που παρατηρούνται αυτές οι αποκλίσεις αναφέρονται πιο κάτω:

- Η μια από τις δυο στηρίξεις, της μηχανής κάμψης, στην οποία στηρίζονταν τα δοκίμια, είχε ελευθερία κίνησης στον ένα από τους δυο άξονες, σε αντίθεση με την άλλη στήριξη η οποία ήταν πακτωμένη κι έτσι δεν επέτρεπε καμία κίνηση σε κανένα άξονα. Το γεγονός αυτό, μπορεί να είχε άμεση επίπτωση στην ένδειξη της φόρτισης, δηλαδή μπορεί να ήταν είτε μεγαλύτερη είτε μικρότερη από αυτή που θα έδειχνε το μηχάνημα κάμψης αν δεν είχε κίνηση στον ένα άξονα η εν λόγω στήριξη. Είναι πιθανόν, να είναι αυτός ο λόγος που οι μικρές διατομές δηλ. 50x50x2 και 80x80x4, να παρουσίαζαν μεγαλύτερες διακυμάνσεις της πειραματικής τιμής της ροπής από αυτές της θεωρητικής, αφού αυτές οι διατομές είχαν μικρότερη επιφάνεια επαφής με την στήριξη και επομένως μεγαλύτερες αποκλίσεις.

- Στο τέλος της κάθε δοκιμής, παρατηρήθηκε μεγαλύτερη παραμόρφωση στην μια από της δυο πλευρές του δοκιμίου, που στηριζόταν / εδραζόταν το έμβολο επιβολής φορτίου. Επομένως, είναι πολύ πιθανόν τα αποτελέσματα που μας έδινε η μηχανή κάμψης να ήταν υπό ή υπέρ εκτιμημένα σε σχέση με την θεωρητική τιμή που έδινε ο ΕΚ 9.
- Το μήκος του άνοιγμα το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων ήταν 60 cm. Παρόλο που είναι γενικά αποδεκτό ότι αυτό είναι αντιπροσωπευτικό για πειραματικές διατάξεις, δεν είναι ταυτόσημο με πραγματικές κατασκευές, με αποτέλεσμα η πειραματική ροπή να παρουσιάζει διαφοροποιήσεις σε σχέση με την θεωρητική ροπή. Το άνοιγμα είναι άμεσα συνδεδεμένο με την πειραματική ροπή, αφού μέσα στην στατική εξίσωση για τον υπολογισμό της το μήκος του ανοίγματος χρησιμοποιείται.
- Στις πειραματικές διαδικασίες είναι πραγματικά αδύνατη η αποφυγή του ανθρώπινου λάθους. Η έναρξη οποιασδήποτε πειραματικής διαδικασίας, είναι ήδη καταδικασμένη στην διακύμανση των αποτελεσμάτων από αυτό που περιμένει κανείς να παρατηρήσει, αφού ο ανθρώπινος παράγοντας είναι πάντα παρόν με αποτέλεσμα να διασφαλίζει την ύπαρξη σφάλματος στα αποτελέσματα της.

Γενικά, τα αποτελέσματα από τα διαγράμματα είναι αρκετά ικανοποιητικά, αφού οι τιμές της θεωρητικής και της πειραματικής ροπής συγκλίνουν με μέγιστη απόκλιση 10%. Επομένως, μπορεί κανείς να θεωρήσει ότι ο ΕΚ 9 προσεγγίζει κατά πολύ την πραγματική κατάσταση του αλουμινίου, όταν αυτό βρίσκεται υπό την επίδραση καμπτικής δύναμης. Μήπως ο ΕΚ 9, προσεγγίζει εξ' ίσου ικανοποιητικά και τους υπόλοιπους ελέγχους σε ότι αφορά τις οριακές καταστάσεις αστοχίας του αλουμινίου; Ακόμη μια πρόκληση τίθεται και περιμένει τις δικές της απαντήσεις. Απαντήσεις που πολύ πιθανόν να διευρύνουν τους ορίζοντες στην Πολιτική Μηχανική, μιας και θα δώσουν νέα πνοή στα δομικά υλικά της κατασκευαστικής βιομηχανίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσση

Baniotopoulo, C. C., (2007). Desing of Wind Sensitive Structures, CISM Courses and Lectures No. 493: Wind effects on buildings and desing of wind-sensitive structures, ed. Stathopoulos T. and Baniotopoulos C. C., *Springer Wien New York*, 201-227.

Baniotopoulos , C. C., Zygomas, M., Efthimiou, E., (2006). “Numerical study of the structural behaviour of a reference aluminium bolted joint under tension”, *Proceedings of the 2nd Internasional Conference on Nonsmooth ad Nonconvex Mechanics with Applications in Engineering*, ed. Baniotopoulos C. C., Thessaloniki, 533-540

De Matteis, G., Mazzolani, F. M. and Mandara, A. (1999c). “Experimental verification of FEM models for steel t-stub joints”, *Proceedings of the Conference Eurosteel '99*, Praha.

De Matteis, G., Landolfo, R., and Mazzolani, F.M. (2001a). “Experimental Analysis of Aluminium T-Stubs: Framing of the Research Activity”, *Proceedings of the 8th INALCO 2001 International Conference on Joints in Aluminium Munich*, Germany.

De Matteis, G., Mandara, A. and Mazzolani, F. M. (2001b). “Calculation Methods for Aluminium T-Stubs: a revision of EC3 ANNEX J”, *Proceedings of the 8th INALCO 2001 International Conference on Joints in Aluminium Munich*, Germany.

De Matteis, G., Mandara, A. and Mazzolani, F. M. (2002b). “Design of aluminium T-stub joints: calibration of analytical methods”, *Proceedings of the 3rd European Conference on Steel Structures “Eurosteel”*, Coimbra.

De Matteis, G., Della Corte, G. and Mazzolani, F. M. (2003). “Experimental analysis of aluminium T-stubs: tests under cyclic loading”, *Proceedings of the International Conference on Advances in Structures-Steel, Concrete, Composite and Aluminium (ASSCCA '03)*, Sydney, Australia.

De Matteis, G., Moen, L. A., Hopperstad, O. S., Landolfo, R., Langseth, M. and Mazzolani, F.M. (1999b). “A Parametric Study on the Rotational Capacity of Aluminium Beams Using

non-linear FEM". *Proceedings of the International Conference on Steel and Aluminium Structures*, Espoo, Finland.

Efstathiades, Ch., Zygomalas, M., Baniotopoulos, C. C., (2003). "Glass aluminium curtain walls: System optimization with respect to serviceability criteria". *Proceedings of the 10th International Conference on Metal Structures*, Timisoara, 282-289.

Efstathiades, O. Ch., Baniotopoulos, C. C., Nazarko, L., Ziemanski, Stavroulakis, G.E., (2007). "Towards applications of Neural Networks techniques for the Structural Health Monitoring in curtain-wall systems", *Engineering Structures*, 3475-3484.

Efstathiades, O. Ch., Charalampous, A., Efthimiou, E., Baniotopoulos, C.C., (2009). "Refurbishment of historical buildings by using steel and aluminium. The case study of the Municipal Library of Limassol, Cyprus", *Protections of Historical Buildings by reversible mixed technologies PROHITECH09*, Rome, CRC Press Taylor & Francis Group London, Volume 1, 917-922.

Efstathiades, Ch., (2009). "Recent Advances in aluminium Structures – Eurocods 9", *Bulletin of Cyprus Scientific and Technical Chamber*, Cyprus. Republication from Bulletin of Cyprus Association of Civil Engineers (December 2009) and Cyprus Daily Newspaper "Xaravgi" (06/08/2009)

Efstathiades, Ch., Esposto, M., Campitiello F., (2009). "Light gauge framing in steel buildings: Seismic Resistance Effectiveness and Sustainability", *Proceedings of Early Stage Researches Training School "Sustainability in Structures and Structural Interventions"*, Thessaloniki, European Science Foundation, (in press).

Efthimiou, E., Efstathiades, Ch., Baniotopoulos, C. C., (2008). "On the use of aluminium and steel in the refurbishment of historical buildings. Structural aspects and sustainability criteria", *Proceedings of the 5th European Conference on Steel and Composite Structures-Eurosteel 2008*, Graz, Austria, 3-5 September 2008, Vol. B, 1257-1262.

Efthimiou, E., Kozlowski, A., Plewako Z., Efstathiades, Ch., Ermolli, S., (2011). “Sustainable steel and aluminium structures”, *Proceedings of International Conference “Towards a better built environment”*, Innsbruck, Austria, 3-5 February 2011.

Höglund, T. (2008). “Design of Members”, *Royal Institute of Technology*, Stockholm.

Höglund, T., Nilsson L. (2005). “Aluminium bridges in Sweden”, Report given by the Authors.

Landolfo, R. and Mazzolani, F.M. (1995). “Different approaches in the design of slender aluminium alloy sections”, *Proceedings of ICSAS '95*, Istanbul.

Mandara, A. and Mazzolani, F.M. (1989). “On the stability of aluminium alloy cylindrical shells under axial compression”, *Costruzioni Metalliche* n. 2-3

Mandara, A. and Mazzolani, F.M. (1995). “Behavioural aspects and ductility demand of aluminium alloy structures”, *Proceedings of ICSAS '95*, Istanbul.

Mandara, A., Mazzolani, F.M. and Mele, E. (1992). “Fatigue of aluminium alloy joints: comparison of codification”, *Proceedings of the 5th INALCO '92, International Conference on Aluminium Weldments*, Munich.

Mazzolani, F.M. and Valtinat, G. (1992). “Bars, beams and beam columns, Aluminium Structural Analysis”, *Recent European Advances*, Elsevier Applied Science.

Mazzolani, F. M. (1994). “Aluminium Alloy Structures (second edition)”, E & FN SPON, an imprint of Chapman & Hall, London.

Mazzolani, F.M. (1995a). “Stability problems of aluminium alloy members: the ECCS methodology”, in *Structural Stability and Design* (edited by S. Kitipornchai, G.J. Hancock & M.A. Bradford), Balkema, Rotterdam

Mazzolani, F. M. (1998a). “Design Principles for Aluminium Structures”, *Stahlbau Spezial: Aluminium in Practice*, Ernst & Sohn.

Mazzolani, F. M. (1999a). “Design Codes for Aluminium Structures” (Keynote lecture), Chaire Aluminium 1999 (Aluminium & Structures), Liege.

Mazzolani, F.M. (1999b). “The structural use of aluminium: Design and Applications (Keynote lecture)”, *Proceedings of the International Conference on Steel and Aluminium Structures*, Espoo, Finland.

Mazzolani, F.M. and Grillo, M. (1995). “Fatigue strength of longitudinally welded aluminium alloy structures”, *International Conference on Aluminium Weldments*, Cleveland, Ohio, USA.

Mazzolani F. M. Mazzolani S. M., Mandara A., (2000). “Aluminium Structures in the Restoration Project of Mercati Traianei in Rome”, *Proc.of the 5th Int. Congress on the Restoration of Architectural Heritage*, Firenze.

Mazzolani, F.M. and Piluso, V. (1995). “Prediction of rotation capacity of aluminium alloy beams”, *Proceedings of ICSAS '95*, Istanbul

Mazzolani, F.M., Piluso, V. and Rizzano, G.V. (1997c). “Numerical simulation of aluminium stocky hollow members under uniform compression”, *Proceedings of the 5th Int. Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures*, SDSS '97, Nagoya.

Mazzolani F.M., Piluso V. and Rizzano G. (2001b). “Experimental Analysis of Aluminium Alloy Channels Subjected to Local Buckling under Uniform Compression”, *Proceedings of the C. T. A. “Giornate Italiane della Costruzione in Acciaio”*, Isola di S. Giorgio Maggiore, Venezia.

Mazzolani, F.M., Piluso, V. and Rizzano, G. (2003c): Local buckling of aluminium alloy angles under uniform compression: experimental analysis, C. T. A. “Giornate Italiane della Costruzione in Acciaio”, Genova.

Mazzolani, F.M. and Mandara, A. (2004). “Buckling of aluminium shells: proposal for european curves”, *Proceedings of the ICTWS 2004, 4th International Conference on Thin-Walled Structures*, Loughborough Leicestershire.

Mazzolani, F.M., Mandara, A. and De Matteis, G. (2000b). “T-stub Aluminium Joints: Influence of Behavioural Parameters”, *Computers and Structures* n. 78, PERGAMON, p. 311-327.

Mazzolani, F.M. ed. (2003a). “Aluminium Structural Design”, CISM 2003, Springer- Verlag, Wien, New York.

Mazzolani, F.M. (2003b). Chapter I: “Design Criteria for Aluminium Structures: Technology, Codification and Applications”, from *Aluminium Structural Design* (CISM course n. 443), ed. F.M. Mazzolani, Springer – Verlag, Wien, New York.

Mazzolani, F.M., Faella, C., Piluso, V. and Rizzano, G. (1996a). “Experimental analysis of aluminium alloy SHS-members subjected to local buckling under uniform compression”, *5th Int. Colloquium on Structural Stability*, SSRC, Brazilian Session, Rio de Janeiro.

Mazzolani, F.M., Faella, C., Piluso, V. and Rizzano, G. (2000a). “Local Buckling of Aluminium Members: Testing and Classification”, *Journal of Structural Engineering*, March 2000, p. 253.

Soetens, F., Hove, D. V., Maljaars, J., Janssen, E., Mennink, J., (2005). “Floating Aluminium Roads”, *Proc. of the IABSE Symposium on Structures and Extreme Events*, Lisbon, 2005.

Valencia G., Clement G. (2004). “Recent aluminium roof structures in Columbia”, Proc. of the Conference in Honour of Professor Victor Gioncu, Timisoara.

Eurocodes: Building the future, EN 1999: “Design of aluminium structures”, <<http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/showpage.php?id=139>> (Mar. 15, 2011)

Ελληνική

Βασιλείου, Κ. Λ., (2010). «Κάμψης», Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Εργαστήριο Μηχανικής ΙΙ, ΑΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ, Νοέμβριος 2010.

Γαλανός, Ευθύμιος, (2009). “Οι Ευρωκώδικες στις Κατασκευές”, PhD Διευθύνων Σύμβουλος ΕΛΟΤ, <https://sales.elot.gr/announcement/ELOT_GALANOS.pdf> (Μάρ. 11, 2011)

Ελληνική Βιομηχανία Αλουμινίου, «Ιδιότητες αλουμινίου», <http://www.elval.gr/default.asp?pid=179&la=1> (Μάρτ. 10, 2011)

Ευρωκώδικας 9 : «Σχεδιασμός κατασκευών από αλουμίνιο», *Μέρος 1-1 : Γενικοί κανόνες και κανόνες για κτίρια.*

Θωμόπουλος, Κ., (2000). «Σημειώσεις σχεδιασμού κατασκευών από αλουμίνιο σύμφωνα, με τον Ευρωκώδικα 9», Μέρος 1.1., Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Υπηρεσία Δημοσιευμάτων, Θεσσαλονίκη.

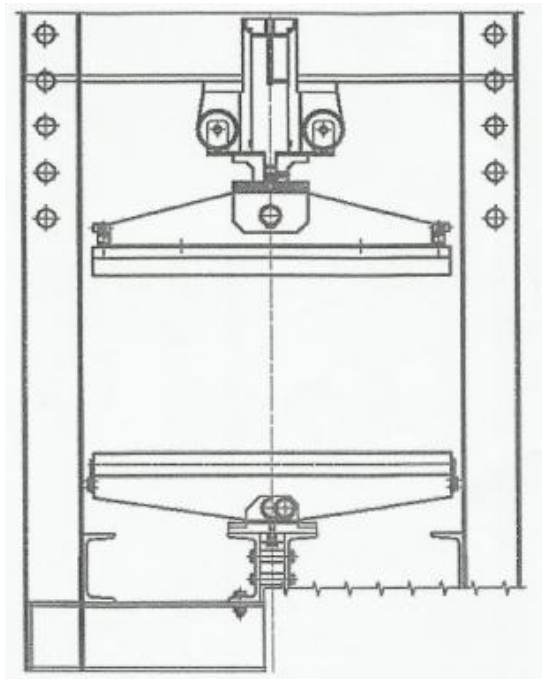
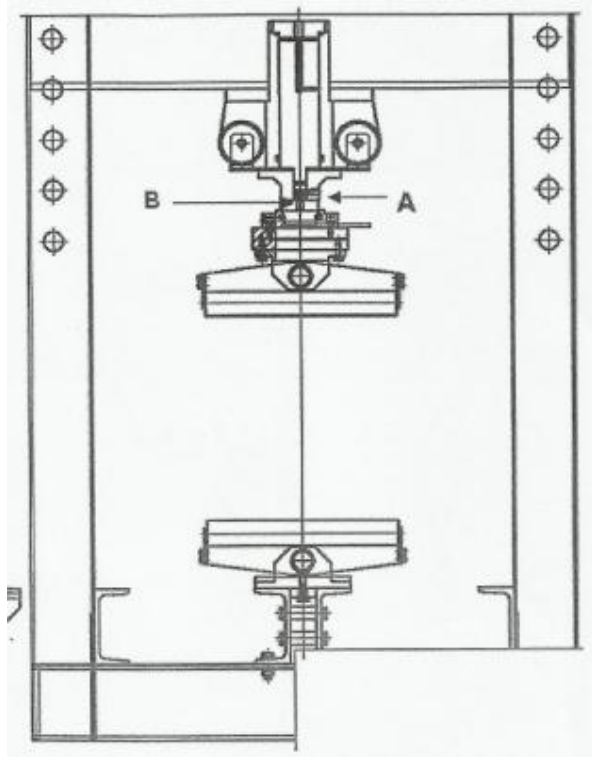
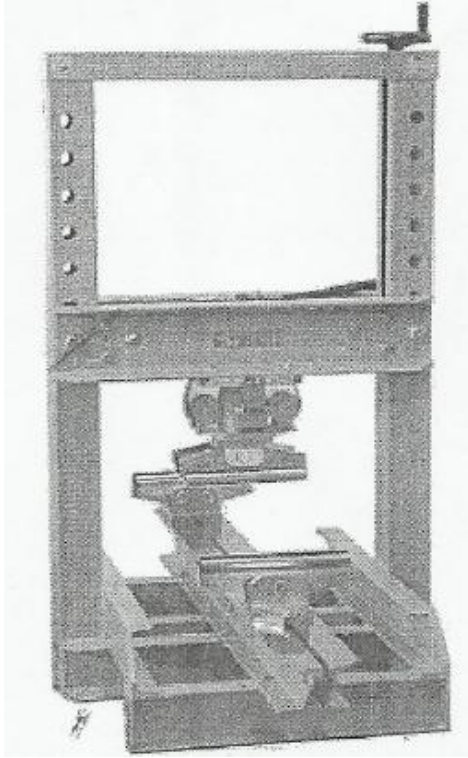
Μπανιωτόπουλος, Χ. Κ., (2003). «Συνδέσεις Μεταλλικών Κατασκευών στα πλαίσια των Ευρωκωδίκων 3 & 9», Εκδόσης ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη.

Μπανιωτόπουλος, Χ. Κ., (2006). “Αλουμίνιο & σύγχρονες εφαρμογές”, Διευθυντή Εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ, <<http://www.aluminium.gr/pdf/pdf-DOMHSH/06/122.pdf>> (Μάρτ. 8, 2011)

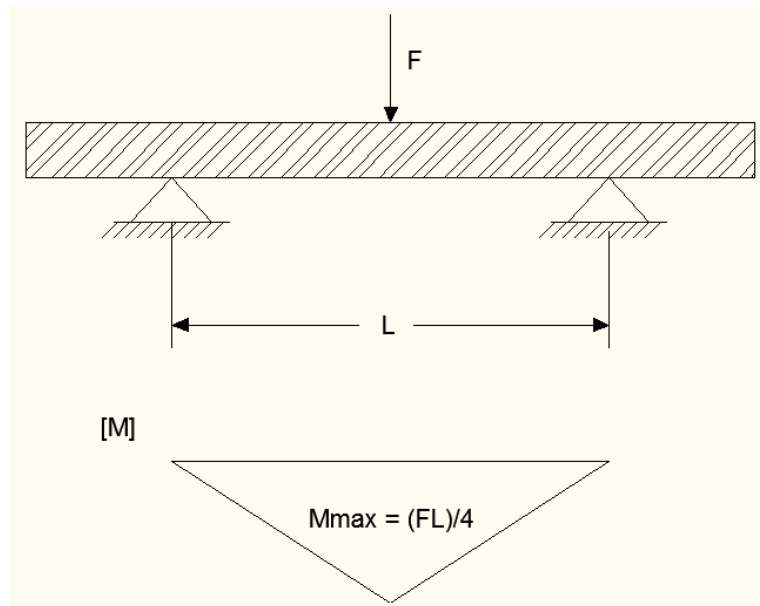
Σπιτικόπουλος, Πέτρος, (2004). “Ανακύκλωση Αλουμινίου”, Α.Τ.Ε.Ι. Χαλκίδας-ΣΤΕΦ-Τμήμα Ηλεκτρολογίας, <http://www.ee.teihal.gr/labs/pkoukos/Documentation/ptyxiaki_ergasia_anakyklvsi_alouminiou.pdf>, (Μάρτ. 3, 2011)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

1. Συσκευή «CONTROLS, 50-C1400/*-50-C1401/*»

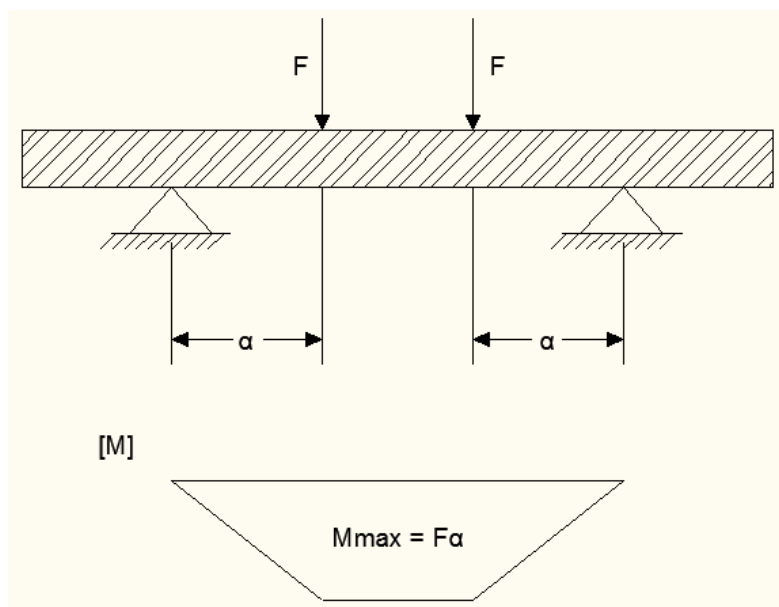


2. Διατάξεις φορτίσεων



Εικόνα 36: Διάταξη φόρτισης για επιβολή ενός φορτίου.

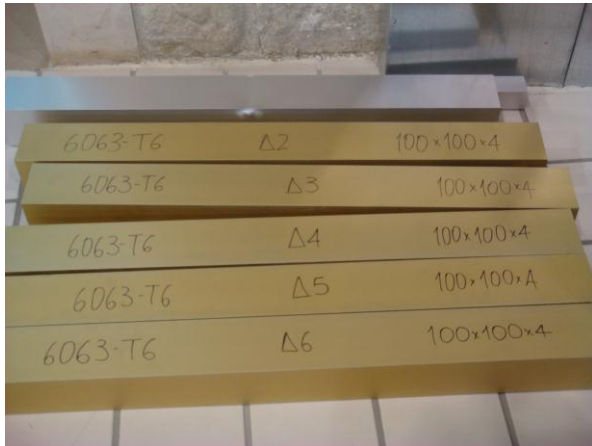
Στην Εικόνα 15 παρουσιάζεται και το διάγραμμα ροπών που δίνει την μέγιστη ροπή για επιβολή ενός φορτίου.



Εικόνα 37: Διάταξη φόρτισης για επιβολή δυο φορτίων

Στην Εικόνα 16 παρουσιάζεται και το διάγραμμα ροπών που δίνει την μέγιστη ροπή για επιβολή δυο φορτίων.

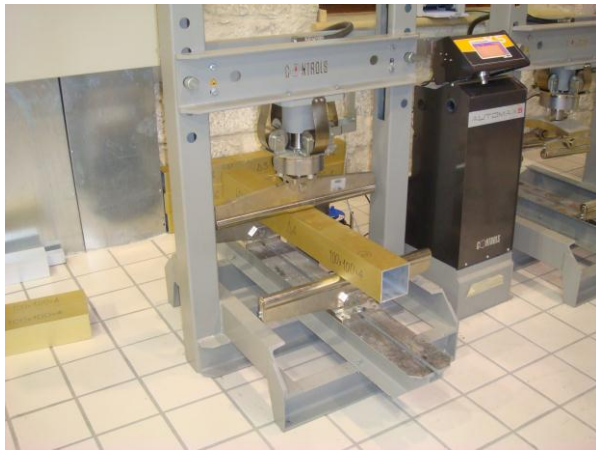
3. Φωτογραφικό υλικό από την πειραματική διαδικασία



Εικόνα 38: Δοκίμια διατομής 100x100x4



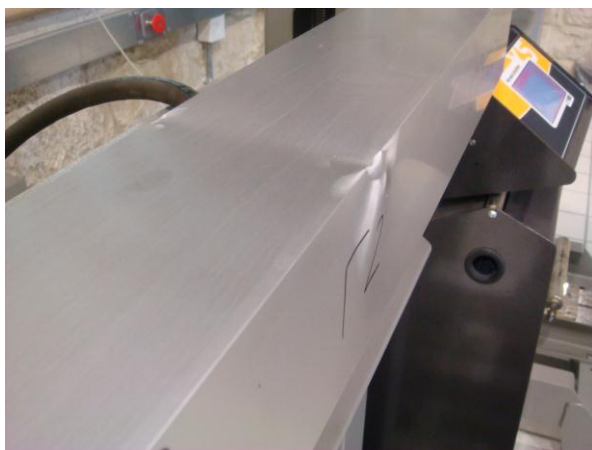
Εικόνα 39: Υποβολή δοκιμίου 100x100x4, σε διπλή φόρτιση, στη μηχανή «CONTROLS, 50-C1400/*-50-C1401/*»



Εικόνα 40: Υποβολή δοκιμίου Δ4, 100x100x4, σε μια φόρτιση, στη μηχανή «CONTROLS, 50-C1400/*-50-C1401/*»



Εικόνα 41: Παραμόρφωση δοκιμίου Δ4, 100x100x4, υπό την επιβολή ενός φορτίου



Εικόνα 42: Παραμόρφωση δοκιμίου Γ2, 100x100x2, υπό την επιβολή ενός φορτίου



Εικόνα 43: Υποβολή δοκιμίου B1, 80x80x4, σε μια φόρτιση, στη μηχανή «CONTROLS, 50-C1400/*-50-C1401/*»



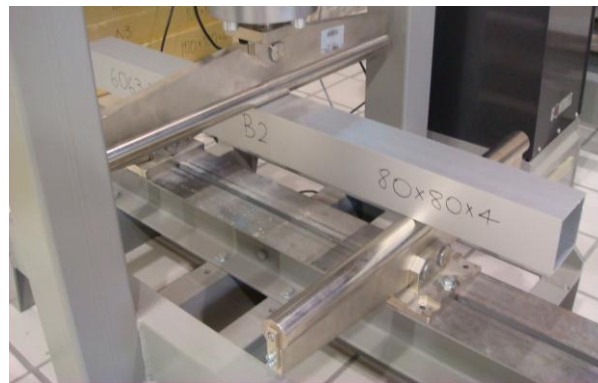
Εικόνα 44: Παραμόρφωση δοκιμίου B1, 80x80x4, υπό την επιβολή ενός φορτίου



Εικόνα 45: Παραμόρφωση δοκιμίου B1, 80x80x4



Εικόνα 46: Παραμόρφωση δοκιμίου B1, 80x80x4



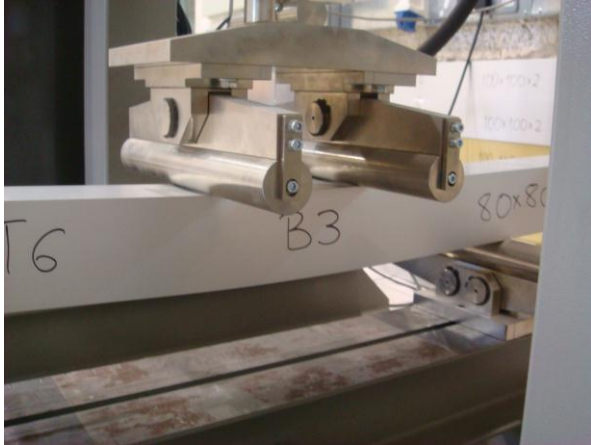
Εικόνα 47: Υποβολή δοκιμίου B2, 80x80x4, σε μια φόρτιση, στη μηχανή «CONTROLS, 50-C1400/*-50-C1401/*»



Εικόνα 48: Παραμόρφωση δοκιμίου B2, 80x80x4



Εικόνα 49: Παραμόρφωση δοκιμίου B2, 80x80x4



Εικόνα 50: Υποβολή δοκιμίου B3, 80x80x4, σε διπλή φόρτιση, στη μηχανή «CONTROLS, 50-C1400/*-50-C1401/*»



Εικόνα 51: Παραμόρφωση δοκιμίου B3, 80x80x4



Εικόνα 52: Παραμόρφωση δοκιμίου B3, 80x80x4



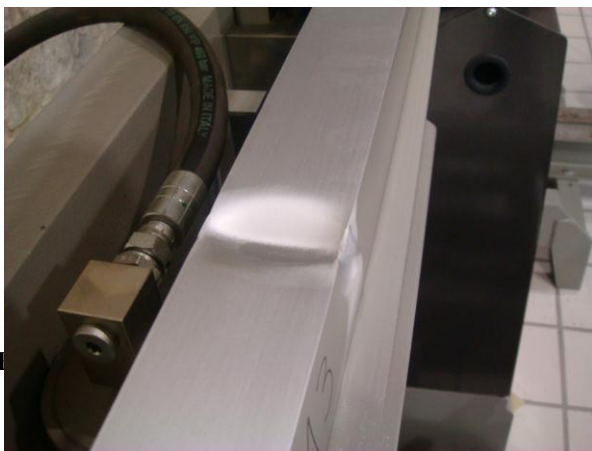
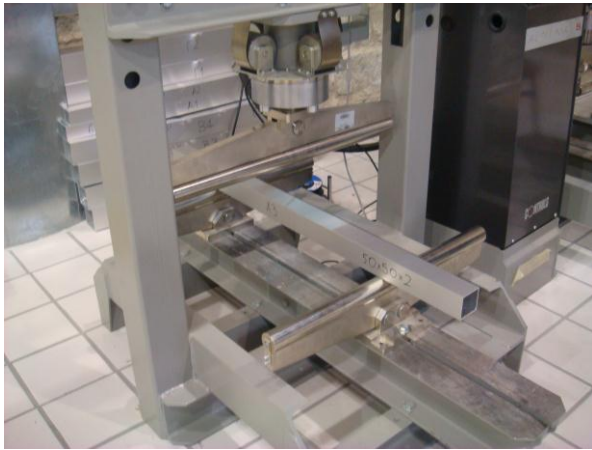
Εικόνα 53: Παραμόρφωση δοκιμίου B4, 80x80x4



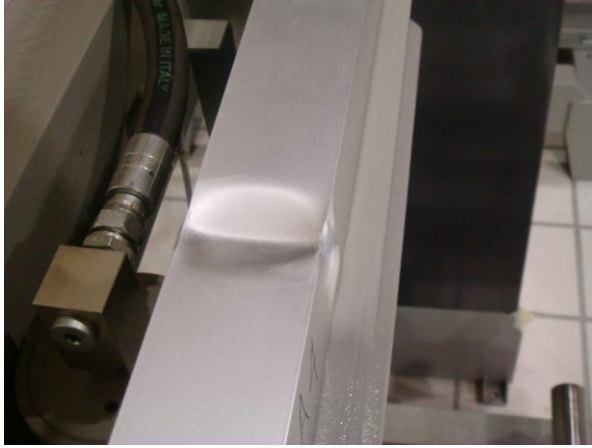
Εικόνα 54: Παραμόρφωση δοκιμίου B4, 80x80x4



Εικόνα 55: Παραμόρφωση δοκιμίου A1, 50x50x2



50x2, σε μια
50-C1400/*-



A4, 50x50x2