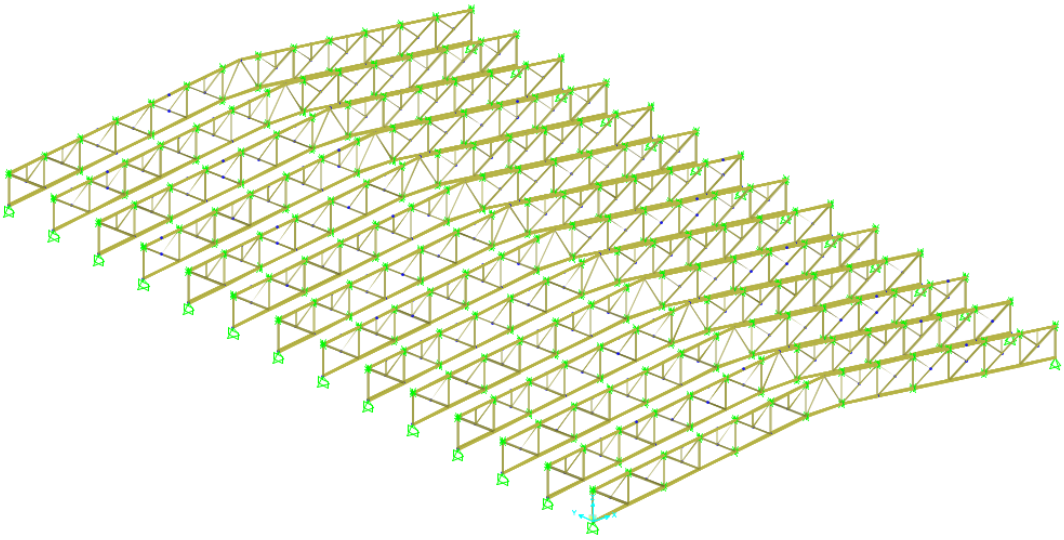
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Συγκριτική μελέτη στέγης με φέροντα οργανισμό από χάλυβα και αλουμίνιο



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Γ. Χαιρέτης

Επιβλέπων: Γεώργιος Ιωαννίδης

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

ΕΜΚ ΔΕ 2012/30

Χαιρέτης Ν. Γ. (2012).
Συγκριτική μελέτη στέγης με φέροντα οργανισμό από χάλυβα και αλουμίνιο
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2012/30
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Περιεχόμενα

Περίληψη ... 6
Abstract ... 7
Ευχαριστίες ... 8
1 Σημαντικές ιδιότητες και εφαρμογές του αλουμινίου ... 9
1.1 Γενικά ... 9
1.2 Ιστορία του δομικού αλουμινίου ... 10
1.3 Η αποδοχή του αλουμινίου από τη βιομηχανία ... 11
1.4 Φυσικές ιδιότητες του αλουμινίου ... 12
1.4.1 Ατομική δομή ... 12
1.4.2 Κρυσταλλική δομή ... 12
1.4.3 Πυκνότητα ... 12
1.4.4 Ηλεκτρική αγωγιμότητα ... 13
1.4.5 Μη μαγνητικότητα ... 13
1.4.6 Θερμική αγωγιμότητα ... 13
1.4.7 Αντοχή στη διάβρωση ... 14
1.4.8 Θερμική διαστολή ... 16
1.4.9 Θερμοκρασία τήξεως ... 16
1.5 Εφαρμογές αλουμινίου ... 17
1.5.1 Παραδείγματα εφαρμογών ... 19
2 Παράγωγή αλουμινίου και εφαρμοζόμενες τεχνολογίες ... 22
2.1 Παραγωγή πρωτόχυτου και δευτερόχυτου αλουμινίου ... 22
2.1.1 Η αλουμίνα και οι μέθοδοι παραγωγής της ... 23
2.2 Διαδικασία παραγωγής προϊόντων έλασης ... 24
2.2.1 Γενικά ... 24
2.2.2 Θερμή έλαση ... 24
2.2.3 Ψυχρή έλαση ... 24
2.2.4 Προϊόντα έλασης ... 25
2.3 Διέλαση ... 26
2.3.1 Γενικά ... 26
2.3.2 Ταξινόμηση των μεθόδων διέλασης ... 27
2.3.3 Φάσεις της διέλασης ... 27
2.4 Σκλήρυνση του αλουμινίου ... 28
2.4.1 Γενικά ... 28
2.4.2 Σκλήρυνση με κραματοποίηση ... 28
2.4.3 Εργοσκλήρυνση ... 29
2.4.4 Σκλήρυνση με κατακρήμνιση ... 30

2.5 Συγκόλληση αλουμινίου ... 31
2.5.1 Γενικά ... 31
2.5.2 Συγκόλληση MIG ... 31
2.5.3 Συγκόλληση TIG ... 32
3 Κράματα του αλουμινίου ... 33
3.1 Γενικά ... 33
3.2 Ιδιότητες των πρόσθετων στοιχείων ... 34
3.3 Ονοματολογία των σφυρήλατων κραμάτων ... 35
3.4 Ονοματολογία των κραμάτων χύτευσης ... 35
3.5 Αριθμητική και χημική ονοματολογία των κραμάτων ... 36
3.6 Καταστάσεις σκλήρυνσης και ονομασία καταστάσεων σκλήρυνσης ... 37
3.6.1 Γενικά ... 37
3.6.2 Καταστάσεις σκλήρυνσης μη θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων ... 37
3.6.3 Καταστάσεις σκλήρυνσης θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων ... 38
3.7 Κράματα και καταστάσεις σκλήρυνσης που αναφέρονται στον ΕΚ 9 ... 39
3.7.1 Γενικά ... 39
3.7.2 Σφυρήλατα κράματα ... 40
3.7.3 Κράματα χύτευσης ... 43
3.8 Πρακτικές αντιλήψεις για την επιλογή υλικών ... 43
3.8.1 Φύλλα, πλάκες και διελάσεις ... 43
3.9 Φυσικές ιδιότητες απαραίτητες για το σχεδιασμό ... 45
3.9.1 Γενικές φυσικές ιδιότητες ... 45
3.9.2 Ζώνη θερμικής επιρροής (HAZ) ... 46
4 Οριακές καταστάσεις για χάλυβα και αλουμίνιο ... 49
4.1 Γενικά ... 49
4.2 Αντοχή διατομών ... 49
4.2.1 Εφελκυσμός ... 49
4.2.2 Θλίψη ... 50
4.2.3 Μονοαξονική (ή απλή) κάμψη ... 51
4.2.4 Τέμνουσα ... 54
4.2.5 Στρέψη ... 56
4.2.6 Κάμψη και διάτμηση ... 57
4.3 Αντοχή των μελών σε λυγισμό ... 57
4.3.1 Μέλη σταθερής διατομής υπό θλίψη ... 57
4.3.2 Μέλη σταθερής διατομής υπό κάμψη ... 63
4.3.3 Μέλη σταθερής διατομής υπό θλίψη και κάμψη ... 66
4.4 Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (SLS) ... 68

5 Παρουσίαση του φορέα και φορτία κατασκευής 70
5.1 Περιγραφή του μεταλλικού ζυγώματος 70
5.2 Γενικά για τα φορτία 71
5.3 Μόνιμες Δράσεις 72
5.4 Μεταβλητές Δράσεις 72
5.4.1 Ωφέλιμα Φορτία 72
5.4.2 Φορτία Χιονιού 73
5.4.3 Φορτία Ανέμου 76
5.4.4 Θερμοκρασιακή Μεταβολή 85
5.5 Συνδυασμοί Δράσεων 86
5.5.1 Οριακές Καταστάσεις σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1 86
5.5.2 Συνδυασμοί δράσεων κτιρίου 88
6 Προσομοίωμα στο SAP2000 92
6.1 Παρουσίαση SAP2000 92
6.2 Μοντέλο προσομοίωσης 93
7 Διαστασιολόγηση μελών ζυγώματος για χάλυβα και αλουμίνιο 95
7.1 Διαστασιολόγηση χαλύβδινου ζυγώματος 95
7.1.1 Γενικά 95
7.1.2 Άνω πέλμα 96
7.1.3 Κάτω πέλμα τμήμα 1 97
7.1.4 Κάτω πέλμα τμήμα 2 98
7.1.5 Κύρια κατακόρυφα τμήμα 1 99
7.1.6 Κύρια κατακόρυφα τμήμα 2 100
7.1.7 Κύρια διαγώνια τμήμα 1 101
7.1.8 Κύρια διαγώνια τμήμα 2 102
7.1.9 Κύρια διαγώνια τμήμα 3 103
7.1.10 Κύρια διαγώνια τμήμα 4 104
7.1.11 Δευτερεύοντα διαγώνια 105
7.1.12 Δευτερεύοντα κατακόρυφα 106
7.2 Διαστασιολόγηση ζυγώματος αλουμινίου 107
7.2.1 Γενικά 107
7.2.2 Διαστασιολόγηση μελών 108
7.3 Έλεγχος βελών στην Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας 113
7.3.1 Έλεγχος σε κατακόρυφα βέλη κάμψης 113
7.3.2 Έλεγχος σε οριζόντια μετατόπιση 114
8 Συμπεράσματα 115
9 Βιβλιογραφία 118

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2012/30

Συγκριτική μελέτη στέγης με φέροντα οργανισμό από χάλυβα και αλουμίνιο

Χαιρέτης Ν. Γ. (Επιβλέπων: Ιωαννίδης Γ.)

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση των χαρακτηριστικών και των παραμέτρων σχεδιασμού ενός νέου σχετικά υλικού για μεγάλες δομικές μεταλλικές κατασκευές, του αλουμινίου, όπως επίσης και η συγκριτική του μελέτη σε σχέση με το κυρίαρχο δομικό υλικό για μεταλλικές κατασκευές, το χάλυβα. Για το σκοπό αυτό γίνεται και μία συγκριτική μελέτη ενός δικτυωτού ζυγώματος στέγης κολυμβητηρίου με χρήση τόσο χάλυβα όσο και αλουμινίου ως υλικά κατασκευής. Η δομή της εργασίας περιλαμβάνει τρία μέρη.

Στο πρώτο μέρος, όπου ανήκουν τα κεφάλαια 1, 2 και 3, γίνεται παρουσίαση των χαρακτηριστικών του αλουμινίου. Ειδικότερα, μετά από μία σύντομη ιστορική αναδρομή, παρουσιάζονται οι σημαντικές φυσικές του ιδιότητες, όπως επίσης και τα πεδία εφαρμογής του, παραθέτοντας παραδείγματα μεγάλων δομικών εφαρμογών. Στη συνέχεια παραθέτονται οι μέθοδοι παραγωγής του και οι κύριες παραγωγικές διαδικασίες των προϊόντων αλουμινίου (έλαση, διέλαση και σκλήρυνση). Ακόμα αναλύονται τα κράματα του αλουμινίου και συγκεκριμένα οι ιδιότητες των πρόσθετων στοιχείων, η ονοματολογία τους και οι καταστάσεις σκλήρυνσης κάθε κράματος (αναφέρονται μόνο τα κράματα που περιλαμβάνονται στον Ευρωκώδικα 9).

Στο δεύτερο μέρος, όπου ανήκει το κεφάλαιο 4, γίνεται συγκριτική παράθεση των βασικών ελέγχων διατομών και μελών χάλυβα και αλουμινίου σε οριακή κατάσταση αστοχίας και λειτουργικότητας, σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες 3 και 9 αντίστοιχα.

Στο τρίτο μέρος, όπου ανήκουν τα κεφάλαια 5, 6 και 7, γίνεται η συγκριτική μελέτη δικτυωτού ζυγώματος στέγης κολυμβητηρίου με χρήση χάλυβα και αλουμινίου, ώστε να καταλήξουμε στο οικονομικότερο υλικό. Το κλειστό κολυμβητήριο στην πραγματικότητα βρίσκεται στην πόλη Barranquilla της Κολομβίας. Τα ζυγώματα του στεγάστρου του κολυμβητηρίου είναι κατασκευασμένα από αλουμίνιο. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, θεωρώ ότι η κατασκευή βρίσκεται στην Ελλάδα, προκειμένου να γίνει η μελέτη με χρήση των Ευρωκωδίκων. Αφού υπολογιστούν τα φορτία της κατασκευής, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης του ζυγώματος μέσω του προγράμματος SAP2000 για την χαλύβδινη κατασκευή και μέσω υπολογισμών στο χέρι, με χρήση των διαγραμμάτων εντατικών μεγεθών από το SAP2000, για την κατασκευή αλουμινίου. Για τις αναλύσεις αυτές έγινε τμηματοποίηση του φορέα σε ομάδες ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη οικονομία.

Τέλος, στο κεφάλαιο 8 παρουσιάζουμε τα συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε από την παρουσίαση των χαρακτηριστικών του αλουμινίου, τη συγκριτική παρουσίαση των ελέγχων σχεδιασμού χάλυβα και αλουμινίου και τη συγκριτική μελέτη του παραπάνω ζυγώματος από χάλυβα και αλουμίνιο.

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

DIPLOMA THESIS
ΕΜΚ ΔΕ 2012/30

Comparative design of a truss rafter roof using steel and aluminium

Chairetis N. G. (supervised by Ioannidis G.)

Abstract

The purpose of this thesis is to present the characteristics and design parameters of a new material for large structural constructions, aluminium, as well as the comparative design of the dominant structural material for constructions, steel. For this purpose we made a comparative design of a truss rafter roof of a swimming pool using both steel and aluminium as structural materials.

In Chapter 1, after a brief historical overview, we present the important physical properties of aluminum, such as atomic and crystal structure, density, etc., as well as an outline of the field of applications covered under the main advantages of aluminium (lightness, corrosion resistance and functionality of component shapes). Moreover examples of large structural applications are cited, mainly abroad, since its use in such applications is not widespread in Greece.

In Chapter 2 we present the methods of production of aluminium (primary and secondary cast) as well as processes of rolling, extrusion and hardening of aluminum products. Even forth also methods of adhesion.

In Chapter 3 we analyze the alloys of aluminum. We analyze the properties of the additional alloying elements, the designation of alloys and the tempers of aluminium alloys as well as the physical properties which are necessary in the design of aluminium constructions. All the above mentioned to alloys on Eurocode 9.

In chapter 4 we present a comparative summary of basic controls for sections and members of steel and aluminium in the ultimate limit state and serviceability limit state, according to Eurocodes 3 and 9 respectively.

In chapter 5 we present the construction we made the comparative design of the roof rafter using steel and aluminium, to select the most economical material. In particular, the indoor pool actually located in Barranquilla, Colombia and belongs to the facilities of university Universidad del Norte. The roof of the pool is made of aluminium. In this thesis, I think the structure is in Greece, in order to make the design according to Eurocodes. In this chapter are calculated the design loads according to Eurocode 1.

In chapter 6, after a brief reference to the software program that is used in this thesis (SAP2000 v.15), is cited the way of body simulation of the truss rafter roof in the program.

In chapter 7 we present the results of analysis of the truss rafter roof through SAP2000 for the steel structure and through calculations by hand, using internal forces diagrams from SAP2000, for the manufacture of aluminum. For these analyses we made groups to achieve greater economy.

Finally, in chapter 8 we present the conclusions we reach by the presentation of the characteristics of aluminium, comparative presentation of checks steel and aluminium design and comparative design of the truss rafter roof of steel and aluminium.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Γεώργιο Ιωαννίδη για την καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της προσπάθειας και που συνετέλεσε σε μεγάλο βαθμό στην ενασχόληση μου με το κλάδο των μεταλλικών κατασκευών.

Επίσης, για την περαίωση της εργασίας αυτής συνέβαλε καθοριστικά και ο κ. Ανδρέας Σπηλιόπουλος με την ουσιαστική βοήθεια του σε διάφορα στάδια της προόδου της παρούσας διπλωματικής.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ τέλος και στην οικογένεια μου Γιώργο, Παγώνα, Μανούσο και Γεωργία που με στηρίζουν όλα αυτά τα χρόνια και σε όλους εκείνους τους φίλους για την ηθική υποστήριξη και υπομονή τους.

1 Σημαντικές ιδιότητες και εφαρμογές του αλουμινίου

1.1 Γενικά

Με ένα ποσοστό 8% το αλουμίνιο είναι, μετά το οξυγόνο και το πυρίτιο, το τρίτο πιο άφθονο στοιχείο στο φλοιό της γης. Σήμερα το αλουμίνιο εξάγεται αποκλειστικά από βωξίτη, αλλά υπάρχει και σε πολλά άλλα μεταλλεύματα. Ωστόσο σήμερα τα γνωστά αποθέματα του βωξίτη είναι επαρκή για περισσότερα από 1000 χρόνια με τους σημερινούς ρυθμούς εκμετάλλευσης. Το αλουμίνιο είναι επιπλέον ένα υλικό εξαιρετικής ανακύκλωσης. Οι απώλειες βάρους κατά την επανάτηξη και η υποβάθμιση της ποιότητας κατά τη διαδικασία της ανακύκλωσης είναι πολύ χαμηλά. Το αλουμίνιο έχει επίσης ένα υψηλό ποσοστό ανακύκλωσης. Όλα αυτά θα οδηγήσουν μια μέρα στη μείωση της εξόρυξης του βωξίτη, αν και η ποσότητα του αλουμινίου που είναι σε χρήση θα αυξηθεί. Πρακτικά δεν υπάρχουν περιορισμοί για τη διαθεσιμότητα του αλουμινίου.

Πολλοί άνθρωποι διαμαρτύρονται για την υψηλή κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή ενός κιλού αλουμινίου. Αυτό είναι αλήθεια, αλλά μόνο η μία πλευρά του νομίσματος. Πέρα από το γεγονός ότι η ενέργεια για την παραγωγή ενός kg αλουμίνιο έχει μειωθεί τα τελευταία 50 χρόνια, το αλουμίνιο εξοικονομεί ενέργεια στο σύγχρονο κυρίαρχο από την τεχνολογία κόσμο μας. Η μείωση του βάρους των σύγχρονων βαγονιών τρένων, αυτοκινήτων και άλλων μεταφορικών συστημάτων με τη χρήση αλουμινίου μειώνει την κατανάλωση καυσίμου τους, ώστε αντισταθμίζεται όχι μόνο το (μερικές φορές υψηλότερο) κόστος αγοράς, αλλά επίσης και η σχετικά υψηλή κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή για πρώτη φορά του αλουμινίου. Λαμβάνοντας υπόψη την πολύ μικρή ποσότητα της ενέργειας που απαιτείται για επανάτηξη του αλουμινίου, συχνά αναφέρεται ότι δεν υπάρχουν μειονεκτήματα.

Σε δομικές κατασκευές το χαμηλό βάρος δεν είναι ο κύριος λόγος για τη χρήση του αλουμινίου, ακόμα κι αν υπάρχουν πολλά παραδείγματα όπου το χαμηλό βάρος είναι μεγάλο πλεονέκτημα:

• Γερανοί, όπου μπορεί να εξοικονομηθεί ενέργεια ή είναι δυνατή μία φθηνότερη κατασκευή ή όταν πρέπει να εγκατασταθεί ένας γερανός μεγαλύτερης χωρητικότητας.

• Σκηνές, όπου το χαμηλό βάρος διευκολύνει τη διαδικασία ανέγερσης και βοηθά στη μείωση του κινδύνου ατυχημάτων.

• Κατασκευές που θα ανεγερθούν σε απομακρυσμένες περιοχές, όπου είναι δυνατή μόνο αεροπορική μεταφορά.

• Κατασκευές όπως σκαλωσιές, όπου το χαμηλό βάρος επιτρέπει τη φόρτωση περισσότερου υλικού σε ένα όχημα ή όπου η εγκατάσταση είναι ταχύτερη.

Ο κύριος λόγος για τη χρήση του αλουμινίου σε κτίρια και σε δομικές κατασκευές εξακολουθεί να είναι η καλή αντιδιαβρωτική συμπεριφορά του. Στις περισσότερες ατμοσφαιρικές συνθήκες δεν είναι αναγκαία επένδυση. Είναι ακόμα συνυπολογισμένα και το κόστος και τα περιβαλλοντικά προβλήματα που υπάρχουν κατά την ανανέωση των οργανικών επικαλύψεων. Αυτό αναγνωρίζεται όλο και περισσότερο από τις αρχές και εξηγεί το μεγάλο αριθμό των πεζογεφυρών αλουμινίου που έχουν εγκατασταθεί τα τελευταία χρόνια στη Γερμανία με ένα αύξοντα ρυθμό.

Εκτός των παραπάνω έχουμε επίσης πολλές δομικές εφαρμογές, όπου η δομή είναι οικονομικά ανταγωνιστική, λόγω της λειτουργικότητας που προσφέρεται από τη χρήση διελασμένων διατομών.

1.2 Ιστορία του δομικού αλουμινίου

Ο άνθρωπος χρησιμοποιεί μέταλλα εδώ και περίπου 7 χιλιάδες χρόνια. Τα 200 χρόνια από τη βιομηχανική επανάσταση και τα περίπου 100 από τη βιομηχανική παραγωγή του αλουμινίου, μοιάζουν σαν ένας κόκκος άμμου στην κλεψύδρα της ιστορίας. Σε αντίθεση με το χαλκό, το χρυσό και το σίδηρο, το αλουμίνιο δεν υπάρχει στην φύση σε απλές χημικές ενώσεις εύκολα διασπάσιμες, επομένως η απομόνωση του μετάλλου αυτού καθυστέρησε ιδιαίτερα. Η ανακάλυψή του, αλλά και η παραγωγή του, έγινε δυνατή μόνο μετά την ανακάλυψη και ευρεία χρήση του ηλεκτρισμού και μόνο όταν η χημεία αποχωρίστηκε από το φάντασμα της αλχημείας.

Αν και το αλουμίνιο δεν έγινε γνωστό παρά μόνο στις αρχές του 19^{ου} αιώνα, παρόλα αυτά χρησιμοποιήθηκε από την αρχαιότητα, με τη μορφή της αργίλου, ως πρώτη ύλη για την κατασκευή αγγείων, αλάτων περιέχοντα αλουμίνιο για βαφές και φαρμακευτικών παρασκευασμάτων. Οι αρχαίοι Κινέζοι, Αιγύπτιοι, Έλληνες και Ρωμαίοι χρησιμοποίησαν το αλουμίνιο στις μορφές που βρίσκεται στη φύση, χωρίς κατά πάσα πιθανότητα να έχουν πλήρη γνώση της ύπαρξης ενός μετάλλου που έδινε τις ειδικές αυτές ιδιότητες στις δημιουργίες τους. Στο Μεσαίωνα, οι επιστήμονες - αλχημιστές της εποχής υποπτεύθηκαν την ύπαρξη ενός μετάλλου στην κοινή και τόσο φτηνή άργιλο, που θα τους έδινε την πολυπόθητη λύση δημιουργίας χρυσού με την μετάλλαξή του.

Έπρεπε να φθάσει το έτος 1761 για να προταθεί πρώτη φορά στην ιστορία το όνομα "alume", από τον de Morveau, ως η βάση του "alum", δηλαδή του μετάλλου που δεν υπήρχε ακόμη στην καθαρή του μορφή.

Αργότερα, το 1807, ο Sir Humphrey Davy πρότεινε το όνομα "alumium" για το μέταλλο, αν και λίγο αργότερα συμφώνησε με το όνομα "aluminum", όρος που χρησιμοποιείται και σήμερα ακόμα για το αλουμίνιο στη βόρεια Αμερική. Λίγο αργότερα το όνομα "aluminium" (αλουμίνιο) καθιερώθηκε για να μη διαφέρει το όνομα του νέου μετάλλου από τα άλλα καθιερωμένα ονόματα των φυσικών στοιχείων που έχουν κατάληξη σε "-ium". Η διεθνής, λοιπόν, χημική ονομασία του νέου μετάλλου είναι "αλουμίνιο" μέχρι και τις μέρες μας. Το ίδιο ίσχυσε και στις ΗΠΑ μέχρι το 1925, όταν η Αμερικανική Εταιρία Χημείας αποφάσισε να αλλάξει το όνομα ξανά σε "aluminum", έτσι ακόμα και σήμερα οι Αμερικάνοι χρησιμοποιούν αυτή την ονομασία, σε αντίθεση με τον υπόλοιπο κόσμο.

Ας επιστρέψουμε, όμως, στην ιστορική μας διαδρομή. Ο Hans Christian Oersted ήταν ο πρώτος επιστήμονας που παρήγαγε καθαρό αλουμίνιο το 1825, με τη χρήση χλωριδίου του αλουμινίου (AlCl3) και αμάλγαμα ποτάσας, ένα κράμα δηλαδή ποτάσας και ψευδαργύρου. Ο Oersted ανεβάζοντας τη θερμοκρασία του μίγματος, σε κατάσταση χαμηλής πίεσης, πέτυχε την απομάκρυνση του ψευδαργύρου, το εναπομείναν δε υλικό ήταν το αλουμίνιο.

Η ανακάλυψη αυτή δε δημιούργησε παρά "ένα πολύτιμο" μέταλλο, μια και ήταν πολύ δύσκολη και ακριβή η παραγωγή του. Όντως, για αρκετά χρόνια το αλουμίνιο θεωρούνταν πολύτιμο μέταλλο, που χρησιμοποιούσαν μόνον πάμπλουτοι για την κατασκευή, για παράδειγμα, των πιάτων τους, κάτι σαν πιάτα από χρυσάφι θα λέγαμε. Στις επόμενες παραγράφους θα αναφερθεί η ανάπτυξη του μετάλλου και η κατάκτηση της βιομηχανίας από το πιο διαδεδομένο μέταλλο στη φύση, το αλουμίνιο.

Ας επισημανθεί, όμως, εν συντομία η εξέλιξη της παραγωγής του μετάλλου από τις αρχές του 19^{ου} αιώνα:

1808: Ο Βρετανός Davy ανακαλύπτει την ύπαρξη του μετάλλου.

1821: Ο P. Berthier ανακαλύπτει, κοντά στο χωριό Les Baux στη Γαλλία, μια σκληρή κοκκινωπή ουσία που περιέχει 52% αλουμίνιο και την ονομάζει Βωξίτη.

1825: Ο Δανός Hans Christian Oersted παράγει μια μικρή ποσότητα αλουμινίου χρησιμοποιώντας διάλυμα ποτάσας.

1827: Ο Γερμανός Friedrich Wohler ανακοινώνει την ανακάλυψή του για την παραγωγή αλουμινίου μέσω της αντίδρασης ποτάσας με άνυδρο χλωρίδιο του αλουμινίου.

1845: Ο Wohler ανακάλυψε και κατέγραψε την πυκνότητα του αλουμινίου και μία από τις βασικές του ιδιότητες, την ελαφρότητα.

1854: Ο Γάλλος Henri Saite-Claire Deville βελτιώνει τη μέθοδο του Wohler και παράγει βιομηχανικά αλουμίνιο, για πρώτη φορά στην ιστορία. Η τιμή του μετάλλου ξεπερνά αυτή του χρυσού και της πλατίνας.

1855: Μία ράβδος αλουμινίου εκτίθεται στη Διεθνή Έκθεση των Παρισίων, μαζί με άλλα πολύτιμα μέταλλα.

1886: Δύο νέοι και άγνωστοι επιστήμονες, ο Γάλλος Paul Louis Toussaint Heroult και ο Αμερικάνος Charles Martin Hall, εφευρίσκουν τη μέθοδο παραγωγής αλουμινίου μέσω της ηλεκτρόλυσης διαλύματος αλουμίνας. Οι δύο επιστήμονες εργάστηκαν ξεχωριστά, χωρίς να ξέρουν ο ένας την εργασία του άλλου.

1888: Οι πρώτες εταιρίες παραγωγής αλουμινίου γεννήθηκαν στη Γαλλία, την Ελβετία και τις ΗΠΑ.

1889: Ο Αυστριακός Friedrich Bayer, γιος του ιδρυτή της περίφημης εταιρίας χημικών ουσιών, εφευρίσκει τη μέθοδο παραγωγής μεγάλων ποσοτήτων αλουμίνας από τον βωξίτη.

1900: Η ετήσια παραγωγή αλουμινίου σπάει κάθε ρεκόρ, φτάνοντας τους 8 τόνους σε ετήσια βάση.

1.3 Η αποδοχή του αλουμινίου από τη βιομηχανία

Το αλουμίνιο άρχισε να δημιουργεί τη δική του αγορά, καθώς η παραγωγή του στις αρχές του αιώνα έβγαλε το μέταλλο αυτό από τους πίνακες των πολυτίμων μετάλλων. Τότε, λοιπόν, στις αρχές του αιώνα, η παραγωγή έφτασε σε μερικούς χιλιάδες τόνους. Οι πρώτες χρήσεις του αλουμινίου σε βιομηχανικές εφαρμογές ξεκίνησαν:

1908, με την παραγωγή καλωδίων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής τάσης.

1910, με την παραγωγή καλωδίων για χρήση σε υπόγειες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρική ενέργειας, μονωμένες με μολύβι και χαρτί. Χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά στην Βοστόνη.

1912, με την παραγωγή κουπαστών εσωτερικών χώρων από αλουμίνιο για το επιβατικό πλοίο AQUITANA.

1917, με την παραγωγή καλωδίου για μετασχηματιστές ηλεκτρικής ενέργειας.

1920, με την παραγωγή μηχανικών μερών για μηχανές.

Η πρώτη μονάδα παραγωγής πρωτόχυτου αλουμινίου σε βιομηχανικές ποσότητες δημιουργήθηκε στον Καναδά από την Northern Aluminium Company, που αργότερα έγινε η γνωστή σε όλους Alcoa. Η μονάδα παρήγαγε έναν τόνο αλουμινίου την ημέρα από το 1901, όταν ξεκίνησε η παραγωγή. Η πατρίδα της πρώτης αυτή μονάδας ήταν το Shawinigan Falls Quibec, κοντά στον ποταμό Saint Maurice, ιδανική τοποθεσία για την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας. Το 1925, καθώς η ζήτηση για αλουμίνιο αυξάνονταν, η Alcan αύξησε την παραγωγή της κατασκευάζοντας νέα μονάδα παραγωγής αλουμινίου και ηλεκτρικής ενέργειας στην πόλη Arvida της ίδιας Καναδικής πολιτείας. Η ιστορία της Alcan ήταν παράλληλη με την ιστορία παραγωγής πρωτόχυτου αλουμινίου στις ΗΠΑ από την Alcoa και αργότερα από άλλες Ευρωπαϊκές εταιρίες. Η άνοδος της κατανάλωσης αλουμινίου σήμανε τη μείωση κατανάλωσης χαλκού.

1.4 Φυσικές ιδιότητες του αλουμινίου

1.4.1 Ατομική δομή

Το αλουμίνιο είναι το τρίτο πιο κοινό στοιχείο στο γήινο φλοιό, μόνο το οξυγόνο και το πυρίτιο υπάρχει σε μεγαλύτερες ποσότητες. Το στοιχείο του αλουμινίου συμβολίζεται ως Al και έχει ατομικό αριθμό 13. Αυτό σημαίνει ότι το άτομο του αλουμινίου συντίθεται από 13 ηλεκτρόνια, που το καθένα έχει ένα μοναδιαίο ηλεκτρικό φορτίο και τα οποία βρίσκονται σε τρεις στιβάδες γύρω από έναν ισχυρά συμπυκνωμένο πυρήνα που έχει θετικό φορτίο 13. Τα τρία ηλεκτρόνια της εξωτερικής στιβάδας δίνουν στο άτομο του αλουμινίου χημική δύναμη +3.

1.4.2 Κρυσταλλική δομή

Όταν τα μέταλλα αλλάζουν από τη ρευστή στη στερεή μορφή τους θεωρούνται κρυσταλλικές δομές. Τα άτομα κατατάσσονται σε καθορισμένα συμμετρικά σχήματα. Το αλουμίνιο όπως και ο χαλκός, το ασήμι, και ο χρυσός, κρυσταλλώνονται με την κυβική διάταξη των ατόμων, που είναι κοινή στα περισσότερα μαλακά μέταλλα. Αυτό σημαίνει ότι τα άτομα σχηματίζουν τις γωνίες ενός κύβου, με ένα άτομο στο κέντρο της κάθε έδρας του. Το μήκος της ακμής του κύβου έχει καθοριστεί σε $4{,}049 \times 10^{-8}$ cm. Η πιο κοντινή απόσταση μεταξύ δύο ατόμων στην κρυσταλλική δομή του αλουμινίου είναι $\sqrt{2}/2 \times 4{,}049 \times 10^{-8}$ cm.

1.4.3 Πυκνότητα

Η ελαφρότητα του αλουμινίου είναι το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό του. Το μέταλλο έχει ατομικό βάρος 26,98 και ειδικό βάρος 2,70g/cm^3, κατά προσέγγιση το ένα τρίτο του βάρους των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων μετάλλων, εξαιρούμενων του τιτάνιου και του μαγνησίου. Όπως και στα περισσότερα μέταλλα, η πυκνότητά του μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η χρησιμοποίηση άλλων μετάλλων σε συνήθεις ποσότητες που χρησιμοποιούνται στα κράματα του αλουμινίου δεν αλλάζουν σημαντικά την πυκνότητα (+3%, -2%), εκτός από τα κράματα του λιθίου όπου η πυκνότητα του κράματος μειώνεται περισσότερο από 15%. Το βάρος είναι ιδιαίτερα σημαντικό για όλες τις λειτουργίες που ενέχουν κίνηση. Μειώνοντας το βάρος έχει ως επακόλουθο περισσότερο ωφέλιμο φορτίο ή μικρότερο κόστος στη

λειτουργία. Μικρότερο βάρος σημαίνει εξοικονόμηση ενέργειας, λιγότερους κραδασμούς, βελτίωση της απόδοσης κινούμενων μερών.

1.4.4 Ηλεκτρική αγωγιμότητα

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του καθαρού αλουμινίου (99,99%) στους 20°C είναι στο 63,8 % του IACS (INTERNATIONAL ANNEALED COPPER STANDARD). Λόγω του μικρού ειδικού βάρους του, η αγωγιμότητα ανά μονάδα βάρους είναι διπλάσια του χαλκού και μεγαλύτερη από κάθε άλλο μέταλλο. Η αντίσταση του καθαρού αλουμινίου είναι 2,69 μΩ στους 20°C. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα, που είναι αντίστροφη της αντίστασης, είναι από τις πιο ευαίσθητες ιδιότητες του αλουμινίου, η οποία επηρεάζεται τόσο από τη σύνθεσή του όσο και από τη θερμική του επεξεργασία. Η προσθήκη άλλων μέταλλων στα κράματα του αλουμινίου μειώνει την ηλεκτρική του αγωγιμότητα, κάτι που αντισταθμίζει άλλα πλεονεκτήματα που προκύπτουν, όπως η αύξηση αντοχής. Οι πολύ καλές ηλεκτρικές ιδιότητες του αλουμινίου το έκαναν μια προφανή επιλογή για τη βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας και ειδικότερα στη διανομή ενέργειας υπερυψηλής τάσης. Η πρώτη γραμμή διανομής ηλεκτρικής ενέργειας από αλουμίνιο κατασκευάστηκε στις ΗΠΑ στην Καλιφόρνια το 1898 και ήταν μια γραμμή 46 μιλίων. Η χρήση αργότερα έγινε πιο συχνή με την ενίσχυση του καλωδίου (κράμα 1350) με γαλβανισμένο χάλυβα που είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση των αποστάσεων χωρίς χαλαρώσεις. Σήμερα χρησιμοποιείται περισσότερο το κράμα 6061 αφού μπορούν να επιτευχθούν μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ των πυλώνων ή εναλλακτικά τη μείωση του ύψους τους.

1.4.5 Μη μαγνητικότητα

Το αλουμίνιο και τα κράματά του είναι πολύ ελαφρά παραμαγνητικά, καθώς έχουν μαγνητική διαπερατότητα (m) ελαφρά μεγαλύτερη από τη μονάδα. Η μαγνητική ευαισθησία χ (Chi), μέτρο μαγνητισμού / εφαρμοζόμενη μαγνητική δύναμη, του καθαρού αλουμινίου είναι μόνο $0{,}623 \times 10^{-6}$, που στις πρακτικές εφαρμογές σημαίνει όχι μαγνητισμό. Αυτή η ιδιότητα του αλουμινίου έχει αξία σε κατασκευές πολεμικών πλοίων όπου έχει το πλεονέκτημα του μικρότερου βάρους και κόστους σε σχέση μ' άλλα μη μαγνητικά μέταλλα.

1.4.6 Θερμική αγωγιμότητα

Η θερμική αγωγιμότητα , κ , του καθαρού αλουμινίου είναι 244W/mK για θερμοκρασία μεταξύ 0-100°C που είναι το 61,9 % του IACS και λόγω του μικρού ειδικού του βάρους η θερμική του αγωγιμότητα ανά μονάδα βάρους είναι διπλάσια του χαλκού. Η θερμική αγωγιμότητα μπορεί να υπολογιστεί από μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης βάσει της σχέσης $\kappa = 5{,}0\lambda T \times 10^{-9} + 0{,}03$ όπου κ είναι η θερμική αγωγιμότητα , λ είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα και T η θερμοκρασία σε βαθμούς Κέλβιν. Η θερμική αγωγιμότητα μειώνεται με την προσθήκη στοιχείων στα κράματα.

1.4.7 Αντοχή στη διάβρωση

Η δεύτερη πιο σημαντική ιδιότητα του αλουμινίου είναι η καλή αντοχή στη διάβρωση, αν και δεν είναι πολύ ευγενές μέταλλο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το αλουμίνιο και τα κράματά του αντιδρούν με το οξυγόνο και τους υδρατμούς του αέρα για να παραχθεί ένα λεπτό, συμπαγές φιλμ οξειδίου το οποίο προστατεύει το υποκείμενο μέταλλο από περαιτέρω προσβολή. Έτσι το αλουμίνιο και τα περισσότερα από τα κράματά του που δεν περιέχουν χαλκό μπορεί να αποδειχθούν πολύ ανθεκτικά στη διάβρωση, αν η τιμή του pH οποιουδήποτε υγρού επαφής βρίσκεται μεταξύ 5 και 8 (με αυτό το εύρος καλύπτονται οι περισσότερες υπάρχουσες ατμοσφαιρικές/περιβαλλοντικές συνθήκες). Κάτω από pH 5 και πάνω από 8, η μεν όξινη αντίδραση οδηγεί σε Al3+ ιόντα, ενώ η αλκαλική σχηματίζει AlO2. Το υγρό περιβάλλον θεωρείται εξαιρετικά υποβοηθητικό για τη λειτουργία της χημείας της διάβρωσης. Οι γενικές χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε διάβρωση παρουσία υγρασίας, είναι:

1.ΟΞΕΙΔΩΣΗ: (Ανοδική αντίδραση) : Al =(Al3+) + 3e

2.ΑΝΑΓΩΓΗ : (Καθοδική αντίδραση) : (H+) + e = ½ H2

Οι συνηθέστεροι τύποι διάβρωσης του αλουμινίου είναι :

Ομοιόμορφη προσβολή: Συνήθης μορφή διάβρωσης, όπου όλη η επιφάνεια του μετάλλου προσβάλλεται στον ίδιο βαθμό, π.χ. από χλωριόντα. Η ομοιόμορφη προσβολή, είναι δυνατόν να αποφευχθεί με διάφορες μεθόδους, από τις οποίες οι πιο σημαντικές είναι:

·Ανοδίωση
·Χρωμάτωση
·Καθοδική προστασία (π.χ. ανόδιο ψευδαργύρου).

Γαλβανική διάβρωση: Αυτή η μορφή προσβολής συμβαίνει όταν δύο αγωγοί διαφορετικής χημικής σύνθεσης (και σε απόσταση μεταξύ τους στον πίνακα ηλεκτροθετικότητας) ενώνονται ευρισκόμενοι μέσα σε αγώγιμο υγρό φορέα. Είναι από τις πιο δραστικές μορφές διάβρωσης, διότι επικεντρώνεται πάνω στο λιγότερο "ευγενές" μέταλλο από τα δύο σε επαφή, στην περιοχή και μόνο της διεπαφής των μετάλλων. Η συγκόλληση δύο κραμάτων αλουμινίου με τη μέθοδο brazing (ή και άλλο τύπο συγκόλλησης) παρέχει έδαφος για ανάπτυξη γαλβανικής διάβρωσης. Όταν το αλουμίνιο είναι σε επαφή με χαλκό, μπρούτζο ή σίδερο σε υγρό περιβάλλον, συμβαίνει γαλβανική διάβρωση σε διάφορους βαθμούς. Ακολουθεί πίνακας με τη σειρά ηλεκτροθετικότητας, ώστε να αποφεύγεται κατά το δυνατόν η επαφή δύο μετάλλων με σημαντική διαφορά.

Η γαλβανική ή διμεταλλική προσβολή αποφεύγεται μόνο με αποφυγή επαφής δύο μετάλλων με διαφορά ηλεκτροθετικότητας. Αυτό επιτυγχάνεται με κατάλληλο σχεδιασμό της κατασκευής καθώς και χρήση μονωτικών υλικών, εφόσον είναι απαραίτητο.

Διάβρωση κοιλοτήτων (Crevice corrosion): Έντονη τοπική διάβρωση, κυμαινόμενη από μικρές κοιλότητες έως σημαντική έκταση. Οι αιτίες δημιουργίας αυτής της διάβρωσης είναι πολλαπλές, με κυρίαρχη τη δημιουργία οξέων μέσα σε κοιλότητες (ίσως και τυπικής γεωμετρίας της κατασκευής αλουμινίου), που όμως δεν αερίζονται, ενώ παράλληλα συσσωρεύουν και αρκετή βρωμιά. Το περιβάλλον υγρασίας θεωρείται και εδώ απαραίτητο για την ανάπτυξη και διάδοση της διάβρωσης.

Πίνακας 1.1 Σειρά ηλεκτροθετικότητας μετάλλων και κραμάτων σε σχέση με το καθαρό αλουμίνιο (ονομαστικές τιμές σε mV συγκρινόμενες με εκείνες που αντιστοιχούν σε αλουμίνιο 99,5 % καθαρότητας εμβαπτισμένο σε διάλυμα NaCl)

Μέταλλο ή Κράμα	*mV*
Χρυσός	(+) 1000
Ανοξείδωτο Ατσάλι 18/8	(+) 850
Υδράργυρος	(+) 750
Ασήμι	(+) 700 to (+) 800
Χαλκός	(+) 550
Μπρούντζος	(+) 500
Νικέλιο (7075 T6)	(+) 480
Κασσίτερος	(+) 300
Μόλυβδος	(+) 150 to (+) 180
Al-Cu-Mg (2024 T6)	(+) 100
Σίδηρος	(+) 100
Χυτό AlSi 12	(+) 30 to (+) 60
Κάδμιο	0 to (+) 20
Al-Mn (3003)	(+) 10 to (+) 20
Al-Mg-Si 1 (6082)	0 to (+) 10
Αλουμίνιο 99,5%	0
Al-Mg-Mn (3004)	(-) 10 to 0
Al-Zn-Mg-Cu	(-) 20 to (-) 10
Al-Mg (5754)	(-) 30 to (-) 20
Al-Zn (7072)	-150
Ψευδάργυρος	-300
Μαγνήσιο	-850

Μικρο-διάβρωση (Pitting): Η μικρο-διάβρωση είναι μία μορφή εντοπισμένης διάβρωσης, που εμφανίζεται σα νέφος πολλών μικρών σκουρόχρωμων στιγμάτων στην επιφάνεια. Τα στίγματα αυτά έχουν μικρές εσοχές, γεμάτες με οξείδια. Τα τοιχώματα των εσοχών - σε μεγέθυνση μικροσκοπίου - φαίνονται να έχουν ανώμαλη επιφάνεια. Μερικές φορές η μικρο-διάβρωση (pitting) οδηγεί σε μορφές διάβρωσης κοιλοτήτων (crevice corrosion). Η υγρασία ή η συνεχής επαφή με επιθετικό υγρό περιβάλλον (NaCl) καθώς και κάποιοι μικροτραυματισμοί της επιφάνειας, καταλήγουν στη μικρο-διάβρωση. Υπενθυμίζεται ότι η ελεύθερη επιφάνεια του αλουμινίου προστατεύεται γενικά σε ικανοποιητικό βαθμό από την ανάπτυξη του λεπτού στρώματος οξειδίου του αλουμινίου. Η παθητική αυτή προστασία λειτουργεί καλά σε περιβάλλον pH μεταξύ 4 και 8. Εάν για κάποιους λόγους, σε κάποια σημεία της επιφάνειας, ο βαθμός προστασίας είναι μικρότερος από την υπόλοιπη επιφάνεια, τότε επιθετικά ιόντα - π.χ. χλωριόντα - προσβάλλουν αυτά τα σημεία δημιουργώντας τις μικρές εσοχές. Στα τοιχώματα των εσοχών το μέταλλο αποσυντίθεται γρήγορα, προκαλώντας νέα εισροή χλωριόντων στην εσοχή. Έτσι, παρουσιάζεται υψηλή συγκέντρωση χλωριδίων αλουμινίου, με παράλληλη αύξηση ιόντων υδρογόνου λόγω υδρολύσεως. Το pitting είναι ίσως η συνηθέστερη μορφή οξείδωσης αλουμινίου.

Περικρυσταλλική διάβρωση (Intergranular corrosion): Συμβαίνει στα όρια των κόκκων του μετάλλου και οφείλεται στην ηλεκτροχημική προσβολή σωματιδίων κατακρημνίσεων (precipitations) στα όρια των κόκκων. Τα σωματίδια αυτά (χημικές ενώσεις αλουμινίου με μέταλλα) μπορεί να συμπεριφέρονται είτε ανοδικά ως προς

τους τριγύρω κόκκους μετάλλου, είτε καθοδικά . Στην περίπτωση της ανοδικής συμπεριφοράς, όπως π.χ. με κατακρήμνιση Mg5Al8, ακολουθεί γρήγορη προσβολή της ανοδικής κατακρήμνισης, ενώ με κατακρήμνιση CuAl2 (καθοδικό ως προς περιβάλλοντα χώρο) έχουμε διάβρωση στους γειτονικούς κόκκους. Το πόσο ευαίσθητο είναι ένα κράμα αλουμινίου σε περικρυσταλλική διάβρωση εξαρτάται από την ποιότητα της κρυσταλλικής δομής του, που με τη σειρά της διαμορφώνεται από τη μεταλλουργική και θερμική ιστορία του μετάλλου. Κατάλληλες διεργασίες προστατεύουν το μέταλλο αυτού του είδους τη διάβρωση, που πλήττει συνήθως κράματα Al - Mg - Cu.

Τριχοειδής διάβρωση (Filiform corrosion): Έχει τριχοειδή μορφή και εμφανίζεται είτε κάτω από το πολύ λεπτό στρώμα οξειδίου παθητικής επιφανειακής αυτοπροστασίας, είτε κάτω από στρώμα επιφανειακής βαφής. Κυριότερα αίτια είναι η επιθετικότητα του περιβάλλοντος σε συνδυασμό με την ελλιπή προστασία (π.χ. χρωμάτωσης -προεπεξεργασίας). Η ζημία είναι κυρίως αισθητική (π.χ. στην περίπτωση μεγάλων επιφανειών εξωτερικών επικαλύψεων).

Διάβρωση απολέπισης (exfoliation corrosion): Συμβαίνει συνήθως στα θερμοσκληρυνόμενα κράματα Al - Mg - Cu και Al- Zn- Mg-Cu. Αναπτύσσεται κατά μήκος των ορίων των κόκκων (μπορεί να θεωρηθεί είδος περικρυσταλλικής διάβρωσης) σε κάποιο μικρό βάθος κάτω από την επιφάνεια του μετάλλου, προκαλώντας αποκόλληση - απολέπιση φυλλιδίων μετάλλου. Συνδέεται άμεσα με την "κατευθυντικότητα" της κοκκομετρίας του κράματος. Όταν εφαρμόζονται διεργασίες παραγωγής που οδηγούν σε ισοτροπικό μέταλλο, τότε ο κίνδυνος ανάπτυξης διάβρωσης απολέπισης απομακρύνεται σημαντικά.

Το όριο κόπωσης του μετάλλου είναι δυνατόν να παρουσιάσει σημαντική πτώση με φαινόμενα διαβρώσεως, γεγονός που πρέπει να προϋπολογίζεται για την περίπτωση κυκλικών (επαναλαμβανόμενων) φορτίσεων σε έντονα διαβρωτικά περιβάλλοντα.

Για να βελτιωθούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά (αντοχή σε θραύση, όριο διαρροής, επιμήκυνση) το αλουμίνιο κραματοποιείται με άλλα στοιχεία. Η κραματοποίηση επηρεάζει άμεσα την αντοχή του κράματος στη διάβρωση.

1.4.8 Θερμική διαστολή

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής δεν είναι γραμμικός για εύρος από -200 έως +600K αλλά για πρακτικούς λόγους θεωρούμε ότι είναι σταθερός μεταξύ θερμοκρασιών από 20°C έως 100°C. Ο συντελεστής θερμικής διαστολής των κραμάτων επηρεάζεται από τη φύση των πρόσθετων στοιχείων, έτσι η παρουσία πυριτίου και χαλκού μειώνει το συντελεστή ενώ το μαγνήσιο τον αυξάνει. Για τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα κράματα ο συντελεστής θερμικής διαστολής κυμαίνεται μεταξύ $23{,}5\times10^{-6}$ /K για κράματα χαλκού έως $24{,}5 \times 10^{-6}$ /K για κράματα μαγνησίου, ενώ είναι διπλάσιος από αυτόν του χάλυβα. Αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη για πολλές κατασκευές, όπου η ελεύθερη θερμική διαστολή είναι απαραίτητη. Όπου περιορίζεται η διαστολή, οι τάσεις που προκύπτουν οφείλονται στο μικρότερο μέτρο ελαστικότητας E.

1.4.9 Θερμοκρασία τήξεως

Το σημείο τήξεως του αλουμινίου είναι ευαίσθητο στην καθαρότητά του π.χ. για 99,99% καθαρό αλουμίνιο σε ατμοσφαιρική πίεση είναι 660°C, αλλά μειώνεται στους

635°C για εμπορικά καθαρό αλουμίνιο. Η προσθήκη πρόσθετων στοιχείων στα κράματα του μειώνει το σημείο τήξης μέχρι τους 500°C για κάποια κράματα μαγνησίου κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Το σημείο τήξης αυξάνει κάτω από πίεση σε 980°C για πίεση 50 Kbar.

1.5 Εφαρμογές αλουμινίου

Οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του αλουμινίου και των κραμάτων του είναι οι βασικοί λόγοι για την επιτυχία του ως κατασκευαστικό υλικό και οι οποίοι το έκανα ανταγωνιστικό με τον χάλυβα. Έτσι μπορούμε να εξάγουμε τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Τα κράματα αλουμινίου παρουσιάζουν μια ευρεία γκάμα κατασκευαστικών υλικών, των οποίων οι μηχανικές ιδιότητες καλύπτουν το φάσμα των ιδιοτήτων που προσφέρουν οι μαλακοί χάλυβες.
- Συνήθως η αντοχή σε διάβρωση του αλουμινίου κάνει περιττή την προστασία των κατασκευών του ακόμη και σε επιθετικό περιβάλλον.
- Η ελαφρότητα του υλικού του δίνει πλεονεκτήματα στη μείωση του βάρους, κάτι που όμως αντισταθμίζεται από την ανάγκη να μειώσομε την παραμόρφωσή του που οδηγεί σε φαινόμενα λυγισμού.
- Το υλικό από μόνο του δεν είναι επιρρεπές σε θραύση, αλλά πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή σε προβλήματα όπου απαιτείται υψηλή ολκιμότητα.
- Η διαδικασία της διέλασης μας επιτρέπει να παράγουμε μοναδικές διατομές και σχήματα σύμφωνα με τις απαιτήσεις για τις οποίες έχουν σχεδιαστεί.
- Υπάρχει μεγάλη γκάμα λύσεων για τις συνδέσεις, αφού η μοντέρνα τεχνολογία μπορεί να δώσει την δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε κοχλίες, πριτσίνια, συγκολλήσεις χωρίς να προκύπτει κάποια δυσκολία.

Μετά από αυτές τις εισαγωγικές παρατηρήσεις, μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι τα κράματα αλουμινίου μπορούν να είναι οικονομικά και επομένως ανταγωνιστικά σ' αυτές τις εφαρμογές όπου μπορούμε να εκμεταλλευτούμε πλήρως τις παραπάνω προϋποθέσεις. Ιδιαίτερα πρέπει να εκμεταλλευτούμε τις παρακάτω τρεις ιδιότητες:

I. *Ελαφρότητα* κάνει δυνατόν να:

- Απλοποιήσουμε την ανέγερση.
- Μεταφέρουμε πλήρως προκατασκευασμένα στοιχεία.
- Μειώσουμε τα βάρη που μεταφέρονται στη θεμελίωση.
- Εξοικονομήσουμε ενέργεια τόσο κατά τη διάρκεια της ανέγερσης όσο και της λειτουργίας.
- Μειώσουμε τη φυσική εργασία .

II. *Ανθεκτικότητα στη διάβρωση* κάνει δυνατόν να:

- Μειώσουμε τα έξοδα συντήρησης.
- Εξασφαλίσουμε καλή απόδοση σε διαβρωτικό περιβάλλον.

III. *Λειτουργικότητα των κατασκευαστικών σχημάτων,* λόγω της διαδικασίας διέλασης, κάνει δυνατόν να:

- Βελτιώσουμε τις γεωμετρικές ιδιότητες της διατομής με το σχεδιασμό ενός σχήματος που ταυτόχρονα δίνει το ελάχιστο βάρος και τη βέλτιστη κατασκευαστική απόδοση.
- Επιτύχουμε άκαμπτα σχήματα χωρίς τη χρήση σύνθετων τμημάτων, αποφεύγοντας έτσι συγκολλήσεις ή κοχλιώσεις.
- Απλοποιήσουμε συστήματα σύνδεσης μεταξύ διαφορετικών στοιχείων, βελτιώνοντας έτσι τις συνδέσεις.

- Συνδυάσουμε διαφορετικές λειτουργίες μεταξύ διαφορετικών στοιχείων, επιτυγχάνοντας έτσι έναν πιο οικονομικό και ορθολογικό προφίλ.

Από την πλευρά της εφαρμογής η βέλτιστη λύση μπορεί να επιτευχθεί σε μερικές τυπικές περιπτώσεις εκμεταλλευόμενοι τουλάχιστον μία από τις παραπάνω ιδιότητες: ελαφρότητα, ανθεκτικότητα σε διάβρωση, λειτουργικότητα. Τυπικές περιπτώσεις σε εφαρμογές πολιτικού μηχανικού ανήκουν στις παρακάτω ομάδες:

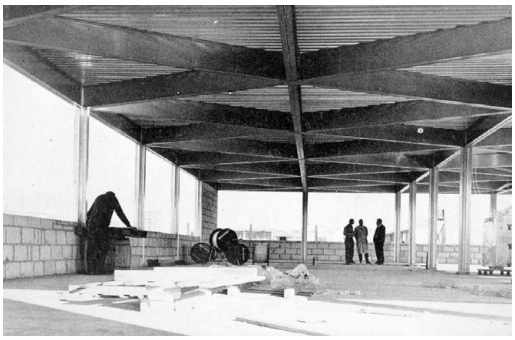
- Μεγάλης επιφάνειας οροφές στις οποίες οι επιβαλλόμενες (μεταβλητές) δράσεις σε σύγκριση με τις μόνιμες είναι μικρές.
- Κατασκευές που βρίσκονται σε απρόσιτες περιοχές μακριά από το εργοστάσιο κατασκευής, όπου το κόστος μεταφοράς και η ευκολία ανέγερσης είναι ιδιαίτερα σημαντικά. Είναι η περίπτωση προκατασκευασμένων στοιχείων όπως πυλώνες μεταφοράς ηλεκτρισμού, σκάλες, προσωρινές γέφυρες οι οποίες μπορούν να μεταφερθούν με ελικόπτερο ή γερανό πλήρως συναρμολογημένες.
- Κατασκευές που βρίσκονται σε διαβρωτικό ή υγρό περιβάλλον. Περιλαμβάνουν πολλές περιπτώσεις όπως οροφές κολυμβητηρίων, γέφυρες ποταμών, υδραυλικές κατασκευές, και παράκτιες υπερκατασκευές,
- Κατασκευές που έχουν κινούμενα μέρη, όπου το μικρό βάρος σημαίνει οικονομία ισχύς κατά τη λειτουργία. Είναι κυρίως κινούμενες γέφυρες, πεζογέφυρες και γέφυρες αυτοκινήτων, καθώς και περιστρεφόμενες γερανογέφυρες σε κυκλικές δεξαμενές μονάδων βιολογικού καθαρισμού.
- Κατασκευές για ειδικούς σκοπούς, όπου οι διαδικασίες συντήρησης είναι δύσκολες και πρέπει να είναι περιορισμένες όπως πύργοι φωτισμού, πινακίδες οδικής σήμανσης σε αυτοκινητόδρομους.

Πίνακας 1.2 Κύριες εφαρμογές δομικού αλουμινίου βάσει του κύριου χαρακτηριστικού του αλουμινίου που εκμεταλλεύονται (Δ: διάβρωση, Ε: ελαφρότητα, Λ: λειτουργικότητα)

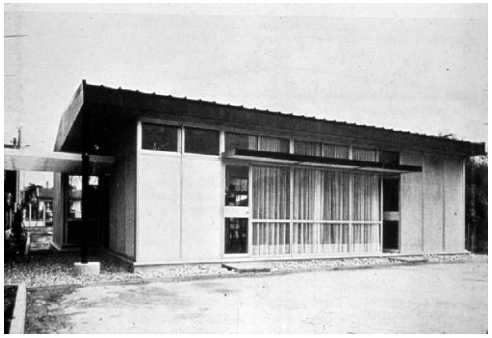
Δ • αποθηκευτικά δοχεία • κολώνες φωτισμού • προφίλ οροφής και τοιχοποιίας • στοιχεία στήριξης για την ηλεκτροδότηση τρένων • κατασκευές περίφραξης • ηχοπετάσματα • γέφυρες μονάδων βιολογικού καθαρισμού • πινακίδες οδικής σήμανσης	**Δ** + Ε • ιστοί σημαιών • γέφυρες επιβίβασης αεροσκαφών • πυλώνες μεταφοράς • γέφυρες επιθεώρησης • παράκτιες κατασκευές	Ε • βραχίονες γερανών • γέφυρες • κινητές γέφυρες επιθεώρησης • τηλεσκοπικές πλατφόρμες • σκάλες • κοντάρια τεντών • σκαλωσιές
Δ + Λ • θόλοι πάνω από δεξαμενές μονάδων βιολογικού καθαρισμού • εξέδρες σε μαρίνες • υδατοφράκτες • κατασκευές ορνιθοτροφείων • περίπτερα εκθέσεων • οροφές κολυμβητήριων • σκίαστρα	**Δ** + Λ + Ε • κιγκλιδώματα • εξέδρες ελικοπτέρων Λ • προκατασκευασμένοι εξώστες • μονή τροχιά • ταινιόδρομοι • κατασκευές στήριξης ρομπότ	Λ + Ε • ράμπες πρόσβασης • ράμπες φόρτωσης • προσωρινές τροχιές • ανελκυστήρες για υλικά οικοδομών • στρατιωτικές γέφυρες • ράδιο ιστοί • προσωρινές μεγάλες εξέδρες • προστατευτικά

Πιο γενικές δομικές εφαρμογές του αλουμινίου περιλαμβάνονται στον Πίνακα 1.2 όπου κατατάσσονται σύμφωνα με τις απαιτήσεις της ανθεκτικότητας σε διάβρωση (Δ), ελαφρότητας (Ε) και λειτουργικότητας διελασμένων προφίλ (Λ) που είναι καθοριστικές στην επιλογή του υλικού και που ενεργούν ξεχωριστά ή μαζί.

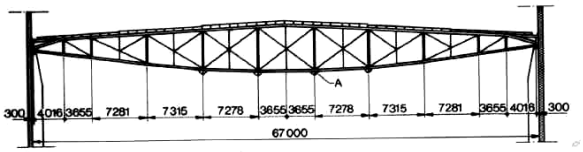
1.5.1 Παραδείγματα εφαρμογών



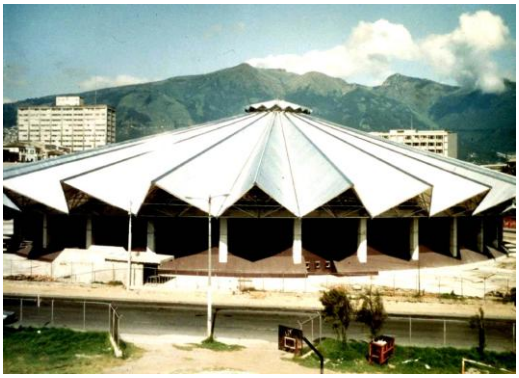
Εικόνα 1.1 Φέρον οργανισμός κτιρίου (Γερμανία)

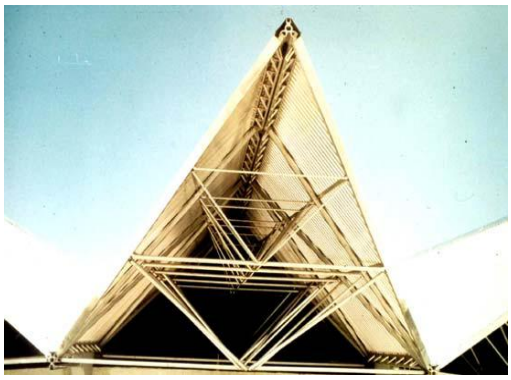


Εικόνα 1.2 Προκατασκευασμένο σπίτι (Γαλλία)

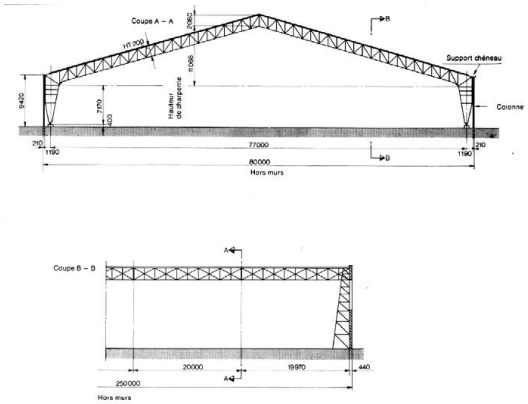


Εικόνα 1.3 Sporthall (Gand, Belgium)





Εικόνα 1.4 Το Palasport στο Quito (Εκουαδόρ)



Εικόνα 1.5 Warehouse (Antwerp, Belgium)

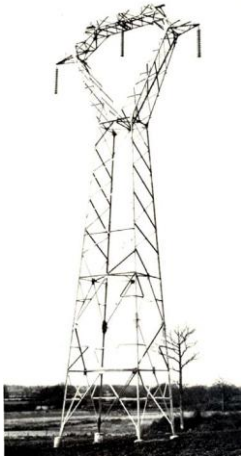
Εικόνα 1.6 Οροφή γηπέδου ποδοσφαίρου στην Guayaquil (EquadoRoof Equador)

Εικόνα 1.7 Βιομηχανικό κτίριο (Βραζιλία)

Εικόνα 1.8 Η Memorial Pyramid(Quebec, Canada)

Εικόνα 1.9 Ο γεωδαιτικός θόλος στο Guayaquil (Equador)

Εικόνα 1.10 Πινακίδες σήμανσης



Εικόνα 1.11 Πυλώνες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Εικόνα 1.12 Φάροι

Εικόνα 1.13 Κεραίες επιχείρησης ηλεκτρικής ενέργειας

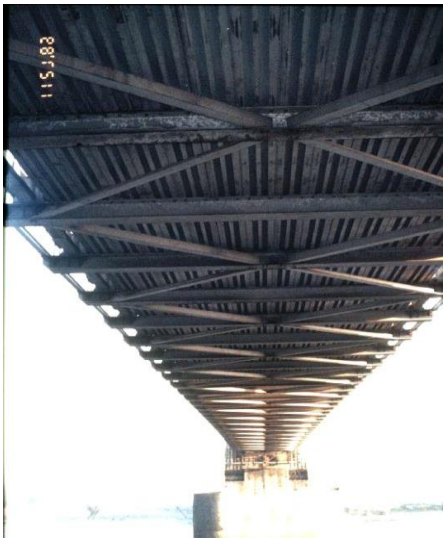
Εικόνα 1.14 Υδραυλικές εγκαταστάσεις

Εικόνα 1.15 Ελικοδρόμια

Εικόνα 1.16 Πεζογέφυρα στο Jonquire (Quebec, Canada)

Εικόνα 1.17 Γέφυρα Arvida στο Quebec (Canada , 1950-L=150 m)

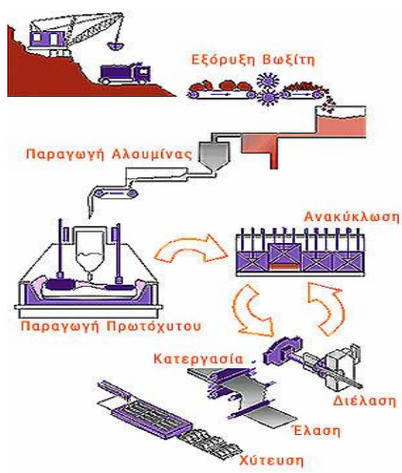
Εικόνα 1.18 Γέφυρα Montemerle στο ποταμό Soane (Γαλλία)



2 Παράγωγή αλουμινίου και εφαρμοζόμενες τεχνολογίες

2.1 Παραγωγή πρωτόχυτου και δευτερόχυτου αλουμινίου

Το αλουμίνιο παρήχθη βιομηχανικά για πρώτη φορά μόλις το 1886. Όπως τα περισσότερα μέταλλα, έτσι και αυτό βρίσκεται υπό τη μορφή ορυκτών. Από βιομηχανικής πλευράς το πλέον σημαντικό ορυκτό είναι ο βωξίτης, όπου το αργίλιο περιέχεται υπό τη μορφή οξειδίων ή ένυδρων οξειδίων (αλουμίνα). Ο βωξίτης, για να θεωρείται οικονομικά εκμεταλλεύσιμος, πρέπει να έχει μία περιεκτικότητα μεγαλύτερη του 55% σε αλουμίνα (Al2O3). Το μέταλλο που παράγεται με τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης της αλουμίνας είτε ως καθαρό αλουμίνιο είτε ως κράμα αλουμινίου ονομάζεται πρωτόχυτο αλουμίνιο. Μια άλλη πηγή αλουμινίου, πολύ σημαντική από ενεργειακής άποψης, είναι η επανάτηξη και επαναχύτευση κομματιών που ήδη έχουν χρησιμοποιηθεί (scrap). Το scrap προέρχεται είτε από συλλογή διαφόρων κομματιών αλουμινίου που η χρήση τους έχει πάψει, όπως κάρτερ αυτοκινήτων, παλιά παράθυρα ή πόρτες, κουτιά μπύρας και αναψυκτικών κλπ., (old scrap), είτε από τα αποκόμματα που δημιουργούνται κατά την επεξεργασία του αλουμινίου για την παραγωγή προϊόντων (new scrap). Το αλουμίνιο που παράγεται από την επανάτηξή του ονομάζεται δευτερόχυτο αλουμίνιο. Το δευτερόχυτο αλουμίνιο, εάν ακολουθηθεί ο σωστός τρόπος παραγωγικής διαδικασίας, έχει τις ίδιες ιδιότητες και χαρακτηριστικά με αυτά του πρωτόχυτου αλουμινίου.



Σχήμα 2.1 Διαδικασία παραγωγής πρωτόχυτου και δευτερόχυτου αλουμινίου

Η βιομηχανική παραγωγή αλουμινίου βασίζεται στην τεχνολογία της ηλεκτρόλυσης σε λεκάνες όπου η αλουμίνα, παράγωγο του βωξίτη, διαπερνάται από ηλεκτρικό ρεύμα σε μπάνιο κρυολίθου. Το σχετικά υψηλό κόστος παραγωγής αλουμινίου οφείλεται κυρίως στη μεγάλη κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος.

Η ανακύκλωση του αλουμινίου είναι το σημαντικότερο μέσο για την οικονομία ενέργειας και τη μείωση εκπομπών αερίων που επιβαρύνουν την ατμόσφαιρα με το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Για την πρωτογενή παραγωγή 1 Kg αλουμινίου με ηλεκτρόλυση αλουμίνας από βωξίτη απαιτείται ενέργεια 14 kWh, η ανακύκλωση της ίδιας ποσότητας από scrap χρειάζεται μόνο 5% της ενέργειας ηλεκτρόλυσης. Η έντονη προσπάθεια που καταβάλλεται διεθνώς προς την κατεύθυνση αυτή, αποδεικνύεται με τη χρήση υδροηλεκτρικής ενέργειας στην ηλεκτρόλυση. Οι περισσότερες μονάδες ηλεκτρόλυσης (πάνω από 60% παγκοσμίως) τροφοδοτούνται πλέον από υδροηλεκτρικές πηγές, που σημαίνει καθαρότερη ενέργεια χωρίς επιβάρυνση της ατμόσφαιρας με αέριες εκπομπές. Ταυτόχρονα η προσπάθεια για

οικονομικότερη διεργασία ηλεκτρολύσεως έχει ήδη αποδώσει, επιτυγχάνοντας μείωση ενέργειας 30% σε σχέση με εκείνη που χρειαζόταν προ 30ετίας.

Η διατήρηση της αξίας του μετάλλου, παράλληλα με την επ' άπειρον δυνατότητα ανακύκλωσης, αποτελούν εξαιρετικά ελκυστικά χαρακτηριστικά που ενισχύουν το προφίλ οικολογίας του αλουμινίου. Υπενθυμίζεται ότι σε αντίθεση με άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται στη δόμηση, το αλουμίνιο διατηρεί ακέραια τα χαρακτηριστικά του μετά τη ανακύκλωση χωρίς ποιοτική υποβάθμιση.

2.1.1 Η αλουμίνα και οι μέθοδοι παραγωγής της

Η αλουμίνα μπορεί να είναι ένυδρη ή άνυδρη, ανάλογα με το βαθμό επεξεργασίας της:

- η *ένυδρη αλουμίνα* χρησιμοποιείται σε πλήθος εφαρμογών στη βιομηχανία,
- η *άνυδρη* προκύπτει από την ένυδρη με ψήσιμο σε υψηλή θερμοκρασία για την αφαίρεση των περιεχομένων ποσοτήτων νερού.

Αποτελεί τη βασική πρώτη ύλη για την παραγωγή πρωτόχυτου αλουμινίου.

Η εξάπλωση των εφαρμογών του αλουμινίου έχει ως αποτέλεσμα την απορρόφηση όλο και μεγαλυτέρων ποσοτήτων άνυδρης αλουμίνας. Περισσότερο από 80% της παγκόσμιας παραγωγής αλουμίνας αντιστοιχεί στη λεγόμενη μεταλλουργική αλουμίνα που χρησιμοποιείται στην παραγωγή πρωτόχυτου αλουμινίου.

2.1.1.1 Μέθοδοι παραγωγής της αλουμίνας

Για το διαχωρισμό της αλουμίνας από τα άλλα συστατικά του βωξίτη χρησιμοποιείται σε όλο τον κόσμο η *μέθοδος Bayer* (1884). Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αυτής, αρχικά ο βωξίτης θραύεται και αφού αναμιχθεί με ποσότητες πυκνού διαλύματος καυστικής σόδας, αλέθεται σε πολύ λεπτή κοκκομετρία. Ακολουθεί επεξεργασία του μίγματος με τη βοήθεια ατμού σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση. Έτσι, η αλουμίνα διαλυτοποιείται δημιουργώντας σύμπλοκο με την καυστική σόδα. Τα αδιάλυτα συστατικά του βωξίτη διαχωρίζονται με καθίζηση και αφού εκπλυθούν είτε απορρίπτονται είτε διηθούνται σε ειδική φιλτρόπρεσσα και προωθούνται σε διάφορες εφαρμογές.

Εικόνα 2.1 Παραγωγή αλουμίνας

Το πυκνό διάλυμα της ένωσης της αλουμίνας με τη σόδα (αργιλικό νάτριο) αραιώνεται και ψύχεται με την προσθήκη νερού, οπότε διαχωρίζεται στα συστατικά του:

Αραιό διάλυμα σόδας, που συμπυκνώνεται με εξάτμιση και χρησιμοποιείται ξανά για την επεξεργασία νέων ποσοτήτων βωξίτη.

Ένυδρη αλουμίνα, που, με τη μορφή λεπτών λευκών κόκκων, συγκρατείται σε ειδικά φίλτρα.

Η αλουμίνα στη συνέχεια θερμαίνεται σε φούρνους σε θερμοκρασία 1300°C για να αφαιρεθεί η υγρασία και το κρυσταλλικό νερό που περιέχει. Η άνυδρη πλέον αλουμίνα χρησιμοποιείται για την παραγωγή αλουμινίου.

Για την παραγωγή 1 t (τόνου) αλουμίνας απαιτούνται:

- 2,2 t βωξίτη
- 30 kg καυστική σόδα
- 275 kg πετρέλαιο

- 5 t νερό

Η παγκόσμια παραγωγή αλουμίνας είναι περίπου 80 εκ. τόνοι. Οι μεγαλύτερες ποσότητες χρησιμοποιούνται για την παραγωγή αλουμινίου. Ακόμη η αλουμίνα χρησιμοποιείται στην παραγωγή λειαντικών και μονωτικών υλικών, πυριμάχων, βιομηχανικών φίλτρων, φαρμάκων καθώς και στην επεξεργασία του νερού.

2.2 Διαδικασία παραγωγής προϊόντων έλασης

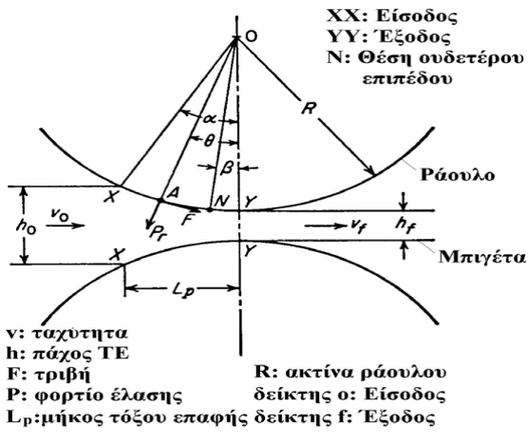
2.2.1 Γενικά

Κατά την έλαση (rolling), το τεμάχιο υπό τη μορφή ράβδου ή πλάκας υφίσταται πλαστική παραμόρφωση διερχόμενο μέσα από το άνοιγμα μεταξύ δύο αντίθετα περιστρεφόμενων τυμπάνων (ράουλων). Αποτέλεσμα της έλασης είναι η παραγωγή αντίστοιχου προϊόντος με μικρότερη διατομή και μεγαλύτερο μήκος, βλ. Σχήμα 2.2. Σαν κατεργασία η έλαση αναπτύχθηκε περί τα τέλη του 16ου αιώνα. Διακρίνεται σε:

(i) *Έλαση μπιγέτας*, όπου σημειώνεται μεταβολή και στο πλάτος του παραγόμενου προϊόντος, γνωστό και ως πλευρική διόγκωση (spreading).

(ii) *Έλαση πλάκας*, κατά την οποία δεν παρατηρείται μεταβολή στο πλάτος του παραγόμενου προϊόντος.

Η έλαση μπορεί να πραγματοποιηθεί και ως ψυχρή και ως θερμή κατεργασία.



Σχήμα 2.2 Σχηματική παράσταση έλασης

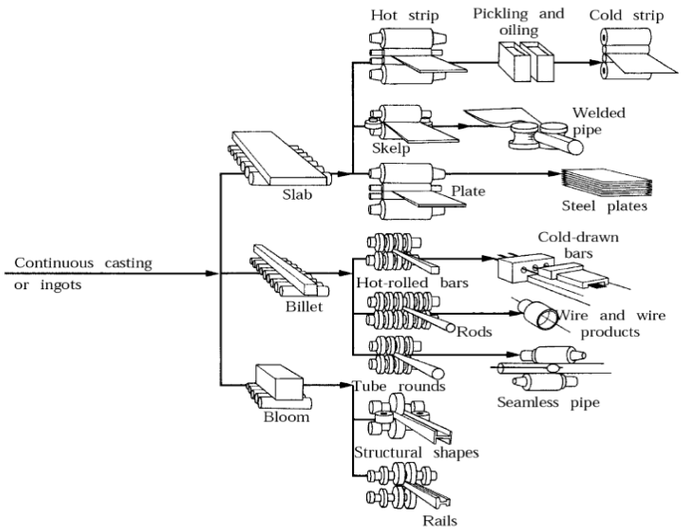
2.2.2 Θερμή έλαση

Η πρώτη ύλη αλουμινίου θερμής έλασης είναι μια ορθογωνική πλάκα με πάχος 200-600mm και με βάρος από 500-10000 kg. Οι δύο όψεις της πλάκας τορνάρονται, ώστε να αφαιρεθεί το επιφανειακό επίστρωμα, που λόγω της διαδικασίας της χύτευσης παρουσιάζει μια ιδιαίτερη και ανεπιθύμητη δομή από την υπόλοιπη μάζα της πλάκας. Η πλάκες αλουμινίου προθερμαίνονται σε θερμοκρασία 455°C έως 525°C, εξαρτώμενη από τη φύση του κράματος. Η διεργασία της έλασης γίνεται σε προκαθορισμένη ελεγχόμενη θερμοκρασία και συνεχίζεται μέχρι του επιθυμητού πάχους που μπορεί να φθάσει μέχρι 35 mm. Τα προϊόντα της θερμής έλασης μπορεί να βρίσκονται είτε σε μορφή μεγάλων πλακών, είτε περιτυλιγμένα σε ρολά (μπομπίνες).

2.2.3 Ψυχρή έλαση

Η διαδικασία αυτή ακολουθείται για την παραγωγή λεπτότερων φύλλων αλουμινίου. Η ψυχρή έλαση γίνεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Γίνεται σε μια διάταξη πολλαπλών ελάστρων. Κάθε ένα έλαστρο μειώνει το πάχος της επίπεδης πλάκας ή του ρολού, όπως αυτά παράγονται από τη διαδικασία της θερμής έλασης.

Με την ψυχρή έλαση κραμάτων αλουμινίου μπορεί να φθάσει ως και 0.05mm. Το καθαρό αλουμίνιο μπορεί να φθάσει σε πάχη κάτω των 0.003mm. Καθώς προχωρεί ο βαθμός έλασης (συνεχής μείωση του πάχους), το αλουμίνιο σκληραίνει, με συνέπεια την απαίτηση μεγαλύτερων δυνάμεων. Έτσι, απαιτούνται ενδιάμεσες θερμικές επεξεργασίες προκειμένου να μαλακώνει το μέταλλο.



Εικόνα 2.2 Προϊόντα έλασης

2.2.4 Προϊόντα έλασης

Φύλλα: Επίπεδα προϊόντα έλασης, ορθογωνικής εγκάρσιας διατομής, με πάχος μεγαλύτερο από 0.20mm, που παραδίνονται σε ευθύγραμμα τμήματα ή δίσκους με ψαλιδισμένα (ξακρισμένα) ή πριονισμένα άκρα. Φύλλα με πάχος μεγαλύτερο από 6 mm ονομάζονται χοντρά φύλλα.

Πίνακας 2.1 Τα κυριότερα προϊόντα έλασης ανά τομέα και χρήση τους

ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΕΛΑΣΗΣ	ΧΡΗΣΗ
Δόμηση (φύλλα, ταινίες, foil βαμμένα και άβαφα)	Επενδύσεις κτιρίων, στέγες και πλαγιοκαλύψεις, ρολά παραθύρων και γκαραζόπορτες, αποστάτες υαλοπινάκων, ψευδοροφές, υδρορροές, εύκαμπτοι αεραγωγοί, εναλλάκτες θερμότητας, μονώσεις
Άκαμπτη συσκευασία (ταινίες, και φύλλα)	Κουτιά αναψυκτικών και μπύρας, κονσέρβες τροφίμων, βιδωτά καπάκια
Εύκαμπτη συσκευασία (foil)	Αλουμινόχαρτο οικιακής χρήσης, συσκευασίες τσιγάρων, συσκευασίες υγρών τροφίμων, συσκευασίες φαρμάκων, καπάκια γαλακτοκομικών προϊόντων, μαλακές συσκευασίες ξηρών καρπών, (είδη ζαχαροπλαστικής), σκεύη τροφίμων, αρτοποιεία
Μεταφορές (φύλλα και ταινίες βαμμένα και άφαβα)	Ναυπηγική (υπερκατασκευές/άτρακτοι), φορτηγά(βυτία μεταφοράς καυσίμων, τσιμέντου, αδρανών υλικών), βαγόνια τρένων, οδοσήμανση, πινακίδες αυτ/νων
Οικιακές συσκευές/ σκεύη (φύλλα και ταινίες)	Ηλιακοί θερμοσίφωνες, καταψύκτες, τοστιέρες, τηγάνια
Αυτοκινητοβιομηχανία (ταινίες)	Μέρη για σασί, διάφορα εξαρτήματα, ηχο/θερμομονωτικά
Ταινίες λιθογραφίας	Λιθογραφικές πλάκες για εκτυπωτικές μονάδες

Ταινίες: Επίπεδα προϊόντα έλασης, ορθογωνικής εγκάρσιας διατομής, με πάχος πάνω από 0.2mm και μέχρι 6mm που παραδίνονται σε ρολά.

Λεπτά φύλλα (foil): Επίπεδα προϊόντα έλασης, πάχους 0.6mm που παραδίνονται σε ρολά.

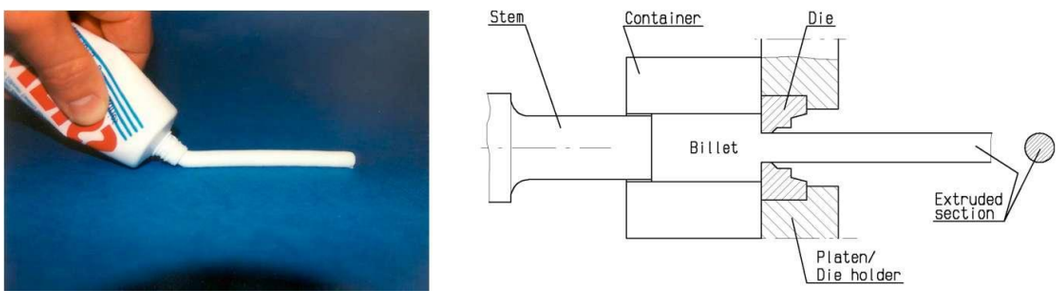
Βαμμένα Φύλλα: Τα έτοιμα βαμμένα φύλλα αλουμινίου έχουν μια σειρά εφαρμογών εξαιτίας της υψηλής αντοχής στη διάβρωση, την εύκολη μορφοποίησή τους σε διάφορα σχήματα, την ποικιλία και την αντοχή των χρωματικών επικαλύψεων, τον εύκολο καθαρισμό. Κατάλληλα διαμορφωμένα σε λωρίδες χρησιμοποιούνται για την κάλυψη οροφών, για την κατασκευή ρολών, κατασκευή πορτοπαραθύρων, για την κάλυψη προσόψεων, για την κάλυψη στεγών, για την κατασκευή τεντών και στόρς. Τα φύλλα αλουμινίου μπορούν να συνδυασθούν με πολυουρεθάνη για τη δημιουργία προϊόντων με αυξημένες θερμομονωτικές και ηχομονωτικές ιδιότητες.

Σε όλες τις εφαρμογές των βαμμένων φύλλων αλουμινίου απαιτείται πολύ καλή πρόσφυση των χρωματικών επικαλύψεων, καλή εμφάνιση και σταθερότητα των χρωμάτων στο χρόνο. Για τους λόγους αυτούς, η βαφή των φύλλων αλουμινίου γίνεται σε ειδικές κατάλληλα εξοπλισμένες μονάδες. Στο παραπάνω Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται τα κυριότερα προϊόντα έλασης ανά τομέα και η χρήση τους.

2.3 Διέλαση

2.3.1 Γενικά

Η διαδικασία της διέλασης μοιάζει με το στύψιμο οδοντόπαστας από ένα σωλήνα (Εικόνα 2.3), μια διαδικασία που έχουμε συνηθίσει να κάνουμε καθημερινά. Στο αλουμίνιο μόνο η θερμοκρασία και οι δυνάμεις είναι πολύ υψηλότερες και απαιτείται ένα σχετικά πολύπλοκο μηχάνημα για να το κάνει: ένα πιεστήριο διέλασης.



Εικόνα 2.3 Ανάλογο διαδικασίας διέλασης

Η ίδια η διαδικασία είναι εύκολο να εξηγηθεί. Τοποθετείται μία προθερμασμένη μπιγέτα αλουμινίου (400 έως 550 °C, ανάλογα με το κράμα) σε προθερμασμένο δοχείο. Υπό τις δυνάμεις του στελέχους, το υλικό αρχίζει να ρέει μέσω της μήτρας και έτσι αποκτά τη μορφή που ορίζεται από τη μήτρα.

Η μήτρα είναι στην πραγματικότητα το πιο σημαντικό τμήμα σε αυτή τη διαδικασία. Στην απλούστερη μορφή της είναι ένας δίσκος με ένα άνοιγμα που αντιστοιχεί στο εξωτερικό περίγραμμα του σχήματος του τμήματος. Η λειτουργία των μητρών διέλασης δεν είναι μόνο ο σχηματισμός του περιγράμματος της διατομής αλλά και η φέρουσα κατασκευή να αντέχει όλη τη δύναμη της διέλασης και να μεταφέρει τις δυνάμεις στα στοιχεία στήριξης της μήτρας και του πιεστηρίου. Ανάλογα με το πιεστήριο (πρέσα) διέλασης, οι δυνάμεις αυτές μπορεί να είναι μέχρι 10000t, με πιέσεις έως 8000 bar. Οι μήτρες διέλασης συνεπώς είναι κατασκευασμένες από υψηλής αντοχής ανθεκτικά στη θερμότητα τμήματα χάλυβα. Οι τάσεις της μήτρας αυξάνονται με το μέγεθός (διάμετρό) της και τη πολυπλοκότητά της. Όταν χρησιμοποιούνται μεγάλες μήτρες σε συνδυασμό με κράματα υψηλής αντοχής, δηλαδή σκληρά διελάσιμα κράματα, είμαστε συχνά αντιμέτωποι με επιπτώσεις ερπυσμού στο χάλυβα της μήτρας και εμφάνιση ρωγμών σε εύρος χαμηλού κύκλου κόπωση (μία μπιγέτα είναι ένας κύκλος).

Σύγχρονες μήτρες για πολύπλοκες πολύκοιλες διατομές είναι ένα πολύπλοκο μίγμα ατράκτων που σχηματίζουν τα εσωτερικά περιγράμματα και τροφοδοτούνται από

διαύλους μέσω των οποίων το υλικό μεταφέρεται υπό υψηλή πίεση. Μεταξύ όλων αυτών των στοιχείων είναι απαραίτητο να υπάρχει αρκετός χώρος για την κατασκευή στήριξης με επαρκή φέρουσα ικανότητα και ακαμψία. Η έλλειψη αντοχής της στήριξης συνεπάγεται μια πρώιμη θραύση της μήτρας. Η έλλειψη ακαμψίας έχει συνέπειες στις ανοχές της διατομής (ελαστική παραμόρφωση της μήτρας). Αυτό εξηγεί γιατί τα στοιχεία αυτά έχουν συνέπειες στο σχεδιασμό μιας διατομής.

2.3.2 Ταξινόμηση των μεθόδων διέλασης

Ανάλογα με τη διαδικασία εκτέλεσης της διέλασης, διακρίνονται τα ακόλουθα είδη, βλ. Σχήμα 2.3:

α*) Άμεση διέλαση (Direct extrusion)*

Είναι η κλασσική περίπτωση διέλασης. Η ροή του υλικού έχει την κατεύθυνση της κίνησης του εμβόλου, ενώ το ΤΕ «γλιστρά» στα τοιχώματα του μεταλλικού θαλάμου κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, αναπτύσσοντας ισχυρές δυνάμεις τριβής.

β*) Έμμεση διέλαση (Indirect extrusion)*

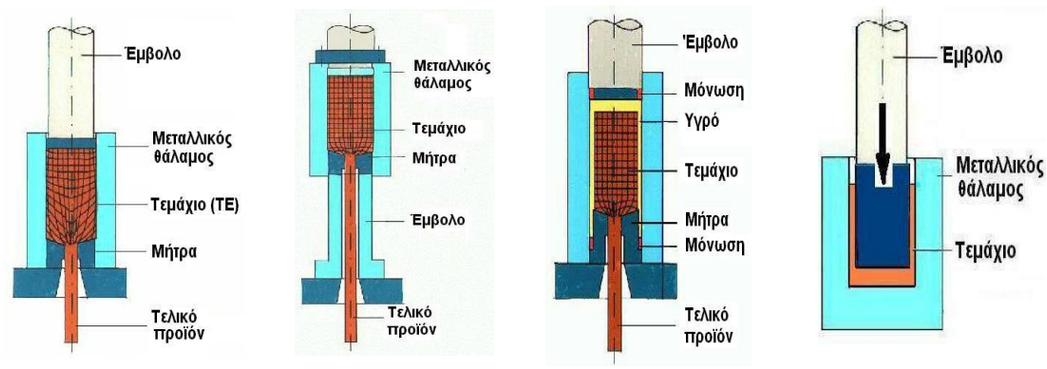
Στο μέτωπο του εμβόλου έχει ενσωματωθεί η μήτρα. Με την κίνηση του εμβόλου η μήτρα κινείται ως προς το ΤΕ, ενώ το τελευταίο παραμένει ακίνητο μέσα στο θάλαμο. Το τελικό προϊόν εξέρχεται από κεντρική οπή στον άξονα του εμβόλου. Η ροή του υλικού έχει αντίθετη κατεύθυνση από αυτή της κίνησης του εμβόλου. Οι τριβές στη διεπιφάνεια ΤΕ/θαλάμου είναι αμελητέες.

γ) *Υδροστατική διέλαση (Hydrostatic extrusion)*

Ο μεταλλικός θάλαμος πληρούται με υγρό, το οποίο συμπιέζεται από το έμβολο. Η αναπτυσσόμενη υδραυλική πίεση μεταφέρεται ομοιόμορφα στη μπιγέτα, η οποία και διελάσεται, ενώ δεν υπάρχει καθόλου τριβή του ΤΕ με τα τοιχώματα του θαλάμου. (Προσοχή πρέπει να δίνεται στη στεγανότητα της εγκατάστασης).

δ) *Κρουστική διέλαση (Impact extrusion)*

Πρόκειται για μια μορφή έμμεσης διέλαση και εκτελείται με μεγάλη ταχύτητα εμβόλου. Ο θάλαμος έχει αντικατασταθεί από αβαθή κοιλότητα και το υλικό αναγκάζεται να περιρρέει το περίγραμμα του εμβόλου.



(α) (β) (γ) (δ)

Σχήμα 2.3 Είδη διέλασης. (α) Άμεση διέλαση, (β) Έμμεση διέλαση, (γ) Υδροστατική διέλαση, (δ) Κρουστική διέλαση

2.3.3 Φάσεις της διέλασης

Διακρίνουμε τις ακόλουθες φάσεις μιας άμεσης διέλασης μαζί με την επίδραση καθεμιάς στη διαμόρφωση του φορτίου κατεργασίας (Σχήμα 2.4):

Φάση 1: *Αρχική ή μεταβατική φάση*

- Βαθμιαία πλήρωση του μεταλλικού θαλάμου με το κατεργαζόμενο υλικό ΤΕ.
- Απότομη αύξηση του φορτίου μέχρι μια μέγιστη τιμή, που αντιστοιχεί στην έναρξη εμφάνισης του πρώτου τμήματος προϊόντος στην έξοδο της μήτρας.

Φάση 2: *Ευσταθής φάση*

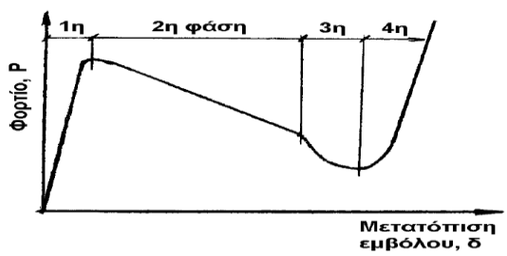
- Ομαλή διεξαγωγή της διέλασης με σταθερό ρυθμό.
- Ανάπτυξη νεκρής ζώνης (ακίνητο υλικό) στην έξοδο της μήτρας.
- Μείωση του μήκους της μπιγέτας μέσα στο θάλαμο με συνέπεια τη μείωση της αντίστασης τριβών.
- Βαθμιαία μείωση του φορτίου διέλασης, σε μικρότερο βαθμό στη θερμή διέλαση ή για μη κρατυνόμενα υλικά και σε μεγαλύτερο ρυθμό για την ψυχρή διέλαση κρατυνόμενων υλικών.

Φάση 3: Φάση αστάθειας

- Όταν το μήκος της μπιγέτας μέσα στο μεταλλικό θάλαμο γίνει πολύ μικρό (το έμβολο πλησιάζει τη νεκρή ζώνη), παρατηρείται τριγμός στο εργαλείο διέλασης και θόρυβος.
- Το φαινόμενο συνοδεύεται με απότομη μείωση του φορτίου μέχρι μια ελάχιστη τιμή.

Φάση 4: *Ανάπτυξη ελαττώματος*

- Περαιτέρω μείωση του μήκους της μπιγέτας οδηγεί σε απώλεια επαφής του κεντρικού τμήματος της μπιγέτας με την πιέζουσα επιφάνεια του εμβόλου, δημιουργείται κεντρική κοιλότητα στο τελικό προϊόν και το υπόλοιπο τμήμα της μπιγέτας παρασύρεται μέσα σ' αυτή την κοιλότητα.
- Το τμήμα του τελικού προϊόντος που φέρει τη σχηματιζόμενη κοιλότητα θεωρείται ελαττωματικό και αποκόπτεται. Κατά τη φάση αυτή σημειώνεται απότομη αύξηση του φορτίου κατεργασίας και συνιστάται η διακοπή της κατεργασίας.



Σχήμα 2.4 Φάσεις της διέλασης

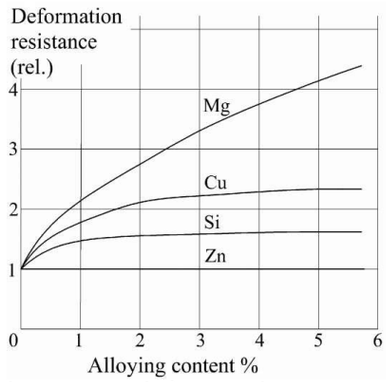
2.4 Σκλήρυνση του αλουμινίου

2.4.1 Γενικά

Το καθαρό αλουμίνιο είναι από μόνο του ένα μέταλλο με σχετικά χαμηλή αντοχή. Το αλουμίνιο, στην πιο καθαρή του μορφή, έχει τάση θραύσης περί των 40 N/mm^2 και τάση διαρροής 10 N/mm^2. Για τις περισσότερες τεχνικές εφαρμογές αυτή είναι πάρα πολύ χαμηλή. Τα κράματα αλουμινίου ωστόσο έχουν αναπτυχθεί με μηχανικές ιδιότητες που υπερβαίνουν κατά πολύ εκείνες του αρχικού υλικού. Οπότε αναπτύχθηκαν τεχνικές σκλήρυνσης του καθαρού αλουμινίου, οι οποίες είναι: α) σκλήρυνση με κραματοποίηση, β) εργοσκλήρυνση και γ) σκλήρυνση με κατακρήμνιση.

2.4.2 Σκλήρυνση με κραματοποίηση

Ένα πολύ αποτελεσματικό μέσο για την παραγωγή ατελειών πλέγματος είναι να εισάγουμε τα κατάλληλα ξένα στοιχεία στη μήτρα του αλουμινίου. Σε ένα ορισμένο βαθμό η αποτελεσματικότητά του εξαρτάται από τη διαφορά στις ατομικές ακτίνες μεταξύ του εξωτερικού στοιχείου και του αλουμινίου. Η σχέση μεταξύ του περιεχομένου του προστιθέμενου ξένου στοιχείου και της επίδρασης της σκλήρυνσης δεν είναι γραμμική, όπως μπορεί να φανεί από το Σχήμα 2.5.



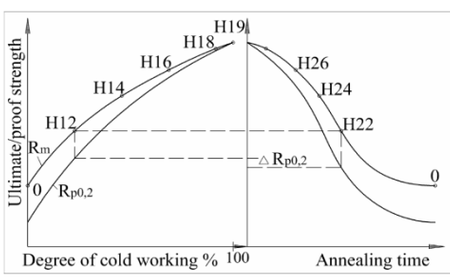
Σχήμα 2.5 Αποτέλεσμα σκλήρυνσης ως μία λειτουργία του προστιθέμενου στοιχείου του κράματος

Ένα από τα στοιχεία που ταιριάζουν καλύτερα για την απαίτηση να βελτιωθεί η αντοχή είναι το μαγνήσιο. Γι αυτό τα κράματα αλουμινίου-μαγνησίου ήταν η κυρίαρχη επιλογή για τις εφαρμογές αλουμινίου πριν από 100 χρόνια και ήταν ακόμα για πολλά χρόνια αργότερα. Ήταν διαθέσιμες υψηλές τιμές αντοχής σε κράματα με περιεκτικότητα μαγνησίου μέχρι 10%.

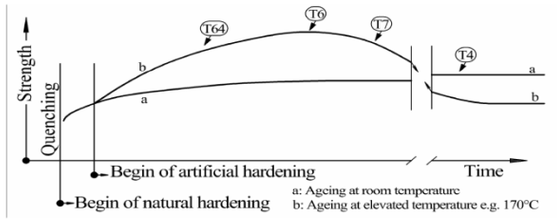
Ωστόσο, τα προβλήματα κατά τη θερμή και ψυχρή κατεργασία αυτών των κραμάτων και η μέτρια διαβρωτική συμπεριφορά των κραμάτων με υψηλή περιεκτικότητα μαγνησίου, οδήγησε στη σταδιακή υιοθέτηση κραμάτων με μικρότερες ποσότητες μαγνησίου, αλλά με προσθήκες μαγγανίου. Το μαγγάνιο σε συνδυασμό με το μαγνήσιο έχουν πολύ σημαντική επίδραση στη σκλήρυνση όπως και στη βελτίωση της αντιδιαβρωτικής συμπεριφοράς. Τα κράματα του αλουμινίου αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο.

2.4.3 Εργοσκλήρυνση

Η πλαστική παραμόρφωση προκαλεί σημαντικές ατέλειες στο πλέγμα αυξάνοντας τον αριθμό των λεγόμενων μετακινήσεων ιδιαίτερα κατά μήκος των επιπέδων ολίσθησης. Με την αύξηση του φορτίου και της παραμόρφωσης, αναπτύσσονται επιπρόσθετα επίπεδα ολίσθησης συνεχώς έτσι ώστε με την προκύπτουσα αύξηση στην πυκνότητα των μετακινήσεων, το υλικό αναπτύσσει αυξημένη μηχανική αντοχή. Παράλληλα με αυτή την αύξηση της αντοχής, μειώνεται η ελατότητα μέχρι τελικά η διαδικασία παραμόρφωσης να σταματήσει. Κατά τη διαδικασία της ψυχρής έλασης, αυτή η επονομαζόμενη εργοσκλήρυνση ή στέλεχος σκλήρυνσης συνεχίζεται έως ότου το υλικό να αναπτύξει ρωγμές, συνήθως στα άκρα της λωρίδας. Ωστόσο, αυτή η διεργασία σκλήρυνσης μπορεί να αναστραφεί με τη χρήση της θερμότητας. Ανάλογα με τη θερμοκρασία και το χρόνο έκθεσης σε αυτή, το όφελος σε αντοχή του υλικού μπορεί να αντιστραφεί και να επιστρέψει στο αρχικό επίπεδο πριν την ψυχρή κατεργασία. Το υλικό επιστρέφει επίσης στην αρχική ολκιμότητά του. Αυτή η θερμική διαδικασία για να καταλήξουμε σε μία λεγόμενη κατάσταση σκλήρυνσης ″Ο temper″ περιγράφεται ως ανόπτηση. Από αυτή τη μαλακή κατάσταση ″Ο″ μπορούν να ξαναρχίσουν οι εργασίες ψυχρής έλασης. Στη βιομηχανική παραγωγή η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί αρκετές φορές για την παραγωγή πολύ λεπτού υλικού από εκεί που ήταν αρχικά μία πλάκα μεγάλου πάχους του μετάλλου.



Σχήμα 2.6 Αντοχή ως συνάρτηση του βαθμού ψυχρής κατεργασίας και της θερμοκρασίας ανόπτησης αντιστοίχως



Σχήμα 2.7 Αντοχή ως συνάρτηση του χρόνου σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και αυξανόμενης της θερμοκρασίας

2.4.4 Σκλήρυνση με κατακρήμνιση

Η επίδραση της σκλήρυνσης με κατακρήμνιση ανακαλύφθηκε για πρώτη φορά και χρησιμοποιήθηκε πρακτικά από τον Wilm το 1906. Το αποτέλεσμα προκαλείται από το γεγονός ότι ένα ή περισσότερα κατάλληλα στοιχεία είναι σε θέση να σχηματίσουν σωματίδια, τις λεγόμενες διαμεταλλικές ενώσεις, μόνα τους ή μαζί με το μητρικό υλικό αλουμινίου. Προκαλούν επίσης ατέλειες στο πλέγμα και ανάλογα με το μέγεθος αυτών των σωματιδίων και την ομοιόμορφη κατανομή τους προκαλούν μια αξιοσημείωτη αύξηση της αντοχής. Η όλη διαδικασία ξεκινά με ένα διάλυμα θερμικής επεξεργασίας, δηλαδή όλα τα στοιχεία του κράματος είναι σε μορφή διαλύματος (στερεό διάλυμα), μετά από αυτό είναι απαραίτητη σβέση για να πάρουν μία ομοιόμορφη κατανομή όλα τα στοιχεία σε συγκεκριμένη θερμοκρασία. Μετά που αρχίζουν να κινούνται στη μήτρα του αλουμινίου τα στοιχεία που εμπλέκονται, συνενώνονται σε διαμεταλλικές ενώσεις και αναπτύσσονται. Αυτό συμβαίνει σε θερμοκρασία δωματίου αλλά με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες (φυσική γήρανση και γήρανση σε υψηλές θερμοκρασίες). Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε ότι η σκλήρυνση με κατακρήμνιση μπορεί να αυξηθεί εάν δρούνε πολύ υψηλές θερμοκρασίες για λίγο χρόνο στο υλικό ή πιο χαμηλές θερμοκρασίες για μεγαλύτερη χρονική περίοδο.

Σχήμα 2.6 Δείχνει τη διαδικασία της ψυχρής κατεργασίας και της ανόπτησης, ως συνάρτηση του χρόνου υπό σταθερή θερμοκρασία. Είναι χαρακτηριστικό για την ψυχρή κατεργασία ότι τα πρώτα στάδια της διαδικασίας έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση επί της αντοχής των υλικών.

Σχήμα 2.7 Δείχνει τη διαδικασία της γήρανσης. Είναι χαρακτηριστικό ότι η φυσική γήρανση ξεκινά αμέσως μετά τη σβέση με σχετικά υψηλή ταχύτητα, αλλά στη συνέχεια μειώνεται σταδιακά προσεγγίζοντας ασυμπτωτικά ένα ανώτατο όριο (T4). Ανάλογα με το κράμα αυτό μπορεί να χρειαστεί εβδομάδες, αλλά για τα περισσότερα κράματα η μέθοδος μπορεί να θεωρηθεί ως ολοκληρωμένη μετά από μία εβδομάδα. Μετά από ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, (ώρες, λίγες ημέρες) εξαρτάται κυρίως από τις συνθήκες κατασκευής, το υλικό που υφίσταται τεχνητή γήρανση τοποθετείται σε κλίβανο, οπότε η γήρανση μπορεί να εκτελεσθεί κάτω από διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασίας. Τυπικά για όλες τις θερμοκρασίες είναι μια γρήγορη σκλήρυνση με φθίνοντα ρυθμό φτάνοντας στην κορυφή (T6), η οποία, ανάλογα με τη θερμοκρασία, μπορεί να είναι πολύ επίπεδη. Εάν η θερμοκρασία επιβάλλεται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, η αντοχή μειώνεται και έχουμε μία «υπερ-γηρασμένη» κατάσταση σκλήρυνσης (T7). Σε αυτό το στάδιο το υλικό παρουσιάζει κάποιες βελτιωμένες φυσικές ιδιότητες: καλύτερη ολκιμότητα, αντίσταση στη διάβρωση (μερικά κράματα χαλκού και/ή ψευδαργύρου) και καλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα. Πρέπει να αναφερθεί ότι το διάγραμμα δεν είναι υπό κλίμακα και η τετμημένη δεν πρέπει να θεωρηθεί γραμμική. Η διάρκεια των διαφόρων φάσεων μπορεί να είναι πολύ διαφορετική ανάλογα με το κράμα και τις θερμικές συνθήκες.

Εδώ πρέπει να τονίσουμε ότι σήμερα τα σκληρυμένα με κατακρήμνιση κράματα εφαρμόζονται σε πολλούς τομείς (π.χ. διελασμένες διατομές). Αυτά επιδεικνύουν

αξιοσημείωτα χαμηλότερη αντοχή στη παραμόρφωση στις διαδικασίες (θερμής) επεξεργασίας και αποκτούν τη συχνά αξιοσημείωτη αντοχή τους αργότερα με τη διαδικασία της σκλήρυνσης με κατακρήμνιση.

2.5 Συγκόλληση αλουμινίου

2.5.1 Γενικά

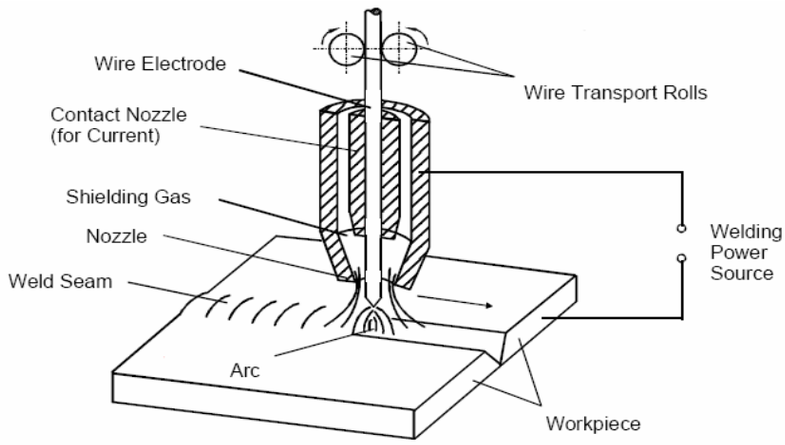
Τα τελευταία είκοσι πέντε χρόνια η συγκόλληση τόξου έχει επιτύχει την απόλυτη αποδοχή ως μια μέθοδος σύνδεσης του αλουμινίου, ακολουθώντας την αμερικάνικη εξέλιξη της συγκόλλησης τόξου με προστασία αερίου της δεκαετίας του πενήντα. Έτσι αντικαταστήθηκε η καθιερωμένη συγκόλληση με επικαλυμμένα ηλεκτρόδια, η οποία αποδείχτηκε άχρηστη για το αλουμίνιο. Δύο διαδικασίες με προστασία αερίου είναι διαθέσιμες: η MIG (Metal Inert Gas) και TIG (Tungsten Inert Gas). Η MIG είναι ευρύτερα διαδεδομένη, ειδικά για βαρύτερες κατασκευές, χρησιμοποιώντας γεωμετρίες συγκόλλησης και προετοιμασίες παρόμοιες με αυτές του δομικού χάλυβα. Η TIG χρησιμοποιείται για μικρές συγκολλήσεις σε υλικά μικρού βάρους, καθώς επίσης και για τις επιδιορθώσεις των συγκολλήσεων MIG. Το κύριο χαρακτηριστικό και στις δύο διαδικασίες είναι η ροή αδρανούς αερίου μέσα από το δαυλό συγκόλλησης ο οποίος προστατεύει το τόξο και το λουτρό συγκόλλησης από τον αέρα και έτσι αποτρέπεται η οξείδωση. Το αέριο που χρησιμοποιούμε συνήθως για το αλουμίνιο είναι το αργό. Μια εναλλακτική λύση είναι το ήλιο, παρόλο που έχει περιορισμένη εφαρμογή σήμερα. Η εξωτερική συγκόλληση θα πρέπει να γίνεται εντός ενός θαλάμου αν αποτρέπεται η διαρροή του αερίου στον αέρα.

Η συγκόλληση τόξου με προστασία αερίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα περισσότερα κράματα του αλουμινίου, συμπεριλαμβανομένων και των σειρών υλικών lxxx, 3xxx, 5xxx, 6xxx. Δεν είναι καλή για τα κράματα 2xxx λόγω της ρηγμάτωσης, ούτε για τον ισχυρότερο τύπο του υλικού 7xxx. Ο ασθενέστερος τύπος των σειρών των κραμάτων 7xxx είναι συγκολλήσιμος, αλλά με ικανοποιητικά αποτελέσματα εξαρτώμενα από την καλή τεχνική.

2.5.2 Συγκόλληση MIG

Η MIG είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιεί συνεχές ρεύμα (DC) με θετικό ηλεκτρόδιο. Είναι παρόμοια με τη συγκόλληση CO2 του χάλυβα. Το ηλεκτρόδιο έχει τη μορφή καλωδίου, εφοδιασμένου με ένα πηνίο και έχει τυπική διάμετρο περίπου 1,5mm. Τροφοδοτείται αυτόματα μέσω ενός δαυλού και μέσα στο τόξο ενώ κατασκευάζεται η συγκόλληση. Ο δαυλός, ο οποίος είναι υδρόψυκτος, είναι πολύ περίπλοκος εν συγκρίσει με αυτόν που χρησιμοποιούμε για την καθιερωμένη συγκόλληση με επικαλυμμένα ηλεκτρόδια, επειδή ο σωλήνας εφοδιασμού έχει να φέρει ταυτόχρονα: ρεύμα, καλώδιο, αργό και νερό. Η διαδικασία MIG είναι κατάλληλη για συγκολλήσεις υλικών με ελάχιστο πάχος 4-5mm. Η διαδικασία MIG έχει δύο ειδικά χαρακτηριστικά. Πρώτον είναι κατάλληλη για τοπικές συγκολλήσεις συμπεριλαμβανομένης και της εναέριας. Δεύτερον, το μήκος του τόξου είναι αυτοκαθοριζόμενο. Αυτό το προσόν της «ημιαυτοματοποίησης» κάνει τη διαδικασία αυτή σχετικά εύκολη στη χρήση.

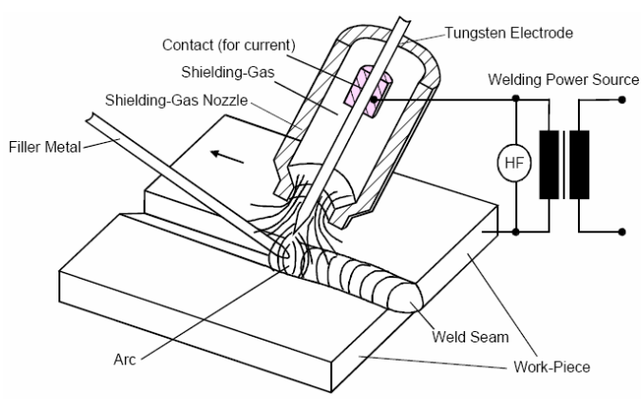
Το μέγιστο πιθανό μέγεθος μιας συγκόλλησης MIG είναι περίπου 40 mm ανά τη φορά. Επίσης οι ταχύτητες συγκόλλησης είναι υψηλότερες από αυτές της συγκόλλησης με επικαλυμμένα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιείται στο χάλυβα. Για μια συγκόλληση σε έλασμα 6mm είναι λογική μια ταχύτητα της τάξεως των 1,5 m/s σε σχέση με τα 0,5 m/s για το χάλυβα.



Σχήμα 2.8 Διαδικασία συγκόλλησης MIG

2.5.3 Συγκόλληση TIG

Η TIG είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιεί εναλλασσόμενο ρεύμα. Ο υδρόψυκτος δαυλός έχει ένα μη αναλώσιμο ηλεκτρόδιο βολφραμίου, και όπως με την MIG απελευθερώνει ρεύμα αργού. Το υλικό συγκόλλησης κρατιέται στο άλλο χέρι και τροφοδοτείται ξεχωριστά. Η TIG απαιτεί περισσότερο εξοπλισμό από ότι η MIG, για να ελέγχεται το μήκος του τόξου και η τροφοδοσία του υλικού συγκόλλησης. Ένα μειονέκτημα της TIG είναι ότι ο χειριστής μπορεί από αμέλεια να αφήσει το δαυλό για πολύ ώρα σε κάποιο μέρος προκαλώντας μια τοπική υπερθέρμανση και συνεπώς μια διευρυμένη Ζώνη Θερμικής Επιρροής. Η διαδικασία TIG είναι κατάλληλη για συγκολλήσεις φύλλων παρά ελασμάτων. Στο ανώτατο όριο του πάχους των φύλλων (6mm) η διείσδυση μπορεί να βελτιωθεί με τη χρήση ηλίου αντί αργού. Μια χρήσιμη παραλλαγή είναι αυτή του παλμικού τόξου. Αυτή χρησιμοποιεί εναλλασσόμενο ρεύμα με την αντίστοιχη διάταξη, κάνοντας τη συγκόλληση που παράγεται να είναι μια σειρά από βώλους, οι οποίοι τήκονται μαζί αν οι παράμετροι είναι κατάλληλα ρυθμισμένοι. Η τεχνική αυτή λέγεται ότι είναι ανώτερη από τη συνηθισμένη TIG όταν συγκολλούμε λεπτά φύλλα, όπου απαιτείται ευκολότερος έλεγχος της διείσδυσης. Επίσης γίνεται περιορισμένη ανάπτυξη της θερμότητας.



Σχήμα 2.9 Διαδικασία συγκόλλησης TIG

3 Κράματα του αλουμινίου

3.1 Γενικά

Οι μηχανικοί σχεδιάζοντας μια κατασκευή από αλουμίνιο, αντίθετα με ότι συμβαίνει με το χάλυβα, έρχονται αντιμέτωποι με δύο ιδιαιτερότητες. Η πρώτη είναι ο μεγάλος αριθμός των κραμάτων σε συνδυασμό με τις λεγόμενες διαφορετικές καταστάσεις σκλήρυνσης που είναι διαθέσιμες. Η δεύτερη, και αυτό μπορεί να είναι ένα πρόβλημα, είναι το γεγονός ότι είναι διαθέσιμα σε αποθέματα μόνο ένα περιορισμένο φάσμα των κραμάτων είτε ως φύλλα είτε ως τυποποιημένες διατομές και αυτά περιορίζονται σε μικρά σχήματα, αν και μερικοί προμηθευτές έχουν μερικές διατομές μεσαίου μεγέθους. Ο λόγος γι' αυτό είναι ότι οι μέθοδοι για την παραγωγή διατομών χάλυβα συνήθως περιλαμβάνουν έλαση σε αντίθεση με τις διατομές αλουμινίου που κατασκευάζονται συνήθως από θερμή εξώθηση (διέλαση).

Η έλαση χαρακτηρίζεται από το υψηλό κόστος της μήτρας έλασης σε συνδυασμό με το γεγονός ότι πρέπει να αλλαχθεί πολλές φορές και ως εκ τούτου απαιτούνται μεγάλες ποσότητες παραγωγής για την οικονομική κατασκευή μίας διατομής. Το κόστος της μήτρας εξώθησης αλουμινίου κυμαίνεται από χαμηλά για μικρές διατομές μέχρι μέτρια για τα μεγάλα σχήματα. Οι ποσότητες για να παραχθεί οικονομικά ένα τμήμα αλουμινίου είναι σχετικά μικρές και κυμαίνονται μεταξύ 200 kg και 3.000 kg, ανάλογα με το μέγεθος της διατομής. Το αποτέλεσμα είναι ότι πολλοί μηχανικοί και εταιρείες σχεδιάζουν τις δικές τους διατομές οι οποίες είναι ειδικές για την κατασκευή και έχουν σχεδιαστεί συνήθως με υψηλή λειτουργικότητα. Το 90% των διατομών που παράγονται από διέλαση αλουμινίου είναι ξεχωριστά σχεδιασμένες και ως εκ τούτου είναι διαθέσιμες μόνο για χρήση από τον σχεδιαστή / αγοραστή της διατομής. Αυτό εξηγεί την ιδιαίτερη κατάσταση των αποθεμάτων η οποία ισχύει για τις διατομές αλουμινίου και γιατί δεν υπάρχουν οι λεγόμενες πρότυπες διατομές.

Για τον έμπειρο μηχανικό η επιλογή του κράματος και της κατάστασης σκλήρυνσης δεν είναι πολύ δύσκολη, ειδικά μετά την αποσαφήνιση των παρακάτω σημείων:

- Ποιο το επίπεδο της αντοχής που απαιτείται;
- Είναι πραγματικά απαραίτητη η υψηλή αντοχή συγκόλλησης; (Είτε: Είναι δυνατόν να αποφευχθεί η συγκόλληση σε διαφορετικές θέσεις, π.χ. μπορεί να εξαρτάται από το μέγεθος του φύλλου που είναι διαθέσιμο)
- Ποια μορφή προϊόντος αλουμινίου απαιτείται: φύλλο / έλασμα / διελασμένη διατομή;
- Ποιες είναι οι ποσότητες που απαιτούνται - είναι διαθέσιμες σε απόθεμα;
- Είναι εξειδικευμένα σχεδιασμένες διατομές σε ποσότητες επαρκείς για την παραγωγή;
- Υπάρχει απαίτηση για υλικό υψηλής πλαστιμότητας;
- Υπάρχει απαίτηση για διατομές με καμπτική ικανότητα / διαμορφωσιμότητα;
- Υπάρχει απαίτηση για ικανότητα αναδίπλωσης / διαμορφωσιμότητα για φύλλα αλουμινίου;
- Είναι απαιτούμενη εξαιρετικά καλή συμπεριφορά στη διάβρωση (για ειδικές εφαρμογές);
- Υπάρχουν ειδικές απαιτήσεις για έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες;
- Τελευταίο, αλλά όχι λιγότερο σημαντικό, ποιο θα είναι το κόστος των υλικών;

Υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των διαφόρων κραμάτων και των υποπροϊόντων και συχνά ο μηχανικός είναι υποχρεωμένος να αλλάξει το σχεδιασμό για να κάνει συμβιβασμούς στο κόστος.

Αυτό μπορεί να εξηγήσει γιατί ο μηχανικός σχεδιάζοντας με αλουμίνιο πρέπει να γνωρίζει πολύ περισσότερα για το ίδιο το υλικό ειδικά όταν συγκρίνεται με τη

διαδικασία σχεδιασμού με χάλυβα. Αυτό αφορά επίσης κάποιες φυσικές ιδιότητες οι οποίες είναι διαφορετικές για το αλουμίνιο από το χάλυβα.

3.2 Ιδιότητες των πρόσθετων στοιχείων

Τα κράματα του αλουμινίου τα οποία συνήθως αποκαλούνται συνήθως ελαφριά κράματα, αναπτύχθηκαν ώστε να αυξηθεί η αντοχή του καθαρού αλουμινίου το οποίο είναι πολύ όλκιμο και ανθεκτικό σε διάβρωση. Σε αντίθεση με τα κράματα σιδήρου άνθρακα (χάλυβας), τα κράματα αλουμινίου απαιτούν μικρή ποσότητα θερμικής ισχύος για την παραγωγή τους. Τα βασικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στα κράματα είναι το μαγνήσιο, το πυρίτιο, ο ψευδάργυρος, ο χαλκός, και το μαγγάνιο. Το νικέλιο, το κοβάλτιο, το χρώμιο, ο σίδηρος, το τιτάνιο, και το ζιρκόνιο χρησιμοποιούνται ως πρόσθετα. Οι βασικές ιδιότητες των στοιχείων αυτών είναι οι ακόλουθες:

- Το *μαγνήσιο* μειώνει το σημείο τήξης στους 451° C (αυτός είναι ο λόγος που χρησιμοποιείται ως υλικό συγκολλήσεων) και αυξάνει την εργασιμότητα και την αντίσταση σε διάβρωση σε αλμυρό νερό.
- Το *πυρίτιο* αυξάνει την αντοχή και την ολκιμότητα και μειώνει το σημείο τήξης. Σε συνδυασμό με το μαγνήσιο επιτρέπει τη σκλήρυνση μέσω κατακρήμνισης.
- Ο *ψευδάργυρος* μειώνει δραστικά την αντοχή του και επιτρέπει τη θερμή ή ψυχρή σκλήρυνση μέσω κατακρήμνισης.
- Ο *χαλκός* δίνει ακόμη μεγαλύτερη αύξηση της αντοχής και επιτρέπει την ψυχρή σκλήρυνση μέσω κατακρήμνισης, αλλά μειώνει την αντίσταση στη διάβρωση, τη συγκολλησιμότητα και την ολκιμότητα.
- Το *νικέλιο* αυξάνει την αντοχή σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών.
- Το *τιτάνιο* δίνει μειωμένο μέγεθος.
- Το *χρώμιο* αυξάνει την αντίσταση σε διάβρωση.
- Ο *σίδηρος* είναι συνήθως μια πρόσμιξη η οποία είναι δυνατόν να αυξήσει την αντοχή του καθαρού αλουμινίου εάν χρησιμοποιηθεί σε χαμηλό ποσοστό.

Αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μοναδικά στοιχεία και επίσης σε συνδυασμούς. Παρακάτω παρουσιάζονται πίνακες που παρουσιάζουν τις κατηγορίες των κραμάτων αυτών.

Πίνακας 3.1 Οικογένειες σφυρήλατων κραμάτων

	Mn	Mg	Si	Zn
Mn	AlMn 3xxx			
Mg	AlMgMn 5xxx	AlMg 5xxx	AlMgSi 6xxx	
Si		AlSiMg 6xxx	AlSi 4xxx	
Zn		AlZnMg AlZnMgCu 7xxx		
Cu		AlCuMg 2xxx		

Πίνακας 3.2 Οικογένειες χυτών κραμάτω

	Mn	Mg	Si	Zn	Cu
Mn					
Mg		AlMg 5xxxx			
Si		AlSiMg 4xxxx	AlSi 44xxx		AlSiCu 4xxxx
Zn		AlZnMg 7xxxx			
Cu					AlCu 2xxxx

3.3 Ονοματολογία των σφυρήλατων κραμάτων

Το σύστημα ονοματολογίας της Aluminium Association (AA) στις ΗΠΑ είναι σήμερα το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο σύστημα. Τα ευρωπαϊκά πρότυπα επίσης ακολουθούν αυτή την ονοματολογία. Κάνει χρήση 4 ψηφίων για τον ορισμό ενός κράματος, σε ειδικές περιπτώσεις, τα 4 ψηφία μπορεί να ακολουθούνται από ένα γράμμα (A, B, C, ...). Η οικογένεια ή το κύριο στοιχείο κραματοποίησης χαρακτηρίζεται από το πρώτο ψηφίο. Ο Πίνακας 3.1 δείχνει υπό το χημικό συμβολισμό την αντίστοιχη αριθμητική ονομασία.

Οι οικογένειες των κραμάτων που δεν αναφέρονται στον πίνακα είναι οι σειρές 1xxx, 8xxx και 9xxx:

Η *σειρά ονομασίας 1xxx* αφορά υλικά αργιλίου σε μορφή κράματος αλουμινίου τα οποία διακρίνονται ανάλογα με το βαθμό καθαρότητας τους.

Η *σειρά ονομασίας 8xxx* αφορά διάφορα είδη κραμάτων που δεν μπορούν να ομαδοποιηθούν στις άλλες οικογένειες (δηλαδή κράματα Fe).

Η *σειρά ονομασίας 9xxx* δε χρησιμοποιείται.

Το πρώτο ψηφίο δίνει βασικές πληροφορίες για το κύριο στοιχείο κράματος(ων):

2xxx: Χαλκός
3xxx :Μαγγάνιο
4xxx :Πυρίτιο
5xxx :Μαγνήσιο
6xxx :Μαγνήσιο και Πυρίτιο
7xxx :Ψευδάργυρος

Το σύστημα ονομασίας λέει επίσης κάτι σχετικά με τη σκλήρυνση των κραμάτων που ανήκουν σε μια οικογένεια.

Η 1xxx, 3xxx και 5xxx σειρά είναι τα λεγόμενα μη θερμικά κατεργασμένα κράματα. Αποκτούν την αντοχή τους μέσω της κραματοποίησης (π.χ. με αύξηση σε περιεκτικότητα του Mg) και της εργοσκλήρυνσης.

Η 2xxx, 6xxx και 7xxx σειρά είναι θερμικά κατεργασμένα κράματα, που αποκτούν την αντοχή τους μέσω της κραματοποίηση, αλλά κάνουν χρήση της σκλήρυνσης μέσω κατακρήμνισης ως ο κύριο μηχανισμό. Εργοσκλήρυνση σε κανονική παραγωγή δε χρησιμοποιείται.

Η 4xxx και 8xxx σειρά των κραμάτων δεν μπορεί να χαρακτηριστεί τόσο εύκολα. Και οι τρεις μέθοδοι σκλήρυνσης μπορούν να βρεθούν σε αυτές τις ομάδες ανάλογα με τον τύπο του κράματος.

3.4 Ονοματολογία των κραμάτων χύτευσης

Για τα προϊόντα χύτευσης προτιμώνται αρκετά διαφορετικά κράματα. Για τροχίσκους προτιμούνται κράματα σειράς 4xxxx με υψηλή περιεκτικότητα σε πυρίτιο, διότι παράγονται εύκολα με αυτά τα κράματα καλής ποιότητας. Οι ονομασίες των κραμάτων χύτευσης έχουν το πρόθεμα «EN AC-" για να τα διακρίνουμε από τα σφυρήλατα κράματα και έχουν 5 ψηφία συνολικά. Το σύστημα δημιουργήθηκε στην Ευρώπη και όχι στις ΗΠΑ.

Το πρώτο ψηφίο σημαίνει το ίδιο όπως και για τα σφυρήλατα κράματα, δηλαδή καθορίζει το κύριο στοιχείο του κράματος. Υπάρχει πάντως μια διαφορά όσον αφορά τα κράματα χύτευσης με προσθήκες μαγνησίου και πυριτίου μιας και γίνονται για την ανάπτυξη σκλήρυνσης και επομένως ανώτερες μηχανικές ιδιότητες, μέσω της

ελεγχόμενης κατακρήμνισης στη φάση του πυριτιούχου μαγνησίου. Στα κράματα χύτευσης με υψηλότερα επίπεδα πυριτίου έχουμε μείωση της τάση ρηγμάτωσης λόγω συρρίκνωσης. Συνεπώς, ακόμη και στη φάση των κραμάτων χύτευσης σκληρυμένα με πυριτιούχο μαγνήσιο, το πυρίτιο είναι σε περίσσεια των άλλων στοιχείων. Η λογική του συστήματος χαρακτηρισμού απαιτεί συνεπώς τα κράματα αυτά να έχουν ένα "4", ως πρώτο ψηφίο σε αντίθεση με τα σφυρήλατα κράματα σκληρυμένα με πυριτιούχο μαγνήσιο τα οποία έχουν ένα "6" ως πρώτο ψηφίο.

Στη σειρά 4xxxx βρίσκουμε κυρίως θερμικά κατεργασμένα κράματα με υποομάδα την 44xxx που αφορά μη θερμικά κατεργασμένα κράματα, επειδή έχουν μόνο το πυρίτιο ως κύριο στοιχείο του κράματος. Μια δεύτερη ομάδα από μη θερμικά κατεργασμένα κράματα είναι η ομάδα με το Mg ως ενιαίο κύριο στοιχείο του κράματος που υποδεικνύεται ως 5xxxx ομάδα. Η εργοσκλήρυνση για τη χύτευση δεν υφίσταται.

3.5 Αριθμητική και χημική ονοματολογία των κραμάτων

Σε παλαιότερες εποχές τα πρότυπα πολλών χωρών έκαναν χρήση των ονομασιών με βάση το χημικό συμβολισμό τους. Για το μηχανικό που δεν ήταν εξοικειωμένος με τα κράματα αλουμινίου αυτό ήταν ένα πλεονέκτημα. Θα μπορούσε να κρίνει ένα κράμα με μια τέτοια ονομασία πολύ πιο εύκολα από άποψη αντοχής, μεθόδων σκλήρυνσης, συγκολλησιμότητας και συμπεριφοράς κάτω από διαφορετικές καιρικές συνθήκες. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο τα Ευρωπαϊκά Πρότυπα αλουμινίου εξακολουθούν να χρησιμοποιούν δύο αρχές για την ονομασία των κραμάτων αλουμινίου: αριθμητική και με χημικό συμβολισμό.

Οι αριθμοί στη χημική ονομασία υποδεικνύουν το τυπικό περιεχόμενο του στοιχείου κραματοποίησης στο κράμα. Η σωστή ονομασία σύμφωνα με τα ευρωπαϊκά πρότυπα περιλαμβάνει πάντα το πρόθεμα EN AW-. Αυτό το πρόθεμα συχνά δεν χρησιμοποιείται όταν μιλάμε για τα κράματα, αλλά σε γραπτά κείμενα, π.χ. σε εντολές, μπορεί να είναι σημαντική, αφού υπάρχουν ακόμη άλλα 4 συστήματα ονοματολογίας με ψηφία σε διάφορες περιοχές του κόσμου, ιδιαίτερα σε επιχειρήσεις αλουμινίου

Πίνακας 3.3α Σφυρήλατα κράματα που αναφέρονται στο EN 1999-1-1 και η μορφή των τυποποιημένων υποπροϊόντων (πίνακες 3.2 α-γ)

Ονοματολογία	*Χημική ονομασία*			
EN AW-	*EN AW-*	*φύλλα*	*διελάσεις*	*σφυρήλατα*
3004	AlMn1 Mg1	X		
3005	AlMn1 Mg0,5	X		
3103	AlMn1	X		
5005/5005A	AlMg1(B)/(C)	X		
5049	AlMg2Mn0,8	X		
5052	AlMg2,5	X		
5083	AlMg4,5Mn0,7	X	X	X
5454	AlMg3Mn	X	X	
5754	AlMg3	X	X	X
6060	AlMgSi		X	
6061	AlMg1SiCu	X	X	
6063	AlMg0,7Si		X	
6005A	AlSiMg(A)		X	
6082	AlSi1MgMn	X	X	X
6106	AlMgSiMn		X	
7020	AlZn4,5Mg1	X	X	
8011A	AlFeSi	X		

Πίνακας 3.3β Σφυρήλατα κράματα αλουμινίου που αναφέρονται στο EN 1999-1-4, (πίνακας 3.1)

EN AW-	*EN AW*
3003	AlMn1Cu
3004 *	AlMn1Mg1
3005 *	AlMn1Mg0,5
3103 *	AlMn1
3105	AlMn0,5Mg0,5
5005 *	AlMg1(B)
5052 *	AlMg2,5
5251	AlMg2

Πίνακας 3.3γ Κράματα χύτευσης αλουμινίου που αναφέρονται στο EN 1999-1-1, (πίνακας 3.3)

EN AC-	*EN AC-*
42100	AlSi7Mg0,3
42200	AlSi7Mg0,6
43000	AlSi10Mg(a)
43300	AlSi9Mg
44200	AlSi12(a)
51300	AlMg5

3.6 Καταστάσεις σκλήρυνσης και ονομασία καταστάσεων σκλήρυνσης

3.6.1 Γενικά

Είναι πολύ χαρακτηριστική για το αλουμίνιο και μια νέα εμπειρία για τον πολιτικό μηχανικό που χρησιμοποιεί χάλυβα μόνο, ότι τα υλικά είναι διαθέσιμα με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες, δηλαδή σε διαφορετικές καταστάσεις σκλήρυνσης. Στην πράξη, το υψηλότερο επίπεδο αντοχής μπορεί να μην είναι το καλύτερο για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Εάν το υλικό απαιτείται για συγκεκριμένες εφαρμογές, π.χ. σχηματισμού αναδίπλωσης ή για κατασκευές που θα υποβληθούν σε κρουστικά φορτία, μπορεί συχνά να είναι ένα πλεονέκτημα χαμηλότερης αντοχής υλικό.

Οι ονομασίες των καταστάσεων σκλήρυνσης για χύτευση είναι οι ίδιες. Δεδομένου ότι καμία εργασία σκλήρυνσης της χύτευσης δεν πραγματοποιείται οι ονομασίες H- και O-temper δε χρησιμοποιούνται.

Η λεγόμενη κατάσταση σκλήρυνσης F temper αποτελεί μια ιδιαιτερότητα. Σύμφωνα με το πρότυπο EN 515 σημαίνει "όπως κατασκευάζονται, δεν καθορίζονται μηχανικές ιδιότητες ″ και αυτή είναι μια κατάσταση κατά προτίμηση για υλικά που προορίζονται για περαιτέρω επεξεργασία και δεν προορίζονται για άμεση χρήση σε κατασκευές. Για διαδικασίες διέλασης αυτή είναι η κατάσταση μετά το πρώτο βήμα παραγωγής και συνεπώς τα προκύπτοντα υποπροϊόντα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε αυτή τη κατάσταση. Αυτό είναι θέμα οικονομίας ειδικά για μη θερμικά κατεργασμένα κράματα. Αυτά δεν μπορούν να σκληρυνθούν λόγω γήρανσης ούτως ή άλλως και μετά τη διέλαση είναι σε μεταλλουργική κατάσταση κοντά στην κατάσταση O. Το υλικό αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κατασκευές, ακόμη και αν οι τυποποιημένες τιμές αντοχής που παρέχονται είναι μόνο για ενημέρωση. Για τα φύλλα κατάστασης σκλήρυνσης (temper) F το συμπέρασμα αυτό δεν επιτρέπεται. Σύμφωνα με τον ορισμό, σε κατάσταση F μπορεί να είναι ένα πολύ σκληρό υλικό και συνεπώς γενικά δεν είναι κατάλληλο για χρήση.

Όσον αφορά τις χυτεύσεις, έχουμε μια άλλη κατάσταση. Κατάσταση (temper) "F" σημαίνει κατάσταση «as cast», δηλαδή μια κατάσταση χωρίς μετέπειτα θερμική επεξεργασία. Το EN 1706 ορίζει δεσμευτικές τεχνολογικές τιμές για ένα τέτοιο υλικό (θερμικά κατεργάσιμο ή μη θερμικά κατεργάσιμο).

3.6.2 Καταστάσεις σκλήρυνσης μη θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων

Για πολλά χρόνια και σε πολλές χώρες, το σύστημα που χρησιμοποιείτο για να χαρακτηρίσει την κατάσταση σκλήρυνσης (temper) με την οποία μη θερμικά

κατεργάσιμα υλικά χαρακτηρίσθηκαν, χρησιμοποιώντας όρους όπως: μαλακό, 1/4 σκληρό, 1/2 σκληρό. Οι χαρακτηρισμοί αυτοί ήταν πολύ εύκολο για κάποιον να τους καταλάβει και να τους θυμηθεί. Αλλά αυτό το «σύστημα» έχει εγκαταλειφθεί. Με την αύξηση του βαθμού ψυχρής κατεργασίας, η τελική αντοχή αυξάνεται. Η πιο σκληρή κανονικά παραγόμενη κατάσταση σκλήρυνσης έχει την ονομασία κατάστασης H18 και η κατάσταση ½ σκληρότητας ονομασία H14. Οι καταστάσεις (tempers) H16 και H12 βρίσκονται σε κάθε πλευρά της σκληρότητας H14. Μιλώντας για μη θερμικά κατεργάσιμα κράματα αυτό δεν είναι απολύτως ακριβές, αφού μία ελεγχόμενη θερμική κατεργασία δίνει πλεονεκτήματα τόσο τεχνικά όσο και οικονομικά μιας και κάνοντας ανόπτηση το υλικό από την ψυχρής έλασης κατάσταση H18 μετατρέπεται σε μια πιο ήπια κατάσταση. Αυτή είναι η καθημερινή πρακτική στην ελασματουργεία. Έτσι, τα υλικά σε μία σκληρής έλασης κατάσταση που δεν είναι η πιο σκληρή δυνατή κατάσταση (δηλαδή H19 = πολύ σκληρά), είναι εμπορικά διαθέσιμα σε δύο διαφορετικές καταστάσεις, H1x και H2x, (π.χ. H14 και H24). Οι δύο καταστάσεις έχουν την ίδια τάση θραύσης, αλλά το υλικό σε H2x έχει μια ελαφρώς χαμηλότερη τάση διαρροής, αλλά μεγαλύτερη επιμήκυνση θραύσης. Η κατάσταση είναι παρόμοια με την κατάσταση H3x. Αυτές οι καταστάσεις χαρακτηρίζονται από μία (βαθμιαία) εργασία σκλήρυνσης η οποία ακολουθείται από μία θερμική επεξεργασία σταθεροποίησης. Οι χαρακτηριστικές αντοχές σε αυτό το υλικό τότε είναι μικρότερες από ότι σε κατάσταση σκλήρυνσης H1x. Το εύρος των καταστάσεων σκλήρυνσης H4x έχει εισαχθεί για υλικά που είναι εργοσκληρυμένα και κατόπιν υποβάλλονται σε κάποια μερική αναδιάταξη κατά τη διάρκεια μιας μεταγενέστερης βαφής φούρνου ή διαδικασίας λακαρίσματος. Οι τεχνολογικές τιμές της κατάστασης σκλήρυνσης H4x δεν είναι κατ' ανάγκη ταυτόσημες με τις H2x/H3x. Ανάλογα με το είδος του κράματος μπορεί να υπάρχουν μικρές διαφορές.

Επιπλέον ψηφία δείχνουν ιδιότητες των υλικών οι οποίες είναι ως επί το πλείστον λιγότερο ενδιαφέρουσες για τον πολιτικό μηχανικό. Ο Πίνακας 3.4 δίνει παραδείγματα των ορισμών των καταστάσεων σκλήρυνσης για μη θερμικά κατεργάσιμα υλικά.

Πίνακας 3.4 Καταστάσεις σκλήρυνσης σε χρήση για δομικές εφαρμογές για εργοσκληρυμένα υποπροϊόντα

Symbol	*Description*
O	Annealed (soft)
H 111	Annealed and slightly strain-hardened (less than H11) during subsequent operations such as stretching or levelling
H12	Strain-hardened, 1/4 hard
H22	Strain-hardened and partially annealed, 1/4 hard
H32	Strain-hardened and stabilized, 1/4 hard
H42	Strain-hardened and painted or lacquered -1/4 hard
H 14	Strain-hardened, 1/2 hard
H18	Strain-hardened, 4/4 hard (fully hardened)

3.6.3 Καταστάσεις σκλήρυνσης θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων

Η πλήρης θερμική επεξεργασία περιλαμβάνει θερμική επεξεργασία διαλύματος, μια διαδικασία σβέσης και μετέπειτα γήρανσης, όταν συμβαίνει η πραγματική σκλήρυνση. Πρέπει να πούμε ότι, σε αντίθεση με το χάλυβα, τα κράματα αλουμινίου δεν είναι σίγουρα σκληρά μετά τη σβέση.

Για να πάρουμε τις υψηλότερες τιμές αντοχής είναι σημαντικό να διατηρηθεί το υλικό για επαρκές χρονικό διάστημα στη σωστή θερμοκρασία του θερμικού διαλύματος και να ακολουθηθεί η σωστή διαδικασία σβέσης. Ανάλογα με το κράμα αυτό μπορεί να πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας νερό ή κινούμενου αέρα. Η σβέση με νερό δημιουργεί ρωγμές και παραμένουσες τάσεις. Στα κράματα που έχουμε σβέση με αέρα έχουμε κάποια τεχνικά και οικονομικά πλεονεκτήματα, αλλά τα περισσότερα κράματα υψηλής αντοχής πρέπει να είναι σβησμένα με νερό. Εάν το διάλυμα θερμική επεξεργασία ή η διαδικασία σβέσης δεν είναι σωστά εκτελεσμένα, αυτό θα οδηγήσει σε χαμηλότερες τιμές μηχανικής αντοχής και ολκιμότητας.

Τα θερμικά κατεργάσιμα κράματα παράγονται σε πολλές καταστάσεις σκλήρυνσης. Για τη δομική μηχανική είναι σημαντικός μόνο ένας περιορισμένος αριθμός και παρατίθενται στον Πίνακα 3.5. Η διατύπωση «θερμική κατεργασία διαλύματος» στον Πίνακα 3.5 γενικά περιλαμβάνει τη σβέση. Η διαδικασία της γήρανσης θα πρέπει να γίνεται κατανοητή σε συνδυασμό με το Σχήμα 2.7, όπου δε δείχνεται η κατάσταση T5. Η T5 είναι μία ιδιαίτερη κατάσταση σκλήρυνσης που δε βρίσκεται μεταξύ των T4 και T6, όπως οι περισσότεροι άνθρωποι θα σκέφτονται. Χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι το υλικό δεν είναι πλήρως θερμικά επεξεργασμένο μέσω διαλύματος (π.χ. θερμοκρασία πολύ χαμηλή) και επίσης ότι η σβέση μπορεί να μην είναι η βέλτιστη. Το αποτέλεσμα είναι μικρότερες τιμές αντοχής από την T6 και χαμηλότερες τιμές επιμήκυνσης (δύσκολα διαμορφώσιμο). Η T6 χαρακτηρίζει μια τεχνητή γήρανση μέχρι τη μέγιστη αντοχή.

Πίνακας 3.5 Οι βασικές καταστάσεις σκλήρυνσης σε χρήση για δομικές εφαρμογές για υποπροϊόντα σκληρυμένα με κατακρημνίσεις

Symbol	*Description*
T4	Solution heat-treated and then naturally aged
T5	Cooled from an elevated temperature shaping process and then artificially aged
T6	Solution heat-treated and then artificially aged
T61 T64	Solution heat-treated and then artificially aged in underageing conditions in order to improve formability (T64 between T61 and T6)
T66	Solution heat-treated and then artificially aged - mechanical property level higher than T6 achieved through special control of the process 6000 series alloys
T7	Solution heat-treated and artificially over-aged
Tx51 Tx510 Tx511	These suffixes stand for a controlled stretching to relieve internal stresses coming from manufacturing (the fourth digit characterises only variants - no influence on characteristic values!)

3.7 Κράματα και καταστάσεις σκλήρυνσης που αναφέρονται στον EK 9

3.7.1 Γενικά

Στο EN 755-2 (διελάσεις), EN 485-2 (φύλλα), EN 586-2 (σφυρήλατα) και EN 1706 (χυτά) αναφέρεται ένας μεγάλος αριθμός από κράματα . Πολλά από αυτά χρησιμοποιούνται μόνο για πολύ ειδικές εφαρμογές. Ένας λόγος για το μεγάλο αριθμό των κραμάτων είναι ότι το να "εφευρίσκεις" το λεγόμενο "νέο κράμα αλουμινίου" δεν είναι δύσκολο και συχνά περιλαμβάνει μόνο προσαρμογή των συνοδευτικών στοιχείων μιας υφιστάμενης σύνθεσης. Τα πλεονεκτήματα που συχνά

κερδίζουμε είναι η τέλεια προσαρμογή ενός κράματος για μια ειδική χρήση με βελτιστοποίηση, για παράδειγμα, των μηχανικών ιδιοτήτων, της συμπεριφοράς σκλήρυνσης, της ολκιμότητας, κλπ. Στο EN 755-2 (εκδόθηκε το 2008) αναφέρονται 57 κράματα, στο EN 485-2 (εκδόθηκε το 2007) 47, στο EN 586-2 (εκδόθηκε το 1997) 6 και στο πρότυπο EN 1706 (εκδόθηκε το 1998) αναφέρονται 37 κράματα.

Εκτός από τα κοινά προϊόντα διέλασης στο 3.2β Πίνακα EN 1999-1-1, παρατίθενται επίσης σωλήνες, για τις οποίες, σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να ισχύουν διαφορετικές τεχνολογικές τιμές και για τις οποίες υπάρχει ένα ξεχωριστό πρότυπο, το EN 754 (ψυχρής έλασης ράβδοι/μπάρες και σωλήνες). Ο αριθμός των κραμάτων που απαριθμούνται σε αυτό το πρότυπο είναι 32 και είναι σημαντικά μικρότερος από τον αριθμό των κραμάτων που αναφέρονται στο EN 755. Αλλά για τεχνολογικούς λόγους, όλα αυτά τα κράματα πρέπει επίσης να αναφέρεται και στο πρότυπο EN 755.

Δεν έχει νόημα να προσφέρονται τόσες πολλές δυνατότητες για δομικές εφαρμογές. Ο μηχανικός που σχεδιάζει δε θα είναι σε θέση να επιλέξετε εύκολα το καλύτερο κράμα από τεχνικής πλευράς. Το δεύτερο πιο σημαντικό ζήτημα αφορά την οικονομική διαθεσιμότητα στην αγορά και είναι επίσης δύσκολο για αυτόν να το απαντήσει. Υπάρχουν επίσης μια σειρά από τεχνικά ζητήματα τα οποία θέτουν προβλήματα, π.χ. η συγκολλησιμότητα, οι πραγματικές τιμές αντοχής της HAZ που πρέπει να ληφθούν υπόψη για το σχεδιασμό, η αντιδιαβρωτική συμπεριφορά στην πράξη, κλπ. Ως εκ τούτου, αποδείχθηκε όλα αυτά τα χρόνια στην πράξη ότι μόνο ένας περιορισμένος αριθμός των κραμάτων και καταστάσεων σκλήρυνσης θα πρέπει να αναφέρεται στον EK 9. Ήταν επίσης σαφές ότι ο αριθμός θα είναι μεγαλύτερος από τη λίστα των διαθέσιμων κραμάτων σε μια μεμονωμένη χώρα, δεδομένου ότι ως κάποιο βαθμό σε διαφορετικές χώρες ιστορικά προτιμώνται και είναι σε χρήση διαφορετικά κράματα και καταστάσεις σκλήρυνσης. Ορισμένα κράματα, ωστόσο είναι σε γενική χρήση στις περισσότερες χώρες. Το γεγονός αυτό διευκόλυνε το έργο της επιλογής των κραμάτων και των καταστάσεων σκλήρυνσης που θα πρέπει να αναφέρονται στον EK 9. Γενικά κράματα με κακή συμπεριφορά στη διάβρωση, π.χ. με υψηλή περιεκτικότητα σε χαλκό δεν θεωρήθηκαν εφαρμόσιμα για δομικά έργα.

Η κατάσταση με τα κράματα χύτευσης ήταν πιο εύκολη, δεδομένου ότι μέχρι σήμερα τα περισσότερα δομικά πρότυπα των ευρωπαϊκών χωρών δεν είχαν κανόνες σχεδιασμού για τα προϊόντα χύτευσης.

3.7.2 Σφυρήλατα κράματα

Λεπτομέρειες για τα σφυρήλατα κράματα που αναφέρονται στον Ευρωκώδικα 9 παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α. Παρακάτω παρατίθενται μόνο πίνακες των τεχνικών χαρακτηριστικών των σφυρήλατων κραμάτων (φύλλα, λωρίδες, ελάσματα, διελασμένα προφίλ, διελασμένοι σωλήνες, διελασμένοι ράβδοι και ελκυόμενοι σωλήνες).

Πίνακας 3.6 Απόσπασμα από τον πίνακα 3.2α του EN 1999-1-1: Χαρακτηριστικές τιμές της τάσης διαρροής 0,2% f_o, της τάσης κατάρρευσης f_u (χωρίς συγκολλήσεις και HAZ) ελάχιστη παραμόρφωση θραύσης A_{50}, μειωτικοί συντελεστές $\rho_{o,haz}$ και $\rho_{u,haz}$, τύπος λυγισμού και εκθέτης n_p για σφυρήλατα κράματα αλουμινίου- φύλλο, λωρίδα και έλασμα

Alloy EN-AW	Temper 1)	Thick-ness mm 1)	f_o 1)	f_u	A_{50} 1),6)	$f_{o,haz}$ 2)	$f_{u,haz}$ 2)	HAZ-factor 2)		BC 4)	n_p 1), 5)
			N/mm²		%	N/mm²		$\rho_{o,haz}$ 1)	$\rho_{u,haz}$		
3004	H14 | 24/H34	< 6 | 3	180| 170	220	1 | 3	75	155	0,42 | 0,44	0,70	B	23 | 18
	H16 | 26/H36	< 4 | 3	200|190	240	1 | 3			0,38 | 0,39	0,65	B	25 | 20
5005/ 5005A	O/H111	< 50	35	100	15	35	100	1	1	B	5
	H12 | 22/H32	< 12,5	95 | 80	125	2 | 4	44	100	0,46 | 0,55	0,80	B	18 | 11
	H14 | 24/H34	< 12,5	120| 110	145	2 | 3			0,37 | 0,40	0,69	B	25 | 17
5454	O/H111	< 80	85	215	12	85	215	1	1	B	5
	H14|H24/H34	< 25	220 | 200	270	2 | 4	105	215	0,48 | 0,53	0,80	B	22 | 15
6082	T4 / T451	< 12,5	110	205	12	100	160	0,91	0,78	B	8
	T61/T6151	<12,5	205	280	10	125	185	0,61	0,66	A	15
	T6151	12,5<z<100	200	275	12 3)			0,63	0,67	A	14
	T6/T651	< 6	260	310	6			0,48	0,60	A	25
		6<z<12,5	255	300	9			0,49	0,62	A	27
	T651	12,5<z<100	240	295	7 3)			0,52	0,63	A	21

1) If two (three) tempers are specified in one line, tempers separated by "|" have different technological values but separated by "/" have same values. (The tempers show differences for f_o, A and n_p.).

2) The HAZ-values are valid for MIG welding and thickness up to 15mm. For TIG welding strain hardening alloys (3xxx, 5xxx and 8011A) up to 6 mm the same values apply, but for TIG welding precipitation hardening alloys (6xxx and 7xxx) and thickness up to 6 mm the HAZ values have to be multiplied by a factor 0,8 and so the p-factors. For higher thickness - unless other data are available - the HAZ values and p-factors have to be further reduced by a factor 0,8 for the precipitation hardening alloys (6xxx and 7xxx) and by a factor 0,9 for the strain hardening alloys (3xxx, 5xxx and 8011A). These reductions do not apply in temper O.

3) Based on A (= A5 65^JA) , not A_{50}.

4) BC = buckling class, see 6.1.4.4, 6.1.5 and 6.3.1.

5) n-value in Ramberg-Osgood expression for plastic analysis. It applies only in connection with the listed f,-value.

6) The minimum elongation values indicated do not apply across the whole range of thickness given, but mostly to the thinner materials. In detail see EN 485-2.

Πίνακας 3.7 Απόσπασμα από τον πίνακα 3.2α του EN 1999-1-1: Χαρακτηριστικές τιμές της τάσης διαρροής 0,2% f_o, της τάσης κατάρρευσης f_u (χωρίς συγκολλήσεις και HAZ) ελάχιστη παραμόρφωση θραύσης A_{50}, μειωτικοί συντελεστές $\rho_{o,haz}$ και $\rho_{u,haz}$,, τύπος λυγισμού και εκθέτης n_p για σφυρήλατα κράματα αλουμινίου-διελασμένα προφίλ, διελασμένοι σωλήνες, διελασμένοι ράβδοι και ελκυόμενοι σωλήνες

Alloy EN-AW	Product form	Temper	Thick-ness mm 1),3)	f_o 1)	f_u 1)	A_{50} 5), 2)	$f_{o,haz}$ 4)	$f_{u,haz}$ 4)	HAZ-factor 4)		BC 6)	n_p 7)
				N/mm²		%	N/mm²		$\rho_{o,haz}$	$\rho_{u,haz}$		
5083	ET, EP,ER/B	O / H111, F, H112	$t \leq 200$	**110**	**270**	12	110	270	1	1	B	5
	DT	H12/22/32	$t \leq 10$	200	280	6	135	270	0,68	0,96	B	14
		H14/24/34	$t \leq 5$	235	300	4			0,57	0,90	A	18
6060	EP,ET,ER/B	T5	$t \leq$ **5**	120	160	8	50	80	0,42	0,50	B	17
	EP		$5 < t \leq 25$	100	140	8			0,50	0,57	B	14
	ET,EP,ER/B	T6	$t \leq$ **15**	**140**	**170**	8	60	100	0,43	0,59	A	24
	DT		$t \leq 20$	160	215	12			0,38	0,47	A	16
	EP,ET,ER/B	T64	$t \leq$ **15**	120	180	12	60	100	0,50	0,56	A	12
	EP,ET,ER/B	T66	$t \leq$ **3**	160	215	8	65	110	0,41	0,51	A	16
	EP		$3 < t \leq 25$	150	195	8			0,43	0,56	A	18
6082	EP,ET,ER/B	T4	$t \leq$ **25**	110	205	14	100	160	0,91	0,78	B	8
	EP/O, EP/H	T5	$t \leq 5$	230	270	8	125	185	0,54	0,69	B	28
	EP/O,EP/H	T6	$t \leq 5$	250	290	8	125	185	0,50	0,64	A	32
	ET		$5 < t \leq$ **15**	260	310	10			0,48	0,60	A	25
	ER/B	T6	$t \leq 20$	250	295	8			0,50	0,63	A	27
			$20 < t \leq 150$	260	310	8			0,48	0,60	A	25
	DT	T6	$t \leq 5$	255	310	8			0,49	0,60	A	22
			$5 < t \leq 20$	240	310	10			0,52	0,60	A	17

Key: EP - Extruded profiles EP/O - Extruded open profiles EP/H - Extruded hollow profiles ET - Extruded tube ER/B - Extruded rod and bar DT - Drawn tube

1) : Where values are quoted in **bold** greater thicknesses and/or higher mechanical properties may be permitted in some forms see ENs and prENs listed in 1.2.1.3. In this case the $R_{p0,2}$ and R_m values can be taken as f_o and f,. If using such higher values the corresponding HAZ-factors phave to be calculated acc. to expression (6.13) and (6.14) with the same values for f,,haz and .

2) : Where min. elongation values are given in **bold,** higher minimum values may be given for some forms or thicknesses.

3) *: According to EN 755-2: following rule applies:* "If a profile cross-section is comprised of different thicknesses which fall in more than one set of specified mechanically property values, the lowest specified value should be considered as valid for the whole profile cross-section." *Exception is possible and the highest value given may be used provided the manufacturer can support the value by an appropriate quality assurance certificate.*

Πίνακας 3.8 Αντιγραφή του πίνακα 3.2γ του EN1999-1-1: Χαρακτηριστικές τιμές της τάσης διαρροής 0,2% f_o, της τάσης κατάρρευσης f_u (χωρίς συγκολλήσεις και HAZ) ελάχιστη παραμόρφωση θραύσης A_{50}, μειωτικοί συντελεστές $\rho_{o,haz}$ και $\rho_{u,haz}$,, τύπος λυγισμού και εκθέτης n_p για σφυρήλατα κράματα αλουμινίου

Alloy EN-AW	Temper	Thickness up to mm	Direction	f_o	f_u	$f_{o,haz}$ 1)	$f_{u,haz}$ 4)	A 3)	Buckling class
				N/mm²				%	
5754	H112	150	Longitudinal (L)	80	180	80	180	15	B
5083	H112	150	Longitudinal (L)	120	270	120	270	12	B
			Transverse (T)	110	260	110	260	10	B
6082	T6	100	Longitudinal (L)	260	310	125 2)	185 2)	6	A
			Transverse (T)	250	290			5	A

1) p_o,haz, Pu,h_{az} to be calculated according to expression (6.13) and (6.14)

2) For thicknesses over 15 mm (MIG-welding) or 6 mm (TIG-welding) see table 3.2.b, footnote 4).

3) A=A_5,65VA0

3.7.3 Κράματα χύτευσης

Λεπτομέρειες για τα χυτά κράματα που αναφέρονται στον Ευρωκώδικα 9 παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α. Παρακάτω παρατίθεται μόνο πίνακες των τεχνικών χαρακτηριστικών των χυτών κραμάτων.

Πίνακας 3.9 Αντιγραφή από το πίνακα 3.3 του EN 1999-1-1: : Χαρακτηριστικές τιμές της τάσης διαρροής 0,2% f_o, της τάσης κατάρρευσης f_u και της ελάχιστης παραμόρφωσης θραύσης A_{50} για χυτά κράματα

Alloy	Casting process	Temper	*fo* (f_{oc}) N/mm^2	fu (f_{uc}) N/mm^2	A_{50} % 1)
EN AC-42100	Permanent mould	T6	147	203	2,0
	Permanent mould	T64	126	175	4
EN AC-42200	Permanent mould	T6	168	224	1,5
	Permanent mould	T64	147	203	3
EN AC-43000	Permanent mould	F	63	126	1,25
EN AC-43300	Permanent mould	T6	147	203	2,0
	Sand cast	T6	133	161	1,0
	Permanent mould	T64	126	175	3
EN AC-44200	Permanent mould	F	56	119	3
	Sand cast	F	49	105	2,5
EN AC-51300	Permanent mould	F	70	126	2,0
	Sand cast	F	63	112	1,5
1) For elongation requirements for the design of cast components, see C.3.4.2 (1).					

3.8 Πρακτικές αντιλήψεις για την επιλογή υλικών

3.8.1 Φύλλα, πλάκες και διελάσεις

Κατά το σχεδιασμό με χάλυβα ο μηχανικός δεν ανησυχεί για τη διαθεσιμότητα των προϊόντων χάλυβα που πρόκειται να χρησιμοποιήσει. Μπορεί να είναι σίγουρος ότι εφόσον ο ίδιος χρησιμοποιεί κανονικούς χάλυβες όπως S235 ή S355, δε θα υπάρχει κανένα πρόβλημα στην προμήθεια, δεδομένου ότι οι περισσότερες αποθήκες έχουν μια ευρεία γκάμα από φύλλα και διατομές σύμφωνα με τις πρότυπες διατομές στο απόθεμα.

Με το αλουμίνιο η κατάσταση είναι πολύ διαφορετική. Φύλλα σε μικρές και μεσαίου μεγέθους μορφές μέχρι 1500x3000 mm είναι εύκολο να επιτευχθούν, αλλά είναι περιορισμένη η διαθεσιμότητα των πιο πολύπλοκων κραμάτων και καταστάσεων σκλήρυνσης. Τα EN AW-5083, -5754 και -6082 είναι ευρείας χρήσης. Μερικοί χονδρέμποροι που εξειδικεύονται ως προμηθευτές σε ναυπηγεία μπορεί να έχουν μεγαλύτερες διαστάσεις στο απόθεμα. Ωστόσο, πολλά άλλα υλικά ή ειδικές μορφές πρέπει να παραγγελθούν και ως εκ τούτου θα μεσολαβεί χρόνος παράδοσης. Για τα προαναφερθέντα κοινά κράματα είναι συνήθως απαραίτητοι τουλάχιστον 10 τόνοι για ένα πάχος. Τα φύλλα από κράματα που δεν είναι συχνά σε χρήση χρειάζονται παραγγελίες σε ποσότητες από 30 έως 50 τόνους.

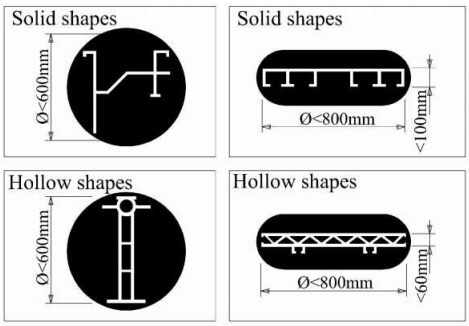
Η κατάσταση με τις διατομές είναι διαφορετική. Ο λόγος γι’ αυτό έγκειται στο γεγονός ότι οι διατομές αλουμινίου λαμβάνονται με διέλαση και οι διατομές χάλυβα

(κυρίως) από θερμή έλαση. Οι διατομές αλουμινίου, ωστόσο είναι διελασμένες και το κόστος των μητρών είναι μέτριο. Δεν απαιτείται συχνά αλλαγή μήτρας και συνεπώς παραγγέλνοντας πολλές μπορεί να είναι μικρό το κόστος, ανάλογα με το μέγεθος της διατομής, μεταξύ 200 και 3000 kg. Αυτό οδηγεί σε μια κατάσταση, όπου οι περισσότεροι μηχανικοί σχεδιάζουν τις δικές τους διατομές βέλτιστα σχεδιασμένες στις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής. Αυτό φέρνει σημαντικά πλεονεκτήματα: το κόστος, δηλαδή το βάρος μειώνεται, στη διατομή δίνεται η βελτιστοποιημένη μορφή της όσον αφορά τη λειτουργικότητα και συχνά έχουμε εξοικονόμηση στο κόστος κατεργασίας.

Αυτή η μοναδικότητα των διατομών αλουμινίου οφείλεται στην ιδιαίτερη διαδικασία της διέλασης, η οποία έχει δώσει στο αλουμίνιο τεράστια πλεονεκτήματα, αλλά και κάποια μειονεκτήματα. Η γκάμα των διατομών που προσφέρεται από χονδρεμπόρους είναι πολύ περιορισμένη και αφορά απλές και κυρίως μικρές διατομές. Τα κράματα που προσφέρονται είναι συνήθως το EN AW-6060 και μερικές φορές το -6082. Επίσης λίγες αποθήκες προσφέρουν μεγαλύτερα προφίλ. Για σωλήνες η γκάμα που προσφέρεται από χονδρεμπόρους είναι πολύ μεγαλύτερη. Κάθε μηχανικός ως εκ τούτου, αρχής γενομένης από τον πρώτο σχεδιασμό του με αλουμίνιο, είναι καλό να μελετήσει τα όποια διαθέσιμα προϊόντα από το απόθεμα. Θα πρέπει να διερευνήσει κυρίως τις δυνατότητες και τις προϋποθέσεις που απαιτούνται για να δημιουργήσει και να παραγγείλει τη δική του διατομή.

Για δομικές κατασκευές είναι συχνά πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε ποια είναι τα γεωμετρικά όρια των υφιστάμενων εγκαταστάσεων παραγωγής των υποπροϊόντων.

Τα φύλλα και οι πλάκες μπορεί να παραχθούν με πλάτος άνω των 3 m και μήκος μέχρι 22 m. Τα ακριβή όρια μπορεί να εξαρτώνται από το πάχος και το κράμα. Υπάρχουν περισσότεροι κατασκευαστές για μήκη κάτω των 10 m και με πλάτος περίπου έως 2 m. Κατά το σχεδιασμό με φύλλα αυτό που είναι επίσης σημαντικό να γνωρίζουμε είναι ότι δεν είναι τόσο κοινή η αναδίπλωση με πρέσες με πλάτη εργασίας έως 16 m, όπως επίσης δεν υπάρχουν εγκαταστάσεις με περισσότερο από 20 m.



Σχήμα 3.1 Τα όρια για το σχεδιασμό μεγάλων διελάσεων (Ευρώπη)

Τα όρια για το μήκος της εξώθησης (διέλασης) είναι 30 m, αν έχουν οι διατομές την απαραίτητη ακαμψία ώστε να είναι δυνατή η σωστή μεταφορά. Κανονικά μήκη βρίσκονται μεταξύ 6 και 10 m. Το μήκος των φυσιολογικών αποθεμάτων είναι 6 m. Τα όρια για τις εγκάρσιες διαστάσεις των διατομών παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1. Αυτά είναι τα γεωμετρικά όρια του μεγαλύτερου ευρωπαϊκού τύπου διέλασης.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι πολύ κοινό ότι ο μηχανικός που σχεδιάζει δημιουργεί τα δικά του ανεξάρτητα προφίλ. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να ξέρει κάποιους κανόνες γι 'αυτό, αλλά και ποιά τα κράματα που συνιστώνται σε σχέση με

το κόστος και τη σκοπιμότητα. Σε αυτό το πλαίσιο, οι ανοχές των διατομών παίζουν σημαντικό ρόλο. Επειδή με εξωθήσεις είναι πολύ μικρότερες από ό, τι με τα προφίλ έλασης, ο μηχανικός σχεδιάζει συχνά ατομικά διατομές όχι μόνο βάσει της φέρουσας ικανότητας, αλλά επίσης βάσει της πρόσθετης λειτουργικότητας της διατομής. Επιπλέον, συχνά απαιτούνται αυστηρά όρια ανοχής και υπάρχει ένα ειδικό πρότυπο για τέτοιου είδους προδιαγραφές: το EN 12020 το οποίο θέτει αυστηρότερα όρια ανοχής για τις διατομές από κράματα EN AW-6060 -6063 και σε σύγκριση με το EN 755-9 για διατομές από άλλα κράματα. Συχνά επίσης συμφωνούνται ειδικές ανοχές μεταξύ του σχεδιαστή μηχανικού και του κατασκευαστή των προϊόντων. Στο Παράρτημα Β αναφέρονται γενικοί κανόνες για το σχεδιασμό διελασμένων διατομών.

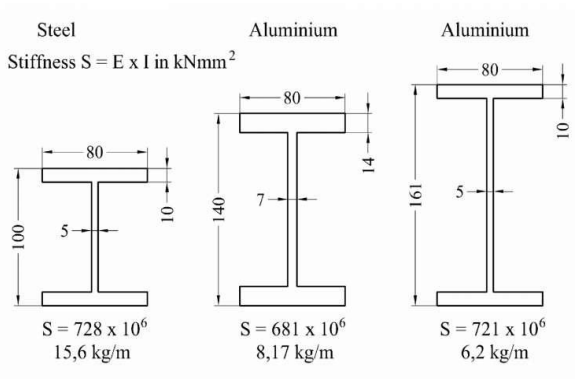
3.9 Φυσικές ιδιότητες απαραίτητες για το σχεδιασμό

3.9.1 Γενικές φυσικές ιδιότητες

Το μέτρο ελαστικότητας του αλουμινίου είναι 70 000 N/mm^2 και επομένως μόνο το ένα τρίτο του μέτρου του χάλυβα. Αυτό έχει συνέπειες στη γεωμετρία του σχεδιασμού, αφού οι εκτροπές των δοκών, η φέρουσα ικανότητα των στηλών, δηλαδή η πλάγια κάμψη και ο τοπικός λυγισμός εξαρτώνται άμεσα από το μέτρο ελαστικότητας. Σε πολλές περιπτώσεις στατικής μελέτης η ακαμψία του τμήματος είναι το κρίσιμο κριτήριο. Εάν ένα τμήμα χάλυβα πρέπει να αντικατασταθεί από αλουμίνιο και η ακαμψία πρέπει να διατηρηθεί στο ίδιο επίπεδο, μία πάχυνση όλων των τμημάτων με το συντελεστή 3 δεν είναι πολύ αποδοτική, αφού η σχέση του ειδικού βάρους των δύο υλικών είναι επίσης κατά προσέγγιση 3 προς 1. Η κανονική πρόθεση όμως είναι η εξοικονόμηση βάρους με τη χρήση αλουμινίου, για φυσικούς και επίσης για οικονομικούς λόγους. Για το σχεδιασμό των δοκών ένας πρακτικός και αποδεδειγμένος κανόνας λέει: αυξάνοντας όλες τις διαστάσεις τους, με εξαίρεση το πλάτος τους με πολλαπλασιαστικό συντελεστή 1,4 , πετυχαίνουμε μια διατομή με ροπή αδράνειας περίπου τρεις φορές μεγαλύτερη και ως εκ τούτου, μία διατομή ίδιας δυσκαμψίας (E×I) και έτσι εξοικονομούμε περίπου 50% κατά βάρος.

Με αυτόν τον κανόνα επιπλέον αντισταθμίζουμε σε κάποιο βαθμό την απώλεια ακαμψίας λόγω του τοπικού λυγισμού. Η εμπειρία λέει επίσης ότι ακολουθώντας ένα τέτοιο κανόνα οδηγούμαστε σε πολύ χρήσιμες διατομές. Συχνά οι διατομές χάλυβα δεν είναι οι βέλτιστες, δεδομένου ότι πρέπει να χρησιμοποιηθούν τυποποιημένες διατομές. Με το μοναδικό σχεδιασμό όμως των διατομών αλουμίνιο συχνά εξοικονομούμε πάνω από το 50% του βάρους. Αυτό φαίνεται επίσης στο Σχήμα 3.2. Αν δεν έχουμε περιορισμούς στο ύψος και ο τοπικός λυγισμός δεν είναι το κριτήριο σχεδιασμού μπορούμε επίσης να εξοικονομήσουμε έως και 60%. Εάν η ακαμψία ενός μέλους δεν είναι το κριτήριο και η αντοχή του χάλυβα κείται εντός των δεδομένων τιμών του αλουμινίου τότε μπορεί να είναι δυνατή μια εξοικονόμηση 70%. Ωστόσο, αυτή είναι σπάνια περίπτωση και αποτελεί το ανώτατο όριο.

Οι σκέψεις αυτές μας οδηγούν σε ένα δεύτερο σημαντικό γεγονός. Εάν αυξήσουμε τη ροπή αδρανείας επί το συντελεστή 3 και το ύψος μόνο επί το συντελεστή 1,4 , τότε η ελαστικότητα της διατομής (ροπή αντίστασης) αυξάνεται κατά 2,14 , δηλαδή οι τάσεις στη διατομή του αλουμινίου έχει ως αποτέλεσμα να είναι λιγότερο από το ήμισυ των τάσεων του χάλυβα. Τώρα καταλαβαίνουμε γιατί ο μηχανικός δεν θα πρέπει να εξετάζει εξαρχής τα κράματα με την υψηλότερη δύναμη και αυτό εξηγεί γιατί οι τύποι κραμάτων AlMgSi EN AW-6060, -6063 έχουν τόσο μεγάλη επιτυχία.



	Steel	Aluminium Alloy	Aluminium Alloy	Aluminium Alloy
Moment of inertia in mm^4	38,9 E 6	116,6 E6	116,7 E6	117,3 E6
EI (N/mm^2)	8,17 E12	8,16 E12	8,17 E12	8,21 E12
h (mm)	240	240	300	330
b (mm)	120	240	200	200
t (mm)	9,8	18,3	12,9	10
w (mm)	6,2	12	6	6
g (kg/m)	30,7	30,3	18,4	15,8

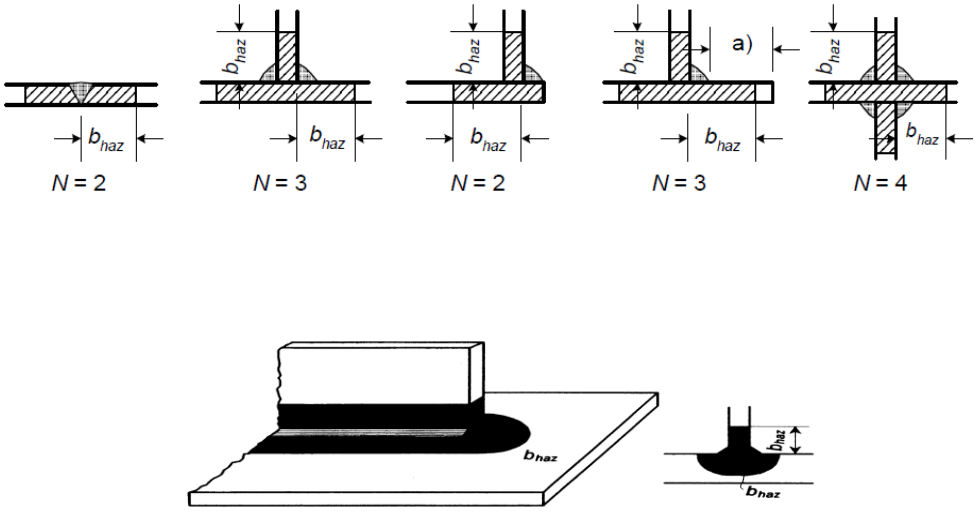
Σχήμα 3.2 Σύγκριση ακαμψίας και βάρους διατομής χάλυβα και αλουμινίου ανά μέτρο μήκους

3.9.2 Ζώνη θερμικής επιρροής (HAZ)

3.9.2.1 Γενικά

Κατά το σχεδιασμό συγκολλημένων κατασκευών, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η απομείωση των ιδιοτήτων αντοχής που προκύπτει στην περιοχή των συγκολλήσεων, όταν χρησιμοποιούμε κράματα μη θερμικά κατεργασμένα ή τεχνητής ωρίμανσης θερμικά κατεργασμένα κράματα.

Εξαιρέσεις από αυτόν τον κανόνα, όπου δεν έχουμε απομείωση στην περιοχή των συγκολλήσεων, προκύπτουν σε κράματα κατάστασης Ο ή το υλικό είναι σε κατάσταση F και η αντοχή σχεδιασμού βασίζεται σε ιδιότητες κατάστασης Ο. Για σχεδιαστικούς λόγους δεχόμαστε ότι σε όλη την έκταση της ζώνης θερμικής επιρροής οι ιδιότητες αντοχής απομειώνονται κατά ένα σταθερό βαθμό.



Σχήμα 3.3 Έκταση της ζώνης θερμικής επιρροής

3.9.2.2 Δριμύτητα της χαλάρωσης και έκταση ζώνης θερμικής επιρροής

Η χαρακτηριστική τιμή της τάσης διαρροής στη ζώνη θερμικής επιρροής $f_{o,haz}$ και της εφελκυστικής αντοχής $f_{u,haz}$ δίνονται από τους πίνακες 3.6, 3.7 και 3.8 του. Στους ίδιους πίνακες δίνονται και οι συντελεστές απομείωσης:

$$\rho_{\mathrm{o,haz}} = f_{\mathrm{o,haz}}/f_{\mathrm{o}} \qquad \rho_{\mathrm{u,haz}} = f_{\mathrm{u,haz}}/f_{\mathrm{o}}$$

Η ζώνη θερμικής επιρροής θεωρείται ότι εκτείνεται σε μία απόσταση b_{haz} σε κάθε διεύθυνση από μία συγκόλληση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3 και μετράται ως εξής:

- Κάθετα από το κεντροβαρικό άξονα μιας εσωραφής.
- Κάθετα από το σημείο τομής των επιφανειών συγκόλλησης σε εξωραφές.
- Κάθετα από το σημείο τομής των επιφανειών συγκόλλησης σε εσωραφές που χρησιμοποιούνται σε γωνιακούς κόμβους, ταυ ή σταυροειδείς.
- Σε οποιαδήποτε ακτινική διεύθυνση από το άκρο μιας συγκόλλησης.

Τα σύνορα της ζώνης θερμικής επιρροής θα πρέπει γενικά να θεωρούνται ευθείες γραμμές κάθετα στη μεταλλική επιφάνεια, ειδικότερα όταν συγκολλούμε λεπτό υλικό. Όμως όταν εφαρμόζεται επιφανειακή συγκόλληση σε παχύ υλικό μπορούμε να θεωρήσουμε καμπύλο σύνορο ακτίνας b_{haz} όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.

Όταν μη θερμασμένα υλικά συγκολλούνται με τύπο συγκόλλησης MIG, με ενδοστρωματική ψύξη στους 60°C ή λιγότερο και η συγκόλληση πραγματοποιείται σε πολλαπλές στρώσεις οι τιμές του b_{haz} είναι οι παρακάτω:

$0 < t \leq 6mm$: $\quad b_{\mathrm{haz}} = 20mm$

$6 < t \leq 12mm$: $\quad b_{\mathrm{haz}} = 30mm$

$12 < t \leq 25mm$: $\quad b_{\mathrm{haz}} = 35mm$

$t > 25mm$: $\quad b_{\mathrm{haz}} = 40mm$

Για πάχη $t > 12mm$ μπορεί να έχουμε θερμοκρασιακή επίδραση, επειδή η ενδοστρωματική ψύξη μπορεί να ξεπερνά τους 60°C εκτός αν υπάρχει αυστηρός ποιοτικός έλεγχος. Το τελευταίο αυξάνει το πλάτος της ζώνης θερμικής επιρροής.

Τα παραπάνω νούμερα εφαρμόζονται στην περίπτωση εσωραφών (δύο θερμικές δίοδοι) ή σε εξωραφές σε κόμβους μορφής Ταυ (τρεις θερμικές δίοδοι) για σειρές κραμάτων 6xxx και 7xxx, ή της σειράς 5xxx στην κατάσταση εργοσκλήρυνσης.

Για συγκόλληση τύπου TIG το εύρος της ζώνης θερμικής επιρροής είναι μεγαλύτερο, επειδή η εισροή θερμότητας είναι μεγαλύτερη από ότι για συγκόλληση τύπου MIG. Οι συγκολλήσεις τύπου TIG για εσωραφές ή εξωραφές κραμάτων σειράς 6xxx και 7xxx, ή της σειράς 5xxx στην κατάσταση εργοσκλήρυνσης, η τιμή του b_{haz} είναι: $\quad 0 < t \leq 6mm$: $\quad b_{\mathrm{haz}} = 30mm$

Αν δύο ή περισσότερες συγκολλήσεις βρίσκονται κοντά η μία στην άλλη, τα σύνορα της ζώνης θερμικής επιρροής τους επικαλύπτονται. Θεωρούμε τότε πως μία ζώνης θερμικής επιρροής αντιστοιχεί για όλη την ομάδα των συγκολλήσεων. Αν η συγκόλληση βρίσκεται πολύ κοντά στο ελεύθερο άκρο της προεξοχής, η διάχυση της θερμότητας είναι λιγότερο δραστική. Αυτό ισχύει αν η απόσταση από το άκρο της συγκόλλησης έως το ελεύθερο είναι μικρότερη από $3b_{\mathrm{haz}}$. Σ' αυτές τις συνθήκες θεωρούμε ότι ολόκληρο το πλάτος της προεξοχής υπόκειται στο μειωτικό συντελεστή ρ_{haz}.

Άλλοι παράγοντες που επιδρούν στη τιμή του b_{haz} είναι οι ακόλουθοι:

- Όταν συγκολλήσεις πραγματοποιούνται σε πολλαπλές στρώσεις, μπορεί να υπάρξει συγκέντρωση μεταξύ των στρωμάτων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την

αύξηση της έκτασης της ζώνης θερμικής επιρροής. Αν η ενδοστρωματική θερμοκρασία T_1 κυμαίνεται μεταξύ 60°C και 120°C μπορούμε να θεωρήσουμε συντηρητικά ότι για κράματα σειράς 6xxx και 7xxx, ή της σειράς 5xxx στην κατάσταση εργοσκλήρυνσης πολλαπλασιάζουμε το εύρος b_{haz} με ένα συντελεστή α_2 ως εξής:

κράματα σειράς 6xxx και 5xxx εργοσκλήρυνσης $\alpha_2 = 1 + (T_1 - 60)/120$

κράματα σειράς 7xxx $\alpha_2 = 1 + 1{,}5(T_1 - 60)/120$

Αν απαιτείται μία λιγότερο συντηρητική θεώρηση της τιμής του συντελεστή α_2, η πραγματική έκταση της ζώνης θερμικής επιρροής προκύπτει με πειράματα σκληρότητας σε δοκίμια. Η θερμοκρασία των 120°C είναι η μέγιστη συνιστώμενη θερμοκρασία για συγκολλήσεις κραμάτων αλουμινίου.

- *Διακυμάνσεις στο πάχος του στοιχείου*
  Αν τα στοιχεία της διατομής που συνδέονται δεν έχουν κοινό πάχος *t*, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι για όλες τις παραπάνω σχέσεις το *t* είναι το μέσο πάχος όλων των στοιχείων. Αυτό ισχύει αν το μέσο πάχος δεν υπερβαίνει κατά μιάμιση φορά το μικρότερο πάχος. Για μεγαλύτερες διακυμάνσεις του πάχους, η έκταση της ζώνης θερμικής επιρροής πρέπει να προσδιορίζεται μέσω πειραμάτων σκληρότητας σε δοκίμια.

- *Διακυμάνσεις στον αριθμό των θερμικών διόδων*
  Αν οι κόμβοι μεταξύ των στοιχείων είναι συγκολλημένοι μέσω εσωραφής, αλλά έχουν διαφορετικό αριθμό θερμικών διόδων (n) που αναφέρθηκαν παραπάνω, πολλαπλασιάζουμε την τιμή με 3/n.

4 Οριακές καταστάσεις για χάλυβα και αλουμίνιο

4.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο θα παραταθούν οι έλεγχοι αντοχής σε οριακή κατάσταση αστοχίας και λειτουργικότητας των διατομών καθώς και ευστάθειας των μελών στοιχείων από χάλυβα και αλουμίνιο. Πιο συγκεκριμένα θα εξεταστούν οι απαιτούμενοι έλεγχοι διατομών σε εφελκυσμό, θλίψη, απλή κάμψη, τέμνουσα, στρέψη, κάμψη και τέμνουσα καθώς και οι έλεγχοι μελών για καμπτικό λυγισμό θλιβόμενων μελών, πλευρικό λυγισμό μη προστατευμένων πλευρικά μελών που υπόκεινται σε κάμψη περί τον ισχυρό άξονα, καμπτικό- στρεπτοκαμπτικό λυγισμό μελών που υπόκεινται σε κάμψη και θλίψη καθώς και οι έλεγχοι λειτουργικότητας σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 και τον Ευρωκώδικα 9.

4.2 Αντοχή διατομών

4.2.1 Εφελκυσμός

Χάλυβας

Η τιμή σχεδιασμού της εφελκυστικής δύναμης N_{Ed} σε κάθε διατομή πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση:

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

όπου $N_{\mathrm{t,Rd}}$ η αντοχή σχεδιασμού σε εφελκυσμό.

Για διατομές με οπές η $N_{\mathrm{t,Rd}}$ πρέπει να λαμβάνεται ως η μικρότερη από:

α) την πλαστική αντοχή σχεδιασμού της πλήρους διατομής:

$$N_{\mathrm{pl,Rd}} = A f_{\mathrm{y}} / \gamma_{\mathrm{M0}}$$

όπου

A το εμβαδόν της πλήρους διατομής

f_{y} το όριο (ή τάση) διαρροής του χάλυβα

γ_{M0} ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας του χάλυβα

β) την οριακή αντοχή σχεδιασμού της καθαρής διατομής στις θέσεις με οπές κοχλιών:

$$N_{\mathrm{u,Rd}} = 0{,}9 A_{\mathrm{net}} f_{\mathrm{u}} / \gamma_{\mathrm{M2}}$$

όπου

A_{net} το εμβαδόν της καθαρής διατομής

f_{u} η εφελκυστική αντοχή (τάση θραύσης) του χάλυβα

γ_{M2} ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας του χάλυβα σε θραύση

Σε περιπτώσεις που απαιτείται όλκιμη μορφή αστοχίας (για παράδειγμα πλάστιμα μέλη σε αντισεισμικές κατασκευές), πρέπει να επιδιώκεται:

$$N_{\mathrm{u,Rd}} \geq N_{\mathrm{pl,R}}$$

Αλουμίνιο

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

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

Η αντίσταση σχεδιασμού σε εφελκυσμό της διατομής $N_{\mathrm{t,Rd}}$ λαμβάνεται ίση με τη μικρότερη από τις $N_{\mathrm{o,Rd}}$ και $N_{\mathrm{u,Rd}}$.

Για γενική διαρροή κατά μήκος του μέλους $N_{\mathrm{o,Rd}} = A_{\mathrm{g}} f_{\mathrm{o}} / \gamma_{\mathrm{M1}}$

Για τοπική αστοχία στην κρίσιμη διατομή $N_{\mathrm{u,Rd}} = 0{,}9 A_{\mathrm{net}} f_{\mathrm{u}} / \gamma_{\mathrm{M2}}$

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 ΘΕΖ στην καθαρή διατομή διαμέσου της οπής. Η τελευταία αφαίρεση βασίζεται στο μειωμένο πάχος $\rho_{u,haz} t$.

4.2.2 Θλίψη

Χάλυβας

Η τιμή σχεδιασμού της θλιπτικής δύναμης N_{Ed} σε κάθε διατομή θλιβόμενου μέλους πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση:

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

όπου $N_{\mathrm{c,Rd}}$ η αντοχή σχεδιασμού της διατομής σε ομοιόμορφα επιβεβλημένη θλίψη. Η αντοχή σχεδιασμού $N_{\mathrm{c,Rd}}$ καθορίζεται σύμφωνα με τα παρακάτω:

$N_{\mathrm{c,Rd}} = A f_{\mathrm{y}} / \gamma_{\mathrm{M0}}$ για διατομές κατηγορίας 1,2 ή 3

$N_{\mathrm{c,Rd}} = A_{\mathrm{eff}} f_{\mathrm{y}} / \gamma_{\mathrm{M0}}$ για διατομές κατηγορίας 4

όπου A η πλήρης διατομή και A_{eff} η ενεργός διατομή.

Αλουμίνιο

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

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

Η αντοχή σχεδιασμού σε ομοιόμορφη θλίψη διατομής $N_{\mathrm{c,Rd}}$ λαμβάνεται ίση με τη μικρότερη τιμή από τις $N_{\mathrm{u,Rd}}$ και $N_{\mathrm{c,Rd}}$ όπου:

Σε διατομές με μη πληρωμένες οπές $N_{\mathrm{u,Rd}} = A_{\mathrm{net}} f_{\mathrm{u}} / \gamma_{\mathrm{M2}}$

Άλλες διατομές $N_{\mathrm{c,Rd}} = A_{\mathrm{eff}} f_{\mathrm{o}} / \gamma_{\mathrm{M1}}$

όπου

A_{net} είναι η καθαρή διατομή, με μείωση της διατομής για τις μη πληρωμένες οπές και εξασθένηση ΘΕΖ εάν είναι αναγκαίο. 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 το τοπικό λυγισμό και την εξασθένηση στις θερμικά επηρεασμένες ζώνες, αλλά αγνοώντας τις μη πληρωμένες οπές.

Υπολογισμός ενεργούς διατομής- τοπικός λυγισμός

Η ενεργός διατομή προκύπτει με την εισαγωγή ενός συντελεστή τοπικού λυγισμού ρ_c για να μειωθεί το πάχος: $t_{eff} = \rho_c t$

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 σχέσεις:

$$\begin{cases} \rho_c = 1{,}0 \text{ εάν } \beta \leq \beta_3 \\ \rho_c = \frac{c_1}{(\beta/\varepsilon)} - \frac{c_2}{(\beta/\varepsilon)^2} \text{ εάν } \beta \leq \beta_3 \end{cases}$$

Πίνακας 4.1 Τιμές συντελεστή ρ_c

Ταξινόμηση υλικού σύμφωνα με τον Πίνακα 3.2	*Εσωτερικό τμήμα*		*Προεξέχον τμήμα*	
	C1	C2	C1	C2
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

4.2.3 Μονοαξονική (ή απλή) κάμψη

Χάλυβας

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

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

όπου $M_{c,Rd}$ η αντοχή σχεδιασμού σε κάμψη.

Η καμπτική αντοχή σχεδιασμού για κάμψη περί έναν κύριο άξονα της διατομής καθορίζεται ως εξής:

$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = W_{pl} f_y / \gamma_{M0}$ για διατομές κατηγορίας 1 ή 2

$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = W_{el} f_y / \gamma_{M0}$ για διατομές κατηγορίας 3

$M_{c,Rd} = W_{eff} f_y / \gamma_{M0}$ για διατομές κατηγορίας 4

όπου W_{el} και W_{eff} αντιστοιχούν στην πρώτη διαρροή της ακραίας θλιβόμενης ίνας και στην ενεργό διατομή αντίστοιχα.

Αλουμίνιο

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

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

Η αντοχή σχεδιασμού σε κάμψη περί έναν κύριο άξονα της διατομής M_{Rd} λαμβάνεται ίση με την μικρότερη τιμή από τις $M_{u,Rd}$ και $M_{c,Rd}$ όπου:

Σε καθαρή διατομή $M_{u,Rd} = W_{net} f_u / \gamma_{M2}$

Σε κάθε διατομή $M_{c,Rd} = a W_{el} f_o / \gamma_{M1}$

όπου

W_{el} είναι η ελαστική ροπή αντίστασης της πλήρους διατομής

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

a είναι ο συντελεστής μορφής (Πίνακας 5.3 ΕΚ 9)

Διάφορες σταθερές διατομής W

W_{pl} πλαστική ροπή αντίστασης της πλήρους διατομής

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

$W_{el,haz}$ 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

Για διατομές κατηγορίας 4 το W_{el} αντικαθιστάται με W_{eff} για την ενεργό διατομή. Ωστόσο σε περίπτωση που η παραμόρφωση στις ΟΚΛ είναι καθοριστική, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία απλοποιημένη μέθοδος.

Σε διατομή με μειωμένη αντοχή λόγω συγκόλλησης (Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη- ΘΕΖ)

$$M_{\mathrm{Rd}}=\frac{W_{\mathrm{el}}\rho_{\mathrm{u,haz}}f_{\mathrm{u}}}{\gamma_{\mathrm{M2}}}$$

όπου

M_{Rd} Τιμή σχεδιασμού αντίστασης σε ροπή κάμψης

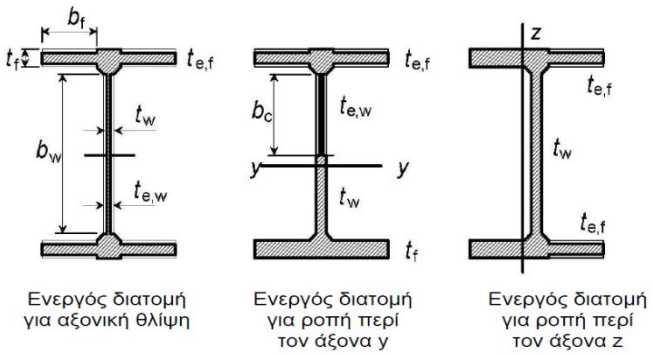
$\rho_{\mathrm{u,haz}}$ Συντελεστής μείωσης της αντοχής θραύσης στη ΘΕΖ

f_{u} Χαρακτηριστική τιμή της αντοχής θραύσης

γ_{M2} Επιμέρους συντελεστής αντοχής διατομών σε εφελκυσμό μέχρι τη θραύση $\gamma_{\mathrm{M2}} = 1{,}25$

Ενεργός διατομή

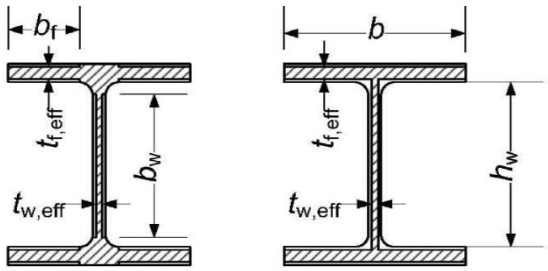
Η ενεργός διατομή είναι διαφορετική στην περίπτωση της αξονικής δύναμης και της ροπής κάμψης. Στην περίπτωση συνδυασμένης φόρτισης αξονικής δύναμης και καμπτικής ροπής, δεν απαιτείται ενεργός διατομή. Τότε χρησιμοποιείται εξίσωση αλληλεπίδρασης.



Σχήμα 4.1 Ενεργός διατομή για αξονική θλίψη, ροπή περί τον ισχυρό άξονα και περί τον ασθενή

- *Αξονική δύναμη*

Η ενεργός διατομή βασίζεται στο ενεργό πάχος των τμημάτων της διατομής. Σε περίπτωση που είναι η διατομή συμμετρική, τότε και η ενεργός διατομή είναι συμμετρική. Σε περίπτωση που είναι μη συμμετρική, τότε μπορεί να υπάρχει μία αλλαγή του ουδέτερου άξονα. Για ελατές διατομές που υπόκεινται σε αξονική θλίψη, αυτή η αλλαγή αγνοείται, δηλαδή η αξονική δύναμη θεωρείται ότι ενεργεί στο κέντρο της ενεργούς διατομής. Τυπικά μόνο τα επίπεδα τμήματα μεταξύ των ενώσεων πρέπει να μειωθούν, αλλά για λόγους απλοποίησης μειώνεται ολόκληρο το πέλμα ή ολόκληρος ο κορμός.

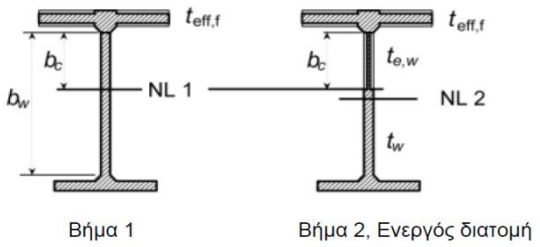


Σχήμα 4.2 Ενεργός διατομές για διατομές κατηγορίας 4 υπό θλίψη

- *Ροπή κάμψης*

Ο τοπικός λυγισμός μπορεί να επέλθει στη θλιβόμενη πλευρά. Για ένα μέλος υπό κάμψη ακόμα κι αν η διατομή είναι συμμετρική, η ενεργός διατομή είναι μη συμμετρική. Ο ουδέτερος άξονας της ενεργούς διατομής τοποθετείται πλησιέστερα στην εφελκυόμενη πλευρά και το θλιβόμενο τμήμα της διατομής αυξάνεται. Επί της αρχής πρέπει να χρησιμοποιηθεί μία επαναληπτική διαδικασία, ωστόσο μόνο δύο βήματα είναι απαραίτητα:

Για *διατομή IPE* το πρώτο είναι να υπολογιστεί το ενεργό πάχος του θλιβόμενου πέλματος και να υπολογιστεί ο ουδέτερος άξονας γι' αυτή τη διατομή. Κατόπιν υπολογίζεται το ενεργό πάχος του κορμού βασιζόμενο σε αυτόν τον ουδέτερο άξονα. Αυτή θα είναι και η τελική ενεργός διατομή.



Σχήμα 4.3 Ενεργές διατομές για διατομές κατηγορίας 4 υπό κάμψη

Περίπτωση που ο έλεγχος λειτουργικότητας είναι καθοριστικός

Το σχετικά χαμηλό μέτρο ελαστικότητας του αλουμινίου (συγκριτικά με το χάλυβα) σημαίνει ότι η οριακή κατάσταση λειτουργικότητας είναι συχνά καθοριστική. Για τις κατηγορίες 1, 2 και 3 μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο τύπος της αντίστασης που αντιστοιχεί στην ελαστικότητα:

$$M_{\mathrm{Rd}} = W_{\mathrm{el}} f_{\mathrm{o}} / \gamma_{\mathrm{M1}}$$

Για τη κατηγορία 4 μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο τύπος:

$$M_{\mathrm{Rd}} = \rho_{\mathrm{c}} W_{\mathrm{el}} f_{\mathrm{o}} / \gamma_{\mathrm{M1}}$$

όπου ρ_{c} είναι ο μειωτικός συντελεστής τοπικού λυγισμού για τη διατομή με την μεγαλύτερη τιμή του β/β_3. Η προσέγγιση αυτή είναι μάλλον συντηρητική ενώ δεν απαιτείται ο προσδιορισμός της ενεργού διατομής.

4.2.4 Τέμνουσα

Χάλυβας

Για τον έλεγχο επάρκειας έναντι τέμνουσας, η τιμή σχεδιασμού της τέμνουσας δύναμης V_{Ed} σε κάθε διατομή πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη:

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

όπου $V_{\mathrm{c,Rd}}$ είναι η αντοχή σχεδιασμού σε τέμνουσα.

Για πλαστικό σχεδιασμό, η $V_{c,Rd}$ είναι ίση με την πλαστική διατμητική αντοχή $V_{pl,Rd}$ (χωρίς παρουσία στρεπτικής καταπόνησης), όπως δίνεται από τη σχέση:

$$V_{Rd} = A_v f_y / \left(\sqrt{3}\gamma_{M0}\right)$$

όπου A_v είναι η επιφάνεια διάτμησης

Αλουμίνιο

Η τιμή σχεδιασμού της διατμητικής δύναμης V_{Ed} πρέπει να ικανοποιεί:

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

όπου V_{Rd} η διατμητική αντοχή σχεδιασμού της διατομής.

Για μη-λυγηρές διατομές: $h_w / t_w < 39\varepsilon$, $V_{Rd} = A_v f_o / \left(\sqrt{3}\gamma_{M1}\right)$

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 των πελμάτων

t_w είναι το πάχος του κορμού

d είναι η διάμετρος των οπών κατά μήκος του επιπέδου διάτμησης

n ο αριθμός των κορμών

Για συμπαγή ράβδο και στρογγυλό σωλήνα:

$$A_v = \eta_v A_e$$

όπου

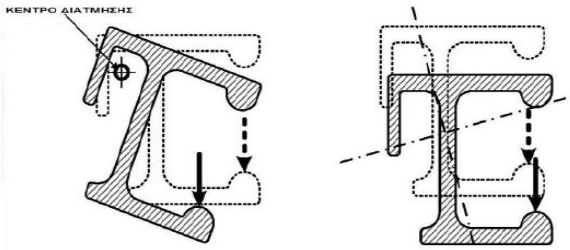
$\eta_v = 0{,}8$ για συμπαγή ράβδο

$\eta_v = 0{,}6$ για μη-συμπαγή ράβδο

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

4.2.5 Στρέψη

Χάλυβας και αλουμίνιο



Σχήμα 4.4 Στρέψη διατομής αλουμινίου

Στρέψη χωρίς στρέβλωση

Για μέλη που υπόκεινται σε στρέψη, στα οποία η επιρροή των παραμορφώσεων μπορεί να αγνοείται, η τιμή σχεδιασμού της στρεπτικής ροπής T_{Ed} σε κάθε διατομή πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση:

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

$T_{\mathrm{Rd}} = W_{\mathrm{T,pl}} f_{\mathrm{o}} / (\sqrt{3}\, \gamma_{\mathrm{M1}})$ είναι η αντοχή της διατομής σε στρέψη St.Venants στην οποία $W_{\mathrm{T,pl}}$ είναι η πλαστική στρεπτική ροπή αντίστασης

Στρέψη με στρέβλωση

Για μέλη που υπόκεινται σε στρέψη, στα οποία οι μεν συστροφικές παραμορφώσεις μπορούν να αγνοηθούν, αλλά όχι και η στρέψη λόγω στρέβλωσης, η ολική τιμή σχεδιασμού της ροπής στρέψης σε κάθε διατομή πρέπει να θεωρείται ίση με το άθροισμα των δύο εσωτερικών ροπών:

$$T_{\mathrm{Ed}} = T_{\mathrm{t,Ed}} + T_{\mathrm{W,Ed}}$$

όπου

$T_{\mathrm{t,Ed}}$ είναι η εσωτερική ροπή στρέψης St.Venants

$T_{\mathrm{W,Ed}}$ είναι η εσωτερική ροπή στρέψης λόγω στρέβλωσης

Συνδυασμός διάτμησης και ροπής στρέψης

Για συνδυασμένη διατμητική δύναμη και ροπή στρέψης και λαμβάνοντας υπόψη τις επιρροές στρέψης, η διατμητική αντοχή πρέπει να μειωθεί από V_{Rd} σε $V_{\mathrm{T,Rd}}$ και η διατμητική δύναμη σχεδιασμού πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση:

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

4.2.6 Κάμψη και διάτμηση

Χάλυβας

Όταν υπάρχει διατμητική δύναμη πρέπει να γίνεται πρόβλεψη για την επίδρασή της στη ροπή αντοχής. Όπου η διατμητική δύναμη είναι μικρότερη από τη μισή πλαστική διατμητική αντοχή, η επίδρασή της στη ροπή αντοχής μπορεί να αγνοείται, εκτός από εκεί όπου ο λυγισμός λόγω τέμνουσας (διατμητική κύρτωση) μειώνει την αντοχή της διατομής σύμφωνα με το πρότυπο EN 1993-1-5.

Διαφορετικά πρέπει να λαμβάνεται ως αντοχή σχεδιασμού της διατομής η μειωμένη ροπή αντοχής, που λαμβάνει υπόψη τη διάτμηση και για διατομές I κατηγορίας 1 ή 2 με ίσα πέλματα και κάμψη περί τον ισχυρό άξονα αδράνειας, μπορεί να υπολογίζεται από τη σχέση:

$$M_{\mathrm{y,V,Rd}} = \frac{\left[W_{\mathrm{pl,y}} - \frac{\rho A_{\mathrm{w}}{}^2}{4t_{\mathrm{w}}}\right] f_{\mathrm{y}}}{\gamma_{\mathrm{M0}}}$$

αλλά πρέπει $M_{\mathrm{y,V,Rd}} \leq M_{\mathrm{y,c,Rd}}$ όπου $\rho = \left(\frac{2V_{\mathrm{Ed}}}{V_{\mathrm{pl,Rd}}} - 1\right)^2$

Αλουμίνιο

Όταν η τιμή σχεδιασμού της διατμητικής δύναμης V_{Ed} δεν ξεπερνά το 50% της τιμής σχεδιασμού της διατμητικής αντοχής $V_{\mathrm{pl,Rd}}$, δεν απαιτείται μείωση στη ροπή αντίστασης.

Όταν η V_{Ed} ξεπερνά το 50% της $V_{\mathrm{pl,Rd}}$, η τιμή σχεδιασμού της ροπής αντοχής της διατομής πρέπει να μειωθεί σε μειωμένη πλαστική ροπή αντοχής $M_{\mathrm{V,Rd}}$ όπου:

α) Για την περιοχή διάτμησης η ροπή αντίστασης βρίσκεται με μειωμένη τιμή αντοχής του υλικού f_{ow} όπου:

$$f_{\mathrm{ow}} = f_{\mathrm{o}}\sqrt{1 - (V_{\mathrm{Ed}}/V_{\mathrm{pl,Rd}})^2}$$

β) Στην περίπτωση διατομών I κατηγορίας 1, 2 ή με ίσα πέλματα υπό κάμψη η τιμή της $M_{\mathrm{V,Rd}}$ είναι:

$$M_{\mathrm{V,Rd}} = t_{\mathrm{f}} b_{\mathrm{f}} (h_{\mathrm{s}} - t_{\mathrm{f}}) \frac{f_{\mathrm{o}}}{\gamma_{\mathrm{M1}}} + \frac{t_{\mathrm{w}} h_{\mathrm{w}}{}^2}{4} \frac{f_{\mathrm{ow}}}{\gamma_{\mathrm{M1}}}$$

4.3 Αντοχή των μελών σε λυγισμό

4.3.1 Μέλη σταθερής διατομής υπό θλίψη

4.3.1.1 Αντοχή σε λυγισμό και καμπύλες λυγισμού

Χάλυβας

Η επάρκεια ενός θλιβόμενου μέλους με σταθερή διατομή έναντι καμπτικού λυγισμού ελέγχεται με βάση την ακόλουθη σχέση:

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

όπου

N_{Ed} η τιμή σχεδιασμού της θλιπτικής δύναμης

$N_{\mathrm{b,Rd}}$ η αντοχή του θλιβόμενου μέλους σε λυγισμό.

Η αντοχή ενός θλιβόμενου μέλους σε λυγισμό λαμβάνεται από τη σχέση:

$$N_{\mathrm{b,Rd}} = \chi A f_{\mathrm{y}} / \gamma_{\mathrm{M1}} \quad \text{για διατομές κατηγορίας 1, 2 και 3}$$

όπου

χ μειωτικός συντελεστής

Σε μέλη υπό αξονική θλίψη, η τιμή του μειωτικού συντελεστή χ υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση ως συνάρτηση της ανηγμένης λυγηρότητας $\bar{\lambda}$ και του συντελεστή ατελειών α, ο οποίος εξαρτάται από την αντίστοιχη καμπύλη λυγισμού:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

όπου

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

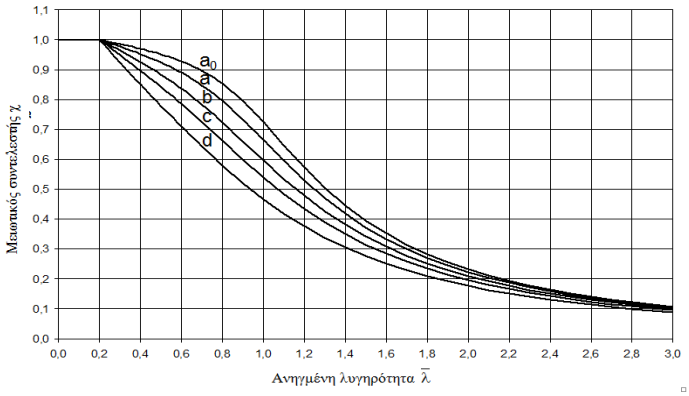
$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_{\mathrm{y}}}{N_{\mathrm{cr}}}} \quad \text{για διατομές κατηγορίας 1, 2 και 3}$$

α είναι ο συντελεστής ατελειών, που αντιστοιχεί σε κάθε καμπύλη λυγισμού και λαμβάνεται από τον Πίνακα 4.2, σε σχέση και με τον Πίνακα 6.2 του EN 1993-1-1.

N_{cr} είναι το ελαστικό κρίσιμο φορτίο για την αντίστοιχη μορφή λυγισμού βασισμένο στις ιδιότητες της πλήρους διατομής

Πίνακας 4.2 Συντελεστές ατελειών για καμπύλες λυγισμού

Καμπύλη λυγισμού	a_0	a	b	c	d
Συντελεστής ατελειών α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76



Σχήμα 4.5 Καμπύλες λυγισμού

Τιμές του μειωτικού συντελεστή χ για την κατάλληλη ανηγμένη λυγηρότητα $\bar{\lambda}$ μπορεί να λαμβάνονται από το Σχήμα 4.5.

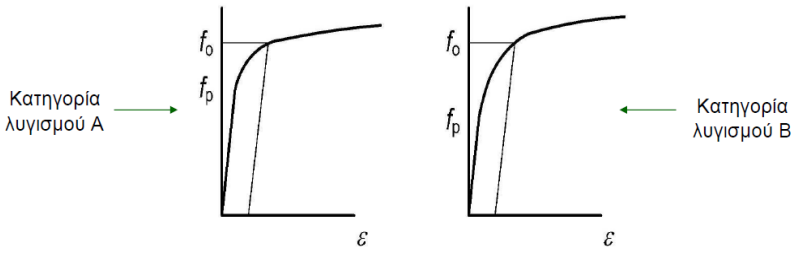
Για λυγηρότητα:

$$\bar{\lambda} \leq 0{,}2 \text{ ή για } \frac{N_{\mathrm{Ed}}}{N_{\mathrm{b,Rd}}} \leq 0{,}04$$

(μικρή λυγηρότητα), η αντοχή της διατομής εξαντλείται πριν εκδηλωθεί λυγισμός. Επομένως, οι επιδράσεις του λυγισμού μπορούν να αγνοούνται και να εφαρμόζονται μόνο έλεγχοι διατομών.

Αλούμινιο

Οι μικρές παραμένουσες τάσεις στις ελατές διατομές σημαίνουν ότι οι καμπύλες λυγισμού δεν εξαρτώνται από τη μορφή της διατομής (όπως στο χάλυβα). Η καμπύλη λυγισμού εξαρτάται από το υλικό και τη διαμήκη συγκόλληση. Η κατηγορία λυγισμού Α ή Β εξαρτάται από το διάγραμμα *σ-ε* για μικρές παραμορφώσεις.



Σχήμα 4.6 Διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων για τις κατηγορίες λυγισμού Α και Β

Ο έλεγχος έναντι καμπτικού και στρεπτικού ή στρεπτοκαμπτικού λυγισμού είναι:

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

όπου

N_{Ed} τιμή σχεδιασμού της θλιπτικής δύναμης

$N_{\mathrm{b,Rd}}$ αντοχή σχεδιασμού λυγισμού του θλιβόμενου μέλους για την οποία ισχύει

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

όπου

χ μειωτικός συντελεστής για την αντίστοιχη μορφή λυγισμού

κ συντελεστής για να ληφθεί υπόψη η εξασθένηση λόγω συγκολλήσεων. Στη περίπτωση μελών με διαμήκεις συγκολλήσεις ο κ δίνεται από πίνακα στον ΕΚ9 για καμπτικό λυγισμό και $\kappa = 1$ για στρεπτικό ή στρεπτοκαμπτικό λυγισμό. Στην περίπτωση μελών με εγκάρσιες συγκολλήσεις $\kappa = \omega_\chi$ όπου το ω_χ δίνεται από σχέσεις στον ΕΚ9.

A_{eff} είναι η ενεργός επιφάνεια για να ληφθεί υπόψη ο τοπικός λυγισμός για διατομές κατηγορίας 4

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

Η τιμή του χ για την κατάλληλη ανηγμένη λυγηρότητα $\bar{\lambda}$ καθορίζεται από την αντίστοιχη καμπύλη λυγισμού σύμφωνα με τη σχέση

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

αλλά χ <1,0

όπου

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

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

α ο συντελεστής ατελειών

$\bar{\lambda}_0$ 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 που αντιστοιχεί στην κατάλληλη καμπύλη λυγισμού προκύπτει από τον Πίνακα 5.6 του EN 1999-1-1 για καμπτικό λυγισμό και από τον Πίνακα 5.8 του EN 1999-1-1 για στρεπτικό ή στρεπτοκαμπτικό λυγισμό.

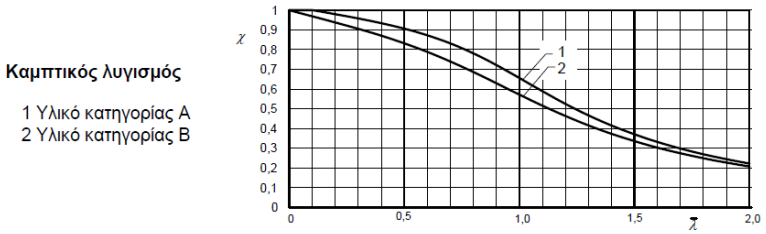
Πίνακας 4.3 Τιμές συντελεστή ατελειών α και ορίου οριζοντίου κλάδου $\bar{\lambda}_0$ για καμπτικό λυγισμό

Κράμα	α	$\bar{\lambda}_0$
Θερμικής επεξεργασίας	0,20	0,10
Μη-θερμικά επεξεργασμένο	0,32	0,00

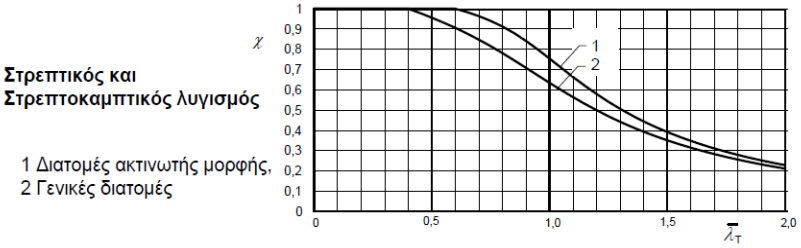
Πίνακας 4.4 Τιμές συντελεστή ατελειών α και ορίου οριζοντίου κλάδου $\bar{\lambda}_0$ για στρεπτικό ή στρεπτοκαμπτικό λυγισμό

Διατομή	α	$\bar{\lambda}_0$
Γενικά	0,35	0,40
Διατομές ακτινωτής διατομής	0,20	0,60

Μειωτικός συντελεστής χ



Σχήμα 4.7 Τιμές μειωτικού συντελεστή χ συναρτήσει της ανηγμένης λυγηρότητας $\bar{\lambda}$ για καμπτικό λυγισμό



Σχήμα 4.8 Τιμές μειωτικού συντελεστή χ συναρτήσει της ανηγμένης λυγηρότητας $\bar{\lambda}$ για στρεπτικό και στρεπτοκαμπτικό λυγισμό

4.3.1.2 Λυγηρότητα για καμπτικό λυγισμό

Χάλυβας

Η ανηγμένη λυγηρότητα $\bar{\lambda}$ δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_{\mathrm{y}}}{N_{\mathrm{cr}}}} = \frac{L_{\mathrm{cr}}}{i}\frac{1}{\lambda_1}$$

για διατομές κατηγορίας 1, 2 και 3

όπου

L_{cr} είναι το μήκος λυγισμού στο υπό θεώρηση επίπεδο λυγισμού

$i = \sqrt{I/A}$ είναι η ακτίνα αδρανείας περί τον αντίστοιχο άξονα, υπολογισμένη χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες της πλήρους διατομής

$$\lambda_1 = \pi\sqrt{\frac{E}{f_{\mathrm{y}}}} = 93{,}9\varepsilon$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{\mathrm{y}}}} \ (f_{\mathrm{y}} \text{ σε N/mm}^2)$$

Αλουμίνιο

Η σχετική λυγηρότητα $\bar{\lambda}$ ισούται με

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{\mathrm{eff}}f_{\mathrm{o}}}{N_{\mathrm{cr}}}} = \frac{L_{\mathrm{cr}}}{i}\frac{1}{\pi}\sqrt{\frac{A_{\mathrm{eff}}}{A}\frac{f_{\mathrm{o}}}{E}}$$

όπου

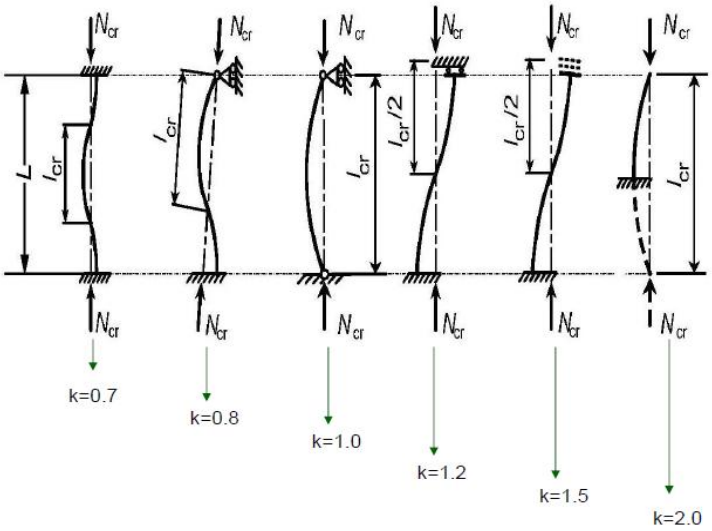
L_{cr} το μήκος λυγισμού στο επίπεδο λυγισμού που θεωρείται

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

Το μήκος λυγισμού $L_{\mathrm{cr}} = kL$, 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, καθορίζεται μέσα από τις συνοριακές συνθήκες.

Πινακας 4.5 Τιμές του συντελεστή 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 σε ένα άκρο, άλλα μη δεσμευμένο κατά θέση στο άλλο άκρο	2,0



Σχήμα 4.9 Μορφές συνοριακών συνθηκών θλιβόμενων ράβδων

4.3.1.3 Λυγηρότητα για στρεπτικό και στρεπτοκαμπτικό λυγισμό

Χάλυβας

Η ανηγμένη λυγηρότητα $\bar{\lambda}_{\mathrm{T}}$ για στρεπτικό ή στρεπτοκαμπτικό λυγισμό πρέπει να λαμβάνεται ως:

$$\bar{\lambda}_{\mathrm{T}} = \sqrt{\frac{A f_{\mathrm{y}}}{N_{\mathrm{cr,T}}}}$$

για διατομές κατηγορίας 1, 2 και 3

Για στρεπτικό λυγισμό, η κατάλληλη καμπύλη λυγισμού μπορεί να καθορίζεται από τον Πίνακα 6.2 του EN 1993-1-1, θεωρώντας αυτήν που σχετίζεται με τον άξονα z. Πρακτικά ο στρεπτικός λυγισμός είναι δυσμενέστερος του καμπτικού για περιορισμένο αριθμό διατομών.

Αλουμίνιο

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 για στρεπτικό και στρεπτοκαμπτικό λυγισμό ισούται με:

$$\bar{\lambda}_{\mathrm{T}} = \sqrt{\frac{A_{\mathrm{eff}} f_{\mathrm{o}}}{N_{\mathrm{cr}}}}$$

όπου

A_{eff} η ενεργός διατομή

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

4.3.2 Μέλη σταθερής διατομής υπό κάμψη

4.3.2.1 Αντοχή σε λυγισμό

Χάλυβας

Μία πλευρικά μη προστατευμένη δοκός που υπόκειται σε κάμψη περί τον ισχυρό άξονα πρέπει να ελέγχεται έναντι στρεπτοκαμπτικού λυγισμού ως εξής:

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

όπου

M_{Ed} είναι η τιμή σχεδιασμού της ροπής

$M_{\mathrm{b,Rd}}$ είναι η ροπή αντοχής σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό

Δοκοί με ικανοποιητική πλευρική στήριξη στα θλιβόμενα πέλματα δεν είναι ευαίσθητες σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό. Επιπρόσθετα, δοκοί με κάποιους τύπους διατομών, όπως τετραγωνικές ή κυκλικές κοίλες διατομές, κατασκευασμένοι κυκλικοί σωλήνες ή τετραγωνικές κιβωτιοειδείς διατομές δεν είναι ευαίσθητες σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό.

Η ροπή αντοχής σε λυγισμό μιας πλευρικά μη προστατευμένης δοκού πρέπει να λαμβάνεται ως:

$$M_{\mathrm{b,Rd}} = \chi_{\mathrm{LT}} W_{\mathrm{y}} f_{\mathrm{y}} / \gamma_{\mathrm{M1}}$$

όπου W_{y} είναι η κατάλληλη ροπή αντίστασης της διατομής ως εξής:

- $W_{\mathrm{y}} = W_{\mathrm{pl,y}}$ για διατομές κατηγορίας 1 ή 2
- $W_{\mathrm{y}} = W_{\mathrm{el,y}}$ για διατομές κατηγορίας 3
- $W_{\mathrm{y}} = W_{\mathrm{eff,y}}$ για διατομές κατηγορίας 4

χ_{LT} είναι ο μειωτικός συντελεστής για στρεπτοκαμπτικό λυγισμό.

Αλουμίνιο

Ο στρεπτικός και στρεπτοκαμπτικός λυγισμός μπορεί να αγνοηθεί στις παρακάτω περιπτώσεις:

- Κοίλες διατομές
- Διπλά συμμετρικές διατομές μορφής I
- Διατομές που συνθέτονται εξ ολοκλήρου από ακτινωτά προεξέχοντα στοιχεία, για παράδειγμα γωνιακά, διατομές μορφής ταυ, διατομές σταυροειδούς μορφής που κατατάσσονται ως κατηγορία 1 και 2.

Ο πλευρικός λυγισμός μπορεί να αγνοηθεί στις παρακάτω περιπτώσεις:

- Όταν υπάρχει κάμψη περί τον ασθενή κύριο άξονα και ταυτόχρονα το φορτίο δεν εφαρμόζεται στο κέντρο διάτμησης.
- Όταν το μέλος είναι πλήρως δεσμευμένο έναντι πλευρικής μετατόπισης σε όλο το μήκος του.
- Όταν η σχετική λυγηρότητα μεταξύ των σημείων ενεργού πλευρικής στήριξης είναι μικρότερη από 0,4, δηλαδή $\bar{\lambda}_{\mathrm{LT}} < 0{,}4$.

Η ροπή αντοχής σε λυγισμό μιας πλευρικά μη εξασφαλισμένης δοκού είναι ίση με:

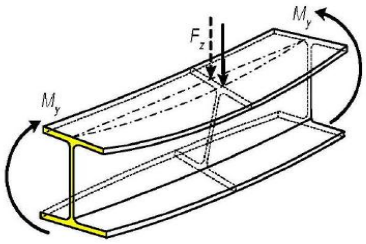
$$M_{\mathrm{b,Rd}} = \chi_{\mathrm{LT}} a W_{\mathrm{el,y}} f_{\mathrm{o}} / \gamma_{\mathrm{M1}}$$

όπου

$W_{\mathrm{el,y}}$ η ελαστική ροπή αντίστασης της πλήρους διατομής, χωρίς μείωση για την εξασθένηση λόγω ΘΕΖ, τοπικό λυγισμό ή οπές

a προκύπτει από τον πίνακα 5.3 του EN 1999-1-1 και υπόκειται στον περιορισμό $a \leq W_{\mathrm{pl,y}}/W_{\mathrm{el,y}}$

χ_{LT} ο μειωτικός συντελεστής για στρεπτοκαμπτικό- πλευρικό λυγισμό



Εικόνα 4.1 Δοκός υπό πλευρικό λυγισμό

4.3.2.2 Καμπύλες στρεπτοκαμπτικού (πλευρικού) λυγισμού

Χάλυβας

Για καμπτόμενα μέλη σταθερής διατομής η τιμή του μειωτικού συντελεστή χ_{LT} για την αντίστοιχη ανηγμένη λυγηρότητα $\bar{\lambda}_{\mathrm{LT}}$, πρέπει να καθορίζεται από τη σχέση:

$$\chi_{\mathrm{LT}} = \frac{1}{\phi_{\mathrm{LT}} + \sqrt{\phi_{\mathrm{LT}}{}^2 - \bar{\lambda}_{\mathrm{LT}}{}^2}}$$

$$\text{και } \chi_{\mathrm{LT}} \leq 1{,}0$$

$$\phi_{\mathrm{LT}} = 0{,}5(1 + \alpha_{\mathrm{LT}}(\bar{\lambda}_{\mathrm{LT}} - 0{,}2) + \bar{\lambda}_{\mathrm{LT}}{}^2)$$

α_{LT} είναι ο συντελεστής ατελειών (από Πίνακα 4.6)

$$\bar{\lambda}_{\mathrm{LT}} = \sqrt{\frac{W_{\mathrm{y}} f_{\mathrm{y}}}{M_{\mathrm{cr}}}}$$

όπου

$\bar{\lambda}_{\mathrm{LT}}$ η ανηγμένη λυγηρότητα πλευρικού λυγισμού

M_{cr} η ελαστική κρίσιμη ροπή πλευρικού λυγισμού, υπολογισμένη με βάση τις ιδιότητες της πλήρους διατομής και λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες φόρτισης, την πραγματική κατανομή της ροπής και τις πλευρικές δεσμεύσεις.

Πίνακας 4.6 Συντελεστής ατελειών για καμπύλες πλευρικού λυγισμού

Καμπύλη λυγισμού	a	b	c	d
Συντελεστής ατελειών α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

Η κατάλληλη καμπύλη λυγισμού που πρέπει να χρησιμοποιείται, δίνεται στον παρακάτω Πίνακα 4.7:

Πίνακας 4.7 Καμπύλη στρεπτοκαμπτικού λυγισμού

Διατομή	Όρια	Καμπύλη λυγισμού
Ελατές διατομές I	h/b ≤ 2 h/b > 2	a b
Συγκολλητές διατομές I	h/b ≤ 2 h/b > 2	c d
Άλλες διατομές	-	d

Οι τιμές του μειωτικού συντελεστή χ_{LT} μπορούν να προσδιορίζονται και από το Σχήμα 4.5, συναρτήσει της αντίστοιχης ανηγμένης λυγηρότητας $\bar{\lambda}_{\mathrm{LT}}$.

Για λυγηρότητα $\bar{\lambda}_{\mathrm{LT}} \leq 0{,}2$ ή για $M_{\mathrm{Ed}}/M_{\mathrm{cr}} \leq 0{,}04$ ($\bar{\lambda}_{\mathrm{LT}} \leq 0{,}4$ και $M_{\mathrm{Ed}}/M_{\mathrm{cr}} \leq 0{,}16$ για ελατές διατομές) ο κίνδυνος αστοχίας μέσω πλευρικού λυγισμού μπορεί να αμεληθεί και να γίνονται μόνον έλεγχοι διατομής. [Προσδιορισμός του M_{cr} από Παράρτημα F του EC3-Μέρος 1.1 (έκδοση 1992)]

Αλουμίνιο

Ο μειωτικός συντελεστής για πλευρικό λυγισμό για την αντίστοιχη σχετική λυγηρότητα είναι:

$$\chi_{\mathrm{LT}} = \frac{1}{\phi_{\mathrm{LT}} + \sqrt{\phi_{\mathrm{LT}}{}^2 - \bar{\lambda}_{\mathrm{LT}}{}^2}}$$

$$\text{και } \chi_{\mathrm{LT}} \leq 1{,}0$$

όπου

$$\phi_{\mathrm{LT}} = 0{,}5(1 + \alpha_{\mathrm{LT}}(\bar{\lambda}_{\mathrm{LT}} - \bar{\lambda}_{0,\mathrm{LT}}) + \bar{\lambda}_{\mathrm{LT}}{}^2)$$

$$\bar{\lambda}_{\mathrm{LT}} = \sqrt{\frac{aW_{\mathrm{el,y}}f_{\mathrm{o}}}{M_{\mathrm{cr}}}}$$

α_{LT} συντελεστής ατελειών

$\bar{\lambda}_{\mathrm{LT}}$ η σχετική λυγηρότητα

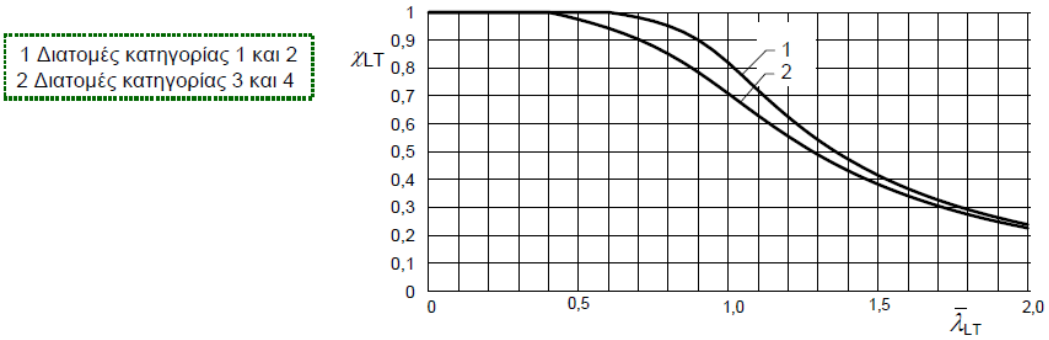
$\bar{\lambda}_{0,\mathrm{LT}}$ το όριο του οριζόντιου κλάδου

M_{cr} η ελαστική κρίσιμη ροπή για τον πλευρικό λυγισμό. Βασίζεται στις ιδιότητες της πλήρους διατομής και λαμβάνει υπόψη τις συνθήκες φόρτισης, την πραγματική κατανομή ροπών και τις πλευρικές στηρίξεις (Παράρτημα H.1.3 EN 1999-1-1).

Τιμές παραμέτρων

$\alpha_{\mathrm{LT}} = 0{,}10$ $\bar{\lambda}_{0,\mathrm{LT}} = 0{,}6$ για διατομές κατηγορίας 1 και 2

$\alpha_{\mathrm{LT}} = 0{,}20$ $\bar{\lambda}_{0,\mathrm{LT}} = 0{,}4$ για διατομές κατηγορίας 3 και 4



Σχήμα 4.10 Τιμές για το μειωτικό συντελεστή χ_{LT} συναρτήσει της λυγηρότητας $\bar{\lambda}_{LT}$

Για λυγηρότητα $\bar{\lambda}_{LT} \leq \bar{\lambda}_{0,LT}$ ή για $M_{Ed} \leq \bar{\lambda}_{0,LT}{}^2 M_{cr}$ τα φαινόμενα λυγισμού μπορούν να αγνοηθούν και να εφαρμοστεί μόνο ο έλεγχος διατομών.

4.3.3 Μέλη σταθερής διατομής υπό θλίψη και κάμψη

Χάλυβας

Εκτός εάν εκτελείται ανάλυση δεύτερης τάξης, 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 ευαίσθητα σε στρεπτικές παραμορφώσεις, π.χ. κοίλες κυκλικές διατομές ή διατομές όπου η στρέψη παρεμποδίζεται, στα οποία λαμβάνεται χ_{LT} =1,0.
- Μελών που είναι ευαίσθητα σε στρεπτικές παραμορφώσεις, π.χ. μέλη με ανοιχτές διατομές, στα οποία δεν παρεμποδίζεται η στρέψη, όπου ο στρεπτοκαμπτικός λυγισμός αποτελεί πιθανή μορφή αστοχίας, οπότε πρέπει να υπολογίζεται ο χ_{LT}.

Για μέλη δομικών συστημάτων ο έλεγχος αντοχής μπορεί να γίνεται βασιζόμενος στα μεμονωμένα μέλη ενός ανοίγματος, θεωρούμενα αποκομμένα από το σύστημα.

Επομένως, μέλη που υπόκεινται σε συνδυασμένη κάμψη και θλίψη πρέπει να ικανοποιούν:

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy}\frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT}\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz}\frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1{,}0$$

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy}\frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT}\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz}\frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1{,}0$$

όπου

N_{Ed}, $M_{y,Ed}$ και $M_{z,Ed}$ οι τιμές σχεδιασμού της θλιπτικής αξονικής δύναμης και των μέγιστων ροπών ως προς τους άξονες y-y και z-z κατά μήκος του μέλους αντίστοιχα

$\Delta M_{y,Ed}$, $\Delta M_{z,Ed}$ οι ροπές λόγω μετατόπισης του κεντροβαρικού άξονα για διατομές κατηγορίας 4, βλ. Πίνακα 4.8

χ_y και χ_z	οι μειωτικοί συντελεστές λόγω καμπτικού λυγισμού
χ_{LT}	ο μειωτικός συντελεστής λόγω πλευρικού λυγισμού. Για μέλη μη ευαίσθητα σε στρεπτική παραμόρφωση θα λαμβάνεται $\chi_{LT} = 1{,}0$
k_{yy}, k_{yz}, k_{zy}, k_{zz}	οι συντελεστές αλληλεπίδρασης, εξαρτώμενοι από τη μέθοδο που έχει επιλεγεί

Πίνακας 4.8 Τιμές για $N_{Rk} = f_y A_i$, $M_{Rk} = f_y W_i$ και $\Delta M_{i,Ed}$

Κατηγορία	1	2	3	4
A_i	A	A	A	A_{eff}
W_y	$W_{pl,y}$	$W_{pl,y}$	$W_{el,y}$	$W_{eff,y}$
W_z	$W_{pl,z}$	$W_{pl,z}$	$W_{el,z}$	$W_{eff,z}$
$\Delta M_{y,Ed}$	0	0	0	$e_{N,y}\, N_{Ed}$
$\Delta M_{z,Ed}$	0	0	0	$e_{N,z}\, N_{Ed}$

Οι συντελεστές αλληλεπίδρασης k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} , k_{zz} μπορούν να λαμβάνονται από δύο εναλλακτικές μεθόδους, με το Εθνικό Προσάρτημα να επιτρέπει τη χρήση και των δύο.

Αλουμίνιο

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:

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

Απαιτούνται δύο έλεγχοι για μέλη που είναι ευεπίφορα σε στρεπτικές παραμορφώσεις: α) καμπτικός λυγισμός και β) πλευρικός λυγισμός.

Για τον υπολογισμό των αντοχών N_{Rd}, $M_{y,Rd}$ και $M_{z,Rd}$ πρέπει να ληφθεί υπόψη η εξασθένηση ΘΕΖ λόγω διαμήκων συγκολλήσεων. Η παρουσία τοπικών εξασθενήσεων ΘΕΖ από τις εγκάρσιες συγκολλήσεις και η παρουσία οπών πρέπει να αντιμετωπιστούν.

Καμπτικός λυγισμός

Για ένα μέλος με ανοικτές διατομές διπλής συμμετρίας (συμπαγείς διατομές), πρέπει να ικανοποιείται ένα από τα παρακάτω κριτήρια:

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

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\chi_y \omega_x N_{Rd}}\right)^{\xi_{yc}} + \frac{M_{y,Ed}}{\omega_0 M_{y,Rd}} \leq 1{,}0$$

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

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\chi_z \omega_x N_{Rd}}\right)^{\eta_c} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{\omega_0 M_{z,Rd}}\right)^{\xi_{zc}} \leq 1{,}0$$

όπου

$\omega_x = \omega_0 = 1$ για δοκούς-υποστυλώματα χωρίς τοπικές συγκολλήσεις και με ίσες ροπές στα άκρα

N_{Ed} η τιμή σχεδιασμού της αξονικής θλιπτικής δύναμης

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

$N_{Rd} = \kappa A f_o / \gamma_{M1}$ ή $A_{eff} f_o / \gamma_{M1}$ για διατομές κατηγορίας 4

χ_y , χ_z μειωτικοί συντελεστές για λυγισμό στο επίπεδο z-x και στο επίπεδο y-x

$M_{y,Rd} = \alpha_y W_y f_o / \gamma_{M1}$ 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 οι συντελεστές μορφής- όχι μεγαλύτεροι από 1,25

Για συμπαγείς διατομές χρησιμοποιείται το κριτήριο αυτό με τους εκθέτες ίσους με 0,8.

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

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

Πλευρικός λυγισμός

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\chi_z \omega_x N_{Rd}}\right)^{\eta_c} + \left(\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT}\omega_{xLT} M_{y,Rd}}\right)^{\gamma_c} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{\omega_0 M_{z,Rd}}\right)^{\xi_{zc}} \leq 1,0$$

Πρέπει επίσης να ικανοποιείται το κριτήριο για καμπτικό λυγισμό.

4.4 Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (SLS)

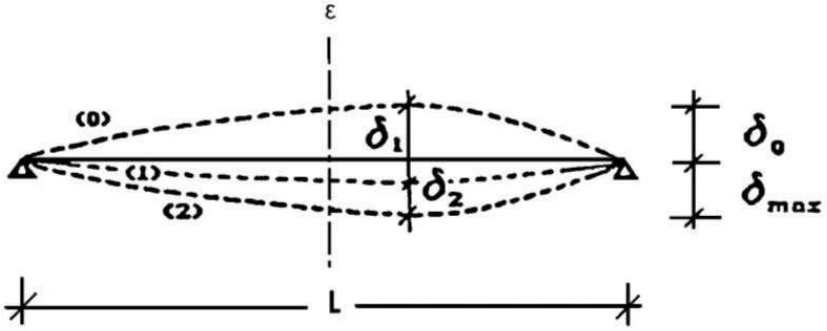
Η οριακή κατάσταση λειτουργικότητας αφορά γενικά την εξασφάλιση ότι οι μετακινήσεις και οι στροφές δεν είναι υπερβολικές υπό κανονικές συνθήκες χρήσης. Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι επίσης αναγκαίο να εξασφαλιστεί ότι η κατασκευή δεν υπόκειται σε υπερβολικές ταλαντώσεις. Περιπτώσεις όπου αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό περιλαμβάνουν κατασκευές εκτεθειμένες σε σημαντικές δυναμικές καταπονήσεις ή εκείνες που εξυπηρετούν ευαίσθητο εξοπλισμό. Τόσο οι μετακινήσεις όσο και οι ταλαντώσεις συνδέονται περισσότερο με τη δυσκαμψία παρά με την αντοχή της κατασκευής.

Για κατασκευές από χάλυβα και αλουμίνιο, επαρκής δυσκαμψία εξασφαλίζεται γενικά υπολογίζοντας τις μετακινήσεις και εξασφαλίζοντας ότι αυτές είναι μικρότερες από τα προκαθορισμένα όρια. Επειδή οι οριακές καταστάσεις

λειτουργικότητας αναφέρονται στην συμπεριφορά του φορέα υπό συνθήκες φορτίσεως λειτουργίας, ο έλεγχος γίνεται με τους αντίστοιχους συνδυασμούς φορτίων και με βάση την ελαστική ανάλυση ανεξάρτητα από την ανάλυση που έχει χρησιμοποιηθεί για τον σχεδιασμό στην οριακή κατάσταση αστοχίας.

Οι υπερβολικές μετατοπίσεις είναι δυνατόν να προκαλέσουν ένα πλήθος ανεπιθύμητων αποτελεσμάτων τόσο αισθητικών αλλά κυρίως λειτουργικών. Μερικά από αυτά είναι οι ζημιές στα τελειώματα και τα υλικά πλήρωσης (χωρίσματα) της κατασκευής (ειδικά όταν χρησιμοποιούνται εύθραυστα υλικά, όπως γυαλί γύψινες κατασκευές και ασβεστοκονίαμα), οι συσσωρεύσεις νερού σε επίπεδες στέγες, η δυσχέρεια στη λειτουργία γερανογεφυρών, η οπτική ενόχληση στους χρήστες και σε εξαιρετικές περιπτώσεις, αλλαγές στην στατική λειτουργία του φορέα, που μπορεί να προκαλέσει ακόμα και αστοχίες.

Ο σχεδιασμός περιλαμβάνει προσδιορισμό των κατακόρυφων βελών και σύγκριση τους με τα επιτρεπόμενα όρια, τα οποία εξαρτώνται από το είδος τον φερόντων και μη φερόντων στοιχείων (π.χ. διαφορετικά όρια βελών για οροφές και δάπεδα).



Σχήμα 4.11 Βέλη κάμψης

Το συνολικό βέλος ισούται με: $\delta max = \delta 1 + \delta 2 - \delta o$

όπου:

δmax είναι το συνολικό βέλος κάμψης στην τελική κατάσταση με την ευθεία γραμμή που ενώνει τις στηρίξεις

δ1 είναι το βέλος λόγω μονίμων φορτίων

δ2 είναι το βέλος λόγω μεταβλητών δράσεων

δo είναι το αρχικό αντιβέλος κάμψης στην αφόρτιστη κατάσταση

Σύμφωνα με το Εθνικό Προσάρτημα (Μέρος 1-1 : Γενικοί κανόνες και κανόνες για κτίρια) για τα όρια των κατακόρυφων βελών ισχύουν οι τιμές του Πίνακα 4.9.

Πίνακας 4.9 Μέγιστες αποδεκτές τιμές βελών κάμψης

	δmax	δ2
Μη βατές στέγες	L/200	L/250
Πατώματα και βατές στέγες	L/250	L/300

Για τα όρια των οριζόντιων μετατοπίσεων , και συγκεκριμένα για τα μονώροφα κτίρια πρέπει να ισχύει:

Μονώροφα κτίρια χωρίς γερανογέφυρες: $u \leq H/150$

(u είναι η μετακίνηση και H το ύψος του κτιρίου)

5 Παρουσίαση του φορέα και φορτία κατασκευής

5.1 Περιγραφή του μεταλλικού ζυγώματος

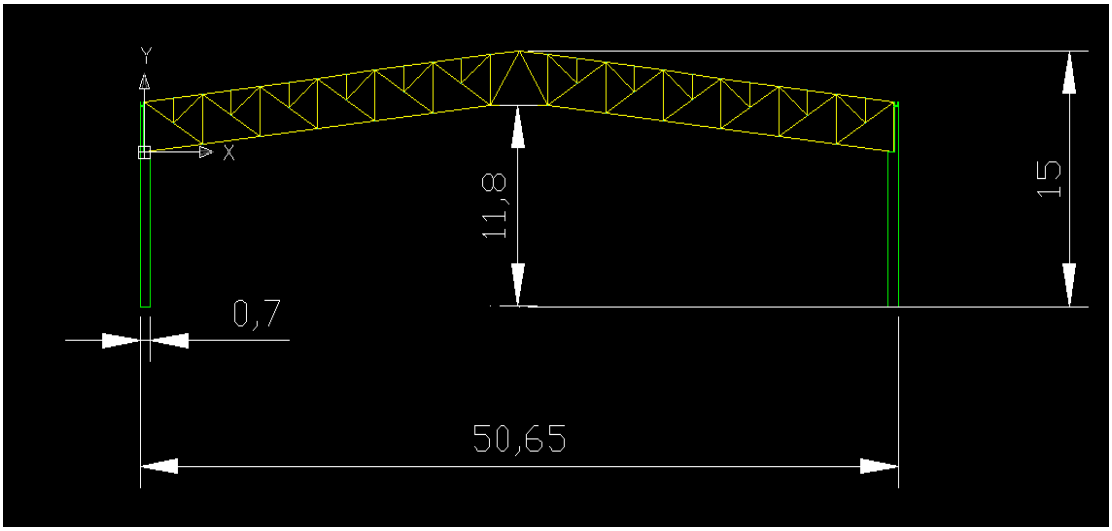
Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας, μελετάται ένα μεταλλικό ζύγωμα ενός στεγάστρου που στεγάζει κλειστό κολυμβητήριο με χρήση δύο υλικών: α) χάλυβα και β) αλουμίνιο.

Το κλειστό κολυμβητήριο στην πραγματικότητα βρίσκεται στην πόλη Barranquilla της Κολομβίας και ανήκει στις εγκαταστάσεις του πανεπιστημίου Universidad del Norte. Τα ζυγώματα του στεγάστρου του κολυμβητηρίου είναι κατασκευασμένα από αλουμίνιο. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, θεωρώ ότι η κατασκευή βρίσκεται στην Ελλάδα (περιοχή Χανίων Κρήτης σε υψόμετρο 100m από τη στάθμη της θάλασσας), προκειμένου να γίνει η μελέτη με χρήση των Ευρωκωδίκων. Επιπλέον, γίνεται διαστασιολόγηση των ζυγωμάτων του στεγάστρου με χρήση τόσο χάλυβα όσο και αλουμινίου, έτσι ώστε να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων της διαστασιολόγησης σχετικά με το ποιό υλικό είναι οικονομικότερο για τη κατασκευή αυτή.

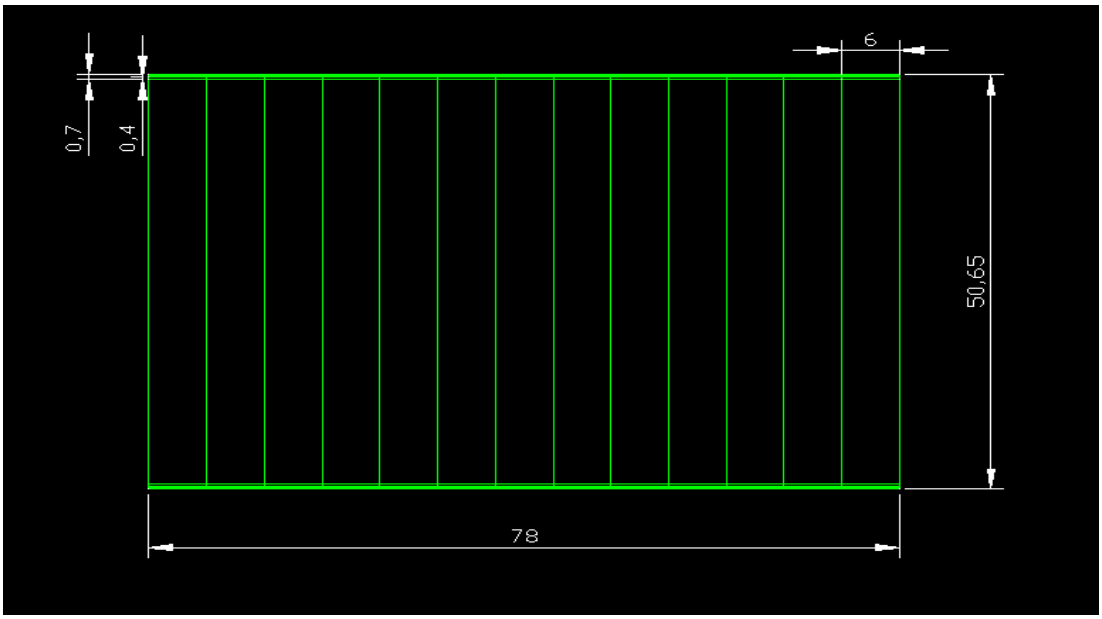
Το κτίριο διαθέτει ορθογωνική κάτοψη διαστάσεων 78,00x50,65 m^2 και οι κύριοι φορείς του στεγάστρου του είναι δεκατέσσερα δικτυωτά ζυγώματα παράλληλα διατεταγμένα ανά 6,0 m, τα οποία στηρίζονται στα φέροντα τοιχώματα του κολυμβητηρίου. Το μέγιστο ύψος του κτιρίου είναι 15,0 m και η στέγη έχει κλίση $\alpha = 12{,}0^{o}$ ως προς το οριζόντιο επίπεδο.

Δε γίνεται μελέτη του στεγάστρου κατά την εγκάρσια διεύθυνση (π.χ. διαστασιολόγηση συνδέσμων δυσκαμψίας, κεφαλοδοκών), καθώς στόχος της εργασίας αυτής είναι η σύγκριση του χάλυβα και του αλουμινίου ως υλικά κατασκευής όμοιων κατασκευών και όχι η διαστασιολόγηση του στεγάστρου. Τα μόνα στοιχεία της εγκάρσιας διεύθυνσης που λαμβάνονται υπόψη είναι οι τεγίδες (από χάλυβα και αλουμίνιο αντίστοιχα), οι οποίες διατάσσονται ανά ίσες μεταξύ τους αποστάσεις (1,925 m) και ως κύριο σκοπό έχουν να μεταφέρουν τα φορτία από τα εδραζόμενα σε αυτά πάνελ επικάλυψης με ασφάλεια. Επίσης γίνεται θεώρηση ότι έχουν τοποθετηθεί οριζόντιοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας ανά δεύτερη τεγίδα στο άνω πέλμα (οριζόντια απόσταση 3,85 m) και ανά δεύτερο κόμβο στο κάτω πέλμα (οριζόντια απόσταση 7,70 m), οι οποίοι προσφέρουν πλευρική στήριξη (εξασφάλιση έναντι λυγισμού) στα ζυγώματα. Το βάρος των συνδέσμων αυτών δε λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς.

Για την κατασκευή χάλυβα έχουν χρησιμοποιηθεί πρότυπες διατομές θερμής έλασης. Ως υλικό κατασκευής επιλέχθηκε χάλυβας ποιότητας S275. Για την κατασκευή αλουμινίου χρησιμοποιήθηκαν διελασμένες διατομές διαστάσεων ίδιων με αυτών των πρότυπων διατομών χάλυβα. Το κράμα αλουμινίου που επιλέχθηκε είναι το 6061 κατάστασης σκλήρυνσης T6 (f_o = 241,32 MPa). Ο λόγος επιλογής του κράματος αυτού είναι καταρχήν η καταλληλότητά του για κατασκευές όπως αυτή (από άποψη αντιδιαβρωτικής συμπεριφοράς και αντοχής θραύσης) αλλά και λόγω της διαθεσιμότητάς του στο πρόγραμμα SAP2000 με το οποίο έγινε η μελέτη.



Σχήμα 5.1 Όψη και διαστάσεις κατασκευής



Σχήμα 5.2 Κάτοψη κολυμβητηρίου

5.2 Γενικά για τα φορτία

Ο σχεδιασμός της κατασκευής (μόρφωση, ανάλυση, διαστασιολόγηση) γίνεται με βάση το πλέγμα των Ευρωκωδίκων. Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1 σε μια κατασκευή ενεργούν τρία είδη δράσεων ως προς το χρόνο:

G (Permanent) Μόνιμες Δράσεις (ίδια βάρη κατασκευής, λοιπά μόνιμα φορτία όπως σταθερός εξοπλισμός και επιστρώσεις).

Q (Variable) Μεταβλητές Δράσεις (ωφέλιμα φορτία, χιόνι, άνεμος).

A (Accidental) Τυχηματικές Δράσεις (εκρήξεις, προσκρούσεις οχημάτων, πυρκαγιά)

Επίσης δράση επί της κατασκευής θεωρούμε και τη σεισμική, η οποία είναι έμμεση δράση λόγω επιβαλλόμενων μετατοπίσεων (στην εργασία αυτή δε λαμβάνεται υπόψη):

E Σεισμικές Δράσεις

5.3 Μόνιμες Δράσεις

Με τον όρο αυτό νοούνται όλες οι δράσεις, οι οποίες αναμένει να επενεργήσουν κατά τη διάρκεια μιας δεδομένης περιόδου αναφοράς και για την οποία η διαφοροποίηση του μεγέθους τους στο χρόνο είναι αμελητέα. Περιλαμβάνονται όλα τα κατακόρυφα φορτία που δρουν καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της κατασκευής, όπως τα ίδια βάρη (φέροντα στοιχεία, τοίχοι πληρώσεως, ψευδοροφές, επικαλύψεις και επενδύσεις, επιστρώσεις και μονώσεις δαπέδων, ηλεκτρικά και υδραυλικά δίκτυα, κλιματιστικά συστήματα).

Οι τιμές των μόνιμων φορτίων που δρουν στο φορέα είναι:

1.Ίδιο βάρος χάλυβα 78,5 kN/m³

2.Ίδιο βάρος αλουμινίου 27,0 kN/m^3

3.Ίδιο βάρος επικάλυψης 0,65 kN/m² για το χάλυβα και 0,59 kN/m² για το αλουμίνιο (0,15 kN/m² ίδια βάρη τεγίδων και 0,15 kN/m² ίδια βάρη φύλλων επικάλυψης για το χάλυβα και 0,09 kN/m² ίδια βάρη τεγίδων και 0,15 kN/m² ίδια βάρη φύλλων επικάλυψης για το αλουμίνιο και 0,35 kN/m² Η/Μ εξοπλισμός στη στέγη και στις δύο περιπτώσεις).

Διευκρινίζεται ότι τα ίδια βάρη του φέροντος οργανισμού υπολογίζονται αυτόματα από το SAP2000.

5.4 Μεταβλητές Δράσεις

5.4.1 Ωφέλιμα Φορτία

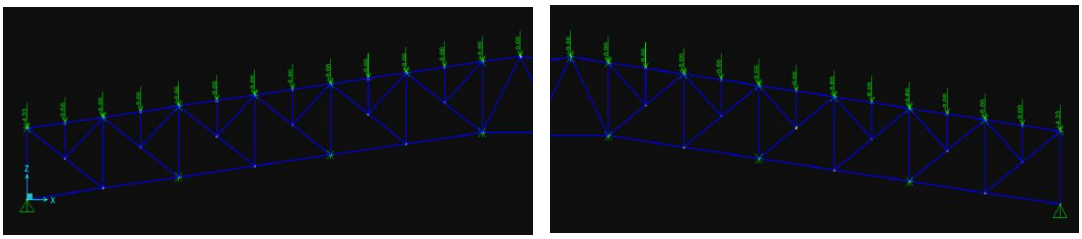
5.4.1.1 Γενικά

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα κατακόρυφα φορτία που προκύπτουν από τη χρήση του κτιρίου και προέρχονται από την παρουσία ανθρώπων, επίπλων, κινητού εξοπλισμού, οχημάτων, αποθηκευμένων αγαθών κλπ. Οι μεταβλητές δράσεις, θα πρέπει να τοποθετούνται κατά τον πλέον δυσμενή τρόπο στο φορέα, ώστε να καλύπτονται όλες οι ενδεχόμενες φορτικές καταστάσεις (δυσμενείς φορτίσεις) και να προσδιορίζεται η δυσμενέστερη επιρροή τους.

Σε καταστάσεις σχεδιασμού, όπου τα επιβαλλόμενα φορτία δρουν ταυτόχρονα με άλλες μεταβλητές δράσεις (π.χ. άνεμος, χιόνι κλπ), το σύνολο των επιβαλλόμενων φορτίων που λαμβάνονται υπόψη στη συγκεκριμένη περίπτωση φόρτισης, θα θεωρείται ως μια ενιαία δράση. Σε στέγες, τα επιβαλλόμενα φορτία δεν εφαρμόζονται ταυτόχρονα με τα φορτία χιονιού ή ανέμου.

5.4.1.2 Κινητό φορτίο στέγης

Στην κατασκευή που σχεδιάζεται η στέγη δεν είναι βατή, όμως ορίζουμε κινητό ομοιόμορφο φορτίο στην οροφή ίσο με 0,75 kN/m² που προέρχεται π.χ. από εργάτη. Υπολογίζεται ως γραμμικό φορτίο στα ζυγώματα. Υπενθυμίζεται ότι το φορτίο αυτό δε δρα ταυτόχρονα με τα φορτία χιονιού ή ανέμου, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα. Το κινητό φορτία στέγης φαίνεται στο Σχήμα 5.3.



α) β)

Σχήμα 5.3 Κινητά φορτία στη στέγη α) για χάλυβα και β) για αλουμίνιο

5.4.2 Φορτία Χιονιού

Τα φορτία λόγω χιονιού αντιμετωπίζονται παραδοσιακά, ορίζοντας μια συγκεκριμένη απλή τιμή φορτίου, με πιθανές μειώσεις για απότομες κλίσεις στεγών. Η προσέγγιση αυτή δε λαμβάνει υπόψη περιπτώσεις όπως αυξανόμενη χιονόπτωση σε μεγαλύτερα υψόμετρα ή τοπικά υψηλότερα φορτία λόγω κίνησης της μάζας του χιονιού, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει πλήρη ή μερική κατάρρευση. Μια καλύτερη προσέγγιση είναι η χρησιμοποίηση κατάλληλου χάρτη, που δίνει τις βασικές εντάσεις των φορτίων χιονιού για ένα συγκεκριμένο υψόμετρο και περίοδο αναφοράς, ενώ μπορεί να εφαρμοστούν εν συνεχεία διορθώσεις για διαφορετικά υψόμετρα ή διάρκεια ζωής σχεδιασμού.

Η επιρροή της μορφής της στέγης λαμβάνεται υπόψη με τη χρήση συντελεστών μορφής. Καλύπτονται επίσης ειδικότερες καταστάσεις όπως συσσωρεύσεις χιονιού πίσω από στηθαία, σε κοιλάδες και σε απότομες αλλαγές του ύψους της στέγης.

Το φορτίο χιονιού κατατάσσεται στις μεταβλητές σταθερές δράσεις. Προκαλείται από την εναπόθεση του χιονιού σε οριζόντιες ή κεκλιμένες στέγες και είναι ιδιαίτερα σημαντικό για περιοχές όπου επικρατεί κρύος καιρός και είναι συνήθεις μεγάλες χιονοπτώσεις. Η ποσότητα του χιονιού που εναποτίθεται σε μια στέγη εξαρτάται από την κλίση της στέγης και την τοποθεσία (υψόμετρο, προσανατολισμός κλπ.) του έργου, ενώ η πυκνότητά του μέσω της οποίας προσδιορίζεται το αντίστοιχο φορτίο χιονιού δεν είναι σταθερή και εξαρτάται από το βαθμό συμπύκνωσής του στη συγκεκριμένη θέση. Έτσι, πέραν της χιονόπτωσης σε συνθήκες ηρεμίας, μπορεί να είναι αναγκαίο να θεωρηθούν οι επιδράσεις του ανέμου, ο οποίος είναι δυνατόν να προκαλέσει ανακατανομή του χιονιού και σε μερικές περιπτώσεις τη μερική του απομάκρυνση από την στέγη. Επιπλέον, πρέπει να ληφθούν υπόψη οποιεσδήποτε αλλαγές στην κατανομή του χιονιού στις στέγες λόγω διαφυγής θερμότητας από το κτίριο, μέσω κάποιου τμήματος της στέγης ή εργασίες απομάκρυνσης χιονιού, εάν οι μορφές αυτής της φόρτισης είναι κρίσιμες.

Το Μέρος 1-3 του EN 1991 (Ευρωκώδικας 1) παρέχει οδηγίες για τα φορτία λόγω χιονόπτωσης, η οποία λαμβάνει χώρα υπό συνθήκες νηνεμίας ή με ταυτόχρονη ύπαρξη ανέμων. Τα φορτία αυτά αναφέρονται σε κτίρια ή σε έργα πολιτικού μηχανικού γενικά, για υψόμετρα κάτω των 1500 m. Για περιοχές με ιδιαίτερες κλιματικές συνθήκες (υψηλές ταχύτητες ανέμου και λιώσιμο του χιονιού), μπορεί να εφαρμοσθεί το Παράρτημα Β του Μέρους 1-3, στο οποίο δίνονται ειδικές μορφές συγκέντρωσης χιονιού, καθώς και οι αντίστοιχοι συντελεστές μορφής.

Το φορτίο χιονιού σε μια στέγη προσδιορίζεται από τις σχέσεις:

Για καταστάσεις διαρκείας ή παροδικές:

$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k$$

Για τυχηματικές καταστάσεις:

$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_{Ad}$$

όπου

μ_i ο συντελεστής μορφής φορτίου χιονιού

s_k η χαρακτηριστική τιμή του φορτίου χιονιού επί του εδάφους

C_e ο συντελεστής έκθεσης, ο οποίος για κανονικές συνθήκες λαμβάνεται ίσος με 1. Συνιστώμενες τιμές για άλλες συνθήκες είναι:

- Για έκθεση σε ισχυρούς ανέμους $C_e = 0{,}8$
- Για κατασκευές προστατευμένες (από κτίρια ή δέντρα) $C_e = 1{,}2$

C_t ο θερμικός συντελεστής, ο οποίος είναι συνήθως ίσος με 1 για κανονικές συνθήκες θερμικής μόνωσης της στέγης. Μπορεί να επιτρέπονται μικρότερες τιμές, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επιρροή της απώλειας θερμότητας μέσω της στέγης.

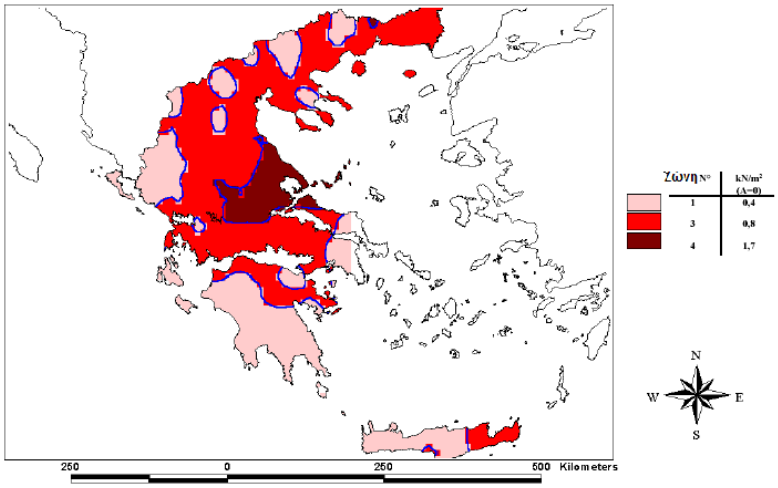
$s_{Ad} = C_{esl} \cdot s_k$ είναι η τιμή σχεδιασμού του φορτίου χιονιού επί του εδάφους (συντελεστής για εξαιρετικά φορτία χιονιού: $C_{esl} = 2{,}0$).

Το φορτίο s θεωρείται ότι ενεργεί κατακόρυφα και αναφέρεται στην οριζόντια προβολή της στέγης.

Για τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, οι τιμές του s_k για περίοδο επαναφοράς 50 ετών δίνονται στο Παράρτημα C του EN 1991 - Μέρος 1-3.

Για την Ελλάδα, σύμφωνα με το Εθνικό Προσάρτημα, ορίζονται οι παρακάτω τρεις ζώνες χιονιού, με τις αντίστοιχες χαρακτηριστικές τιμές $s_{k,0}$ των φορτίων για έδαφος που βρίσκεται στη στάθμη της θάλασσας:

1. Ζώνη I ($s_{k,0} = 0{,}4$ kN/m2): Νομοί Αρκαδίας, Ηλείας, Λακωνίας, Μεσσηνίας και όλα τα νησιά πλην των Σποράδων και της Εύβοιας.
2. Ζώνη II ($s_{k,0} = 1{,}7$ kN/m2): Νομοί Μαγνησίας, Φθιώτιδας, Καρδίτσας, Τρικάλων, Λάρισας, Σποράδες και Εύβοια.
3. Ζώνη III ($s_{k,0} = 0{,}8$ kN/m2): Υπόλοιπη χώρα.



Σχήμα 5.4 Ζώνες χιονιού και χαρακτηριστικές τιμές

Για τοποθεσίες με υψόμετρο μεγαλύτερο από 1500 m πρέπει να γίνεται ειδική μελέτη και αξιολόγηση. Περισσότερες πληροφορίες για ειδικές περιπτώσεις περιέχονται στο Εθνικό Προσάρτημα.

Η χαρακτηριστική τιμή s_k του φορτίου χιονιού επί του εδάφους σε kN/m² συναρτήσει της ζώνης και του αντίστοιχου υψομέτρου (A), για μια συγκεκριμένη τοποθεσία, δίνεται από τη σχέση:

$$s_k = s_{k,0}\left[1 + \left(\frac{A}{917}\right)^2\right]$$

όπου

$s_{k,0}$ είναι η χαρακτηριστική τιμή του φορτίου χιονιού στη στάθμη της θάλασσας (δηλ. για $A = 0$), σε kN/m²

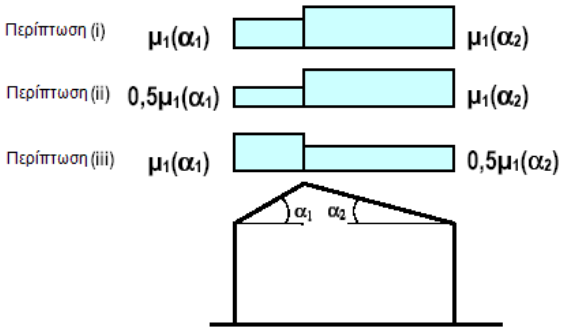
A είναι το υψόμετρο της συγκεκριμένης τοποθεσίας από τη στάθμη της θάλασσας, σε m

Για τον προσδιορισμό των αντίστοιχων συντελεστών μορφής λαμβάνονται υπόψη τρεις μορφές κατανομής φορτίου:

- Η πρώτη μορφή προκύπτει από μια ομοιόμορφη κατανομή του χιονιού πάνω σε ολόκληρη τη στέγη, εάν το χιόνι πέφτει με μικρή πνοή ανέμου.
- Η δεύτερη και τρίτη μορφή προκύπτει από μια αρχική ασύμμετρη κατανομή, ή από τοπική συγκέντρωση σε εμπόδια, ή από ανακατανομή του χιονιού που επηρεάζει την κατανομή του φορτίου στο σύνολο της στέγης (π.χ. χιόνι που μεταφέρεται από την προσήνεμη προς την υπήνεμη πλευρά της στέγης).

Στο Σχήμα 5.5 φαίνονται οι προβλεπόμενες διατάξεις για το συντελεστή μορφής φορτίου σε δικλινείς στέγες. Για το σχεδιασμό, θα λαμβάνεται υπόψη η εκάστοτε πλέον δυσμενής από αυτές.

Εάν προβλέπεται στο χαμηλότερο άκρο της στέγης κάποιο κιγκλίδωμα ή στηθαίο ή άλλο εμπόδιο, ο συντελεστής μορφής δεν θα μειώνεται κάτω του 0,8.



Σχήμα 5.5 Συντελεστής σχήματος φορτίου χιονιού-στέγη πολλών ανοιγμάτων

Πίνακας 5.1 Συντελεστές μορφής φορτίου χιονιού

Κλίση στέγης α	$0° < \alpha < 30°$	$30° < \alpha < 60°$	$\alpha > 60°$
μ_1	0,8	$0{,}8\cdot(60-\alpha)/30$	0,0
μ_2	$0{,}8+0{,}8\cdot\alpha/30$	1,6	-

Υπολογισμός φορτίου χιονιού

Το κλειστό κολυμβητήριο που μελετάται βρίσκεται στην περιοχή Χανίων Κρήτης (Ζώνη Ι) σε υψόμετρο A=100m πάνω από τη θάλασσα.

$$s_{k,0} = 0{,}4 \text{ kN/m2} \qquad A = 100 \text{ m}$$

Άρα

$$s_k = s_{k,0}[1 + (A/917)^2] = 0{,}4[1 + (100/917)^2] = 0{,}405 \text{ KN/m}^2$$

Οι συντελεστές μορφής χιονιού για γωνία κλίσης της στέγης α=12° < 30° είναι: μ_1=0,8

Έτσι έχω : $s_1 = 0{,}8 \cdot 1{,}0 \cdot 1{,}0 \cdot 0{,}405 = 0{,}33 \text{ KN/m}^2$

5.4.3 Φορτία Ανέμου

5.4.3.1 Βασικά Μεγέθη

Το EN 1991-1-4 παρέχει κανόνες και μεθόδους υπολογισμού των δράσεων λόγω ανέμου σε κτίρια και έργα πολιτικού μηχανικού και στα επιμέρους στοιχεία και προσαρτήματα τους για ύψη μέχρι 200 m.

Οι δράσεις λόγω ανέμου στις κατασκευές από αλουμίνιο και χάλυβα, παίζουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο και αποτελούν σε πολλές περιπτώσεις τη βασική φόρτιση, ανεξάρτητα από τον τύπο τους (μονώροφα, πολυώροφα κλπ.). Το μέγεθος των δράσεων αυτών μεταβάλλεται ανάλογα με την τοποθεσία, το ύψος της κατασκευής, το είδος του περιβάλλοντος χώρου κλπ.

Οι δυνάμεις λόγω ανέμου είναι χρονικά μεταβαλλόμενες και μπορεί να προκαλέσουν ταλαντώσεις. Για πολλές όμως κατασκευές (π.χ. σε δύσκαμπτες) η δυναμική αυτή επίδραση είναι μικρή, οπότε τα φορτία του ανέμου μπορεί να θεωρούνται ως στατικά. Σε εύκαμπτες κατασκευές οι δυναμικές επιρροές μπορεί να είναι σημαντικές, οπότε πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η δυναμική τους συμπεριφορά.

Η πλέον σημαντική παράμετρος για τον προσδιορισμό των δράσεων ανέμου είναι η ταχύτητα του ανέμου. Η βάση σχεδιασμού είναι η μέγιστη ταχύτητα (ριπή) που προβλέπεται για τη διάρκεια ζωής σχεδιασμού της κατασκευής.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν το μέγεθος της ταχύτητας και της ασκούμενης πίεσης, είναι:

- *Η γεωγραφική θέση*
- *Η φυσική θέση*
- *Η τοπογραφία*
- *Οι διαστάσεις των κτιρίων*
- *Το σχήμα της κατασκευής*
- *Η κλίση της στέγης*
- *Η διεύθυνση του ανέμου*

Δεδομένα:

- Συνολικό Μήκος: 78,0m
- Συνολικό Πλάτος: 50,65m
- Ύψος: 15,00m

Βασική Ταχύτητα Ανέμου

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0}$$

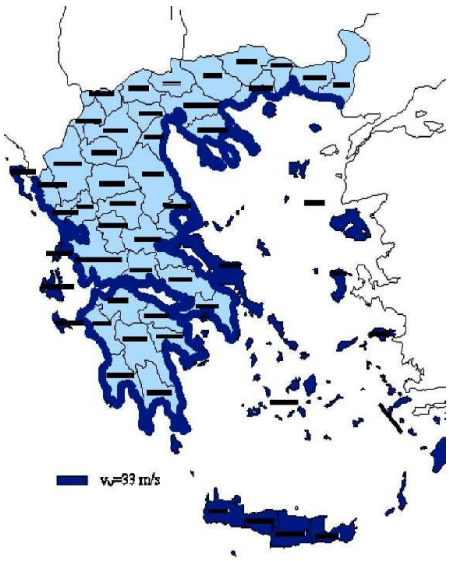
όπου

c_{dir} ο συντελεστής διεύθυνσης (=1,0)

c_{season} ο συντελεστής εποχής (=1,0)

$v_{b,0}$ η θεμελιώδης τιμή της βασικής ταχύτητας ανέμου

Σύμφωνα με το Εθνικό Προσάρτημα, η θεμελιώδης τιμή της βασικής ταχύτητας του ανέμου $v_{b,0}$ για την Ελλάδα ορίζεται 33 m/s για τα νησιά και παράλια μέχρι 10 km από την ακτή και 27 m/s για την υπόλοιπη χώρα.



Σχήμα 5.6 Βασικές ταχύτητες ανέμου στην Ελλάδα

Άρα $v_{b,0} = 33$ m/s
Άρα τελικά $v_b = 1{,}0 \cdot 1{,}0 \cdot 33$ => $v_b = 33$ m/s

Βασική Πίεση

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b{}^2$$

όπου

ρ είναι η πυκνότητα του αέρα, που εξαρτάται από το υψόμετρο, τη θερμοκρασία και τη βαρομετρική πίεση που αναμένονται σε μια περιοχή κατά τη διάρκεια ανεμοθύελλας ($\rho = 1{,}25$ kg/m³)

Άρα $q_b = 0{,}5 \cdot 1{,}25 \cdot 33^2$ => $q_b = 680{,}63$ N/m²

Πίεση Ταχύτητας Αιχμής

Η πίεση ταχύτητας αιχμής $q_p(z)$ σε ύψος z, η οποία περιλαμβάνει μέσες και μικρής διάρκειας διακυμάνσεις ταχύτητας, προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left(v_m(z)\right)^2 = c_e(z) \cdot q_b$$

Υπολογισμός του $v_m(z)$

Η μέση ταχύτητα του ανέμου $v_{\mathrm{m}}(z)$, σε ύψος z πάνω από το έδαφος, εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους και την τοπογραφική διαμόρφωση και προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$v_{\mathrm{m}}(z) = c_{\mathrm{r}}(z) \cdot c_{\mathrm{o}}(z) \cdot v_{\mathrm{b}}$$

όπου

$c_{\mathrm{r}}(z)$ είναι ο συντελεστής τραχύτητας

$c_{\mathrm{o}}(z)$ είναι ο συντελεστής τοπογραφικής διαμόρφωσης (=1,0)

v_{b} είναι η βασική ταχύτητα ανέμου = 33 m/s

Στον Πίνακα 5.2 φαίνονται οι κατηγορίες εδάφους και οι αντίστοιχες παράμετροι.

Πίνακας 5.2 Κατηγορίες εδάφους και αντίστοιχες παράμετροι

Κατηγορία εδάφους	*Zo* (m)	*Zmin* (m)
0 Θάλασσα ή παράκτια περιοχή ανοικτής θάλασσας	0,003	1
I Λίμνες ή επίπεδες και οριζόντιες περιοχές με αμελητέα βλάστηση και χωρίς εμπόδια	0,01	1
II Περιοχή με χαμηλή βλάστηση όπως χορτάρι και μεμονωμένα εμπόδια (δέντρα, κτίρια) σε απόσταση μεταξύ τους τουλάχιστον 20 φορές το ύψος των εμποδίων	0.05	2
III Περιοχή με κανονική κάλυψη βλάστησης ή με κτίρια ή με μεμονωμένα εμπόδια με μέγιστη απόσταση το πολύ 20 φορές το ύψος των εμποδίων (όπως χωριά, προάστια, μόνιμα δάση)	0.3	5
IV Περιοχή όπου τουλάχιστον το 15% της επιφάνειας καλύπτεται με κτίρια και το μέσο ύψος τους ξεπερνά τα 15m	1,0	10

Το κτίριο βρίσκεται σε περιοχή με χαμηλή βλάστηση και αραιά εμπόδια (κτίρια, δέντρα κλπ) γι' αυτό κατατάσσεται στην κατηγορία εδάφους II (Ευρωκώδικας 1, Πίνακας 4.1). Έτσι έχω z_o = 0,05 m και z_{min} = 2,0 m .

$$c_{\mathrm{r}}(z) = k_{\mathrm{r}} \cdot ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{για } z_{\min} \le z \le z_{\max}$$

$$c_{\mathrm{r}}(z) = c_{\mathrm{r}} \cdot z_{\min} \quad \text{για } z < z_{\min}$$

Όπου k_{r} είναι ο συντελεστής εδάφους που δίνεται από τη σχέση:

$$k_{\mathrm{r}} = 0{,}19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,\mathrm{II}}}\right)^{0{,}07}$$

όπου

- $z_{0,\mathrm{II}}$ = 0,05 m (κατηγορία εδάφους II, Πίνακας 4.1)
- $z_{\min}$ είναι το ελάχιστο ύψος που ορίζεται στον Πίνακα 4.1
- $z_{\max}$ = 200m, όπως ορίζεται στο Εθνικό Προσάρτημα
- z_0, $z_{\min}$ εξαρτώνται από την κατηγορία εδάφους. Προτεινόμενες τιμές δίνονται στον Πίνακα 5.2 για πέντε αντιπροσωπευτικές κατηγορίες εδάφους.

Έτσι έχω:

$$k_r = 0{,}19 \cdot \left(\frac{0{,}05}{0{,}05}\right)^{0{,}07} \Rightarrow k_r = 0{,}19$$

$$c_r(z) = 0{,}19 \cdot ln\left(\frac{15}{0{,}05}\right) \quad \Rightarrow c_r(z) = 1{,}08$$

Άρα τελικά :

$$v_m(z) = 1{,}08 \cdot 1{,}0 \cdot 33 \quad \Rightarrow v_m(z) = 35{,}64 \text{ m/s}$$

Υπολογισμός της έντασης στροβιλισμού Iv(z):

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_I}{c_o(z) \cdot ln(z/z_0)} \quad \text{για } z_{min} \le z \le z_{max}$$

$$I_v(z) = I_v(z_{min}) \quad \text{για } z < z_{min}$$

όπου

k_I είναι ο συντελεστής στροβιλισμού. Η τιμή του k_I που θα χρησιμοποιηθεί σε μια χώρα μπορεί να δίνεται στο Εθνικό Προσάρτημα. Η προτεινόμενη τιμή του $k_I = 1{,}0$

$c_o(z)$ είναι ο συντελεστής ανάγλυφου του εδάφους.

z_0 είναι το μήκος τραχύτητας,

Για $z_{min} \le z \le z_{max}$ έχω:

$I_v(z) = k_I/[c_o(z) \cdot ln(z/z_0)] = 1{,}0/[1{,}0 \cdot \ln(14{,}8/0{,}05)] \Rightarrow _I_v(z) = 0{,}17$

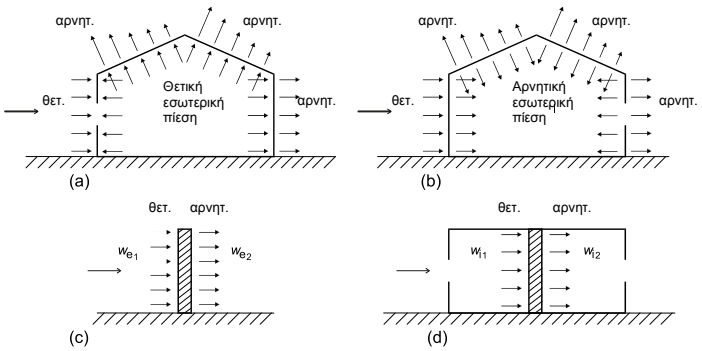
Και τελικά η πίεση ταχύτητας αιχμής είναι:

$q_p(z) = [\ 1 + 7 \cdot 0{,}175\ ] \cdot 0{,}5 \cdot 1{,}25 \cdot 35{,}64 \Rightarrow q_p(z) = 1{,}77$ KN/m²

5.4.3.2 *Πιέσεις Ανέμου στο κτίριο*

Θα προσδιοριστούν οι τελικές πιέσεις στη στέγη αλλά όχι στα κατακόρυφα στοιχεία του βιομηχανικού κτιρίου από τη δράση του ανέμου.

Η τελική πίεση του ανέμου επί ενός τοίχου ή ενός επιμέρους στοιχείου είναι η διαφορά των πιέσεων επί των επιφανειών του τοίχου ή του στοιχείου, λαμβάνοντας υπόψη τη φορά των πιέσεων αυτών. Η πίεση, που κατευθύνεται προς την επιφάνεια λαμβάνεται θετική, ενώ η αναρρόφηση, το διάνυσμα της οποίας απομακρύνεται από την επιφάνεια, λαμβάνεται ως αρνητική. Μερικά παραδείγματα σήμανσης φαίνονται στο Σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.7 Σήμανση πιέσεων επί των επιφανειών

Α. Θύρες Κλειστές (υπολογισμός εξωτερικών πιέσεων)

Η πίεση του ανέμου η οποία δρα κάθετα στις εξωτερικές επιφάνειες μιας κατασκευής προκύπτει από τη σχέση:

$$W_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe}$$

όπου

$q_p(z_e)$ είναι η πίεση ταχύτητας αιχμής

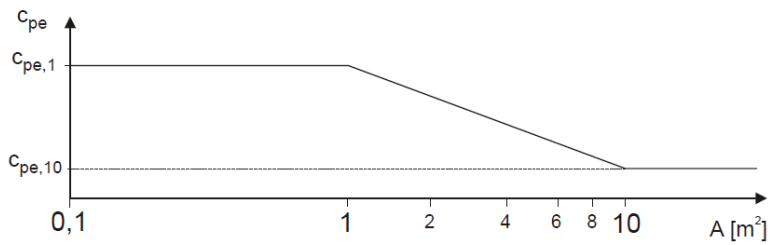
z_e είναι το ύψος αναφοράς για την εξωτερική πίεση

c_{pe} είναι ο συντελεστής εξωτερικής πίεσης

Οι συντελεστές εξωτερικής πίεσης c_{pe} εξαρτώνται από τις διαστάσεις της φορτιζόμενης επιφάνειας A, δίνονται δε στους πίνακες που ακολουθούν, για δύο χαρακτηριστικές τιμές της, ήτοι για 1 m^2 και για 10 m^2.

Ως φορτιζόμενη, θεωρείται η επιφάνεια, η οποία μεταφέρει στο εξεταζόμενο στοιχείο της κατασκευής τη δράση της ανεμοπίεσης και προκαλεί την αντίστοιχη καταπόνησή του.

Στο Σχήμα 5.8 φαίνεται η γραφική απεικόνιση της μεταβολής της πίεσης c_{pe} συναρτήσει της φορτιζόμενης επιφάνειας.



Σχήμα 5.8 Μεταβολή πίεσης συναρτήσει της φορτιζόμενης επιφάνειας

Όπως προκύπτει από το σχήμα για εμβαδόν φορτιζόμενης επιφάνειας $A > 10$ m² έχω $c_{pe} = c_{pe,10}$ και για όλες τις φορτιζόμενες επιφάνειες του κτιρίου.

Ο Ευρωκώδικας 1 διαχωρίζει τις φορτιζόμενες επιφάνειες (και αντίστοιχα τους συντελεστές εξωτερικής πίεσης) σε :

i. Κατακόρυφοι τοίχοι κτιρίων με ορθογωνική κάτοψη
ii. Οριζόντιες στέγες
iii. Μονόκλινες στέγες
iv. Δικλινείς στέγες
v. Τετράκλινες στέγες
vi. Επαναλαμβανόμενες στέγες
vii. Κυλινδρικές στέγες και θόλοι

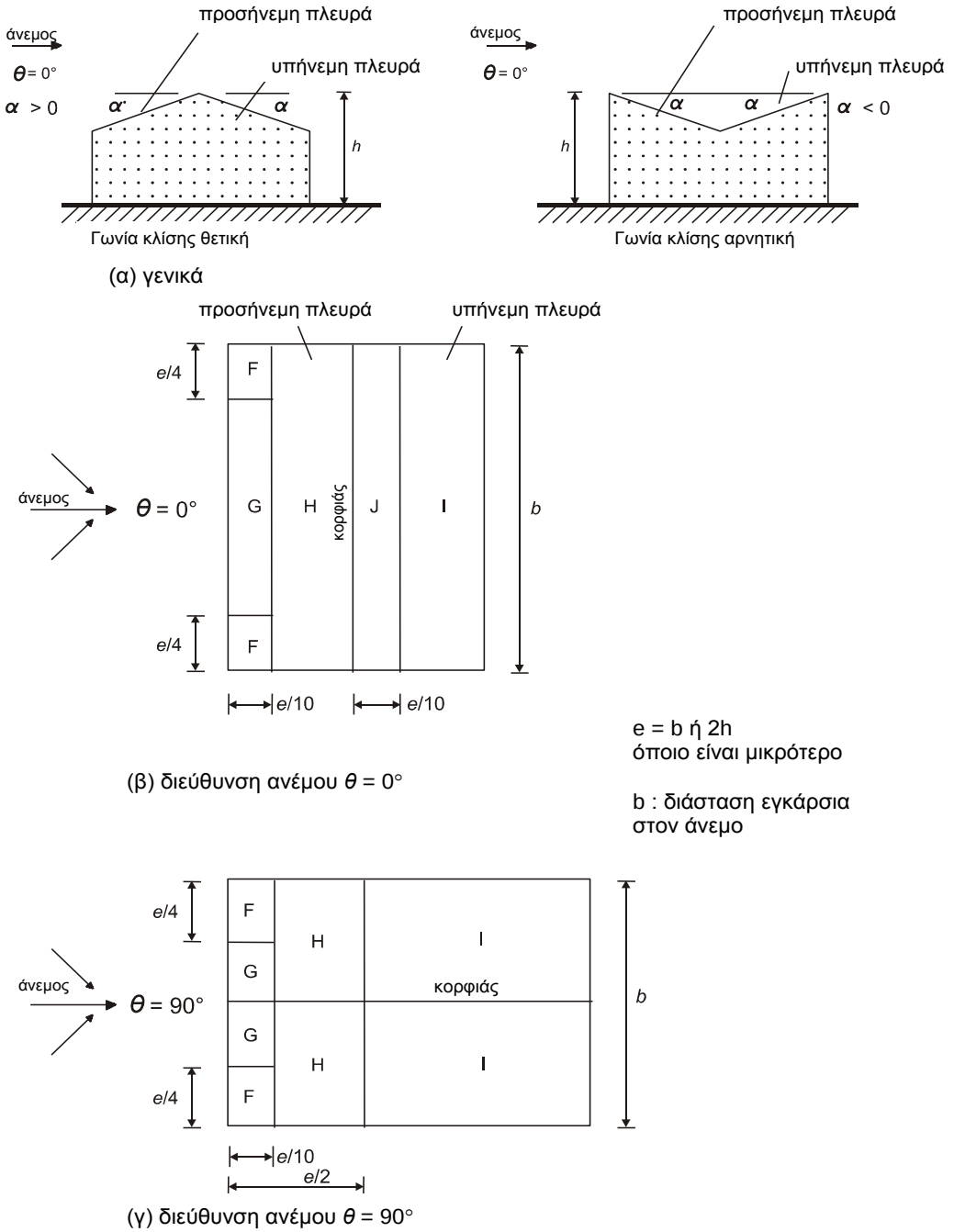
Α.1. Πίεση ανέμου επί κατακόρυφων στοιχείων

Λόγω της μορφής του μεταλλικού στεγάστρου και της θέσης του στο φορέα και αφού μελετάμε μόνο το ζύγωμα δεν έχουμε πιέσεις ανέμου σε κατακόρυφα στοιχεία που να μεταφέρουν δυνάμεις σε αυτό.

Α.2 Πίεση ανέμου επί της στέγης του κτιρίου

Η στέγη του κολυμβητηρίου θεωρείται δικλινής. Οι συντελεστές εξωτερικής πίεσης για διευθύνσεις ανέμου 0°, 90°, 180° για το άνοιγμα της στέγης θα εξάγονται από το συντελεστή πίεσης για αυτό. Η στέγη είναι δικλινής, άρα θα πάμε στους αντίστοιχους πίνακες που αφορούν δικλινή στέγη.

- Η στέγη, συμπεριλαμβανομένων και των προεξεχόντων τμημάτων, θα διαιρείται σε ζώνες όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.9.
- Το ύψος αναφοράς z_e θα λαμβάνεται ίσο με h.
- Οι συντελεστές πίεσης για κάθε ζώνη, που πρέπει να χρησιμοποιηθούν, δίνονται στον Πίνακα 5.3.



Σχήμα 5.9 Συμβολισμοί για δικλινείς στέγες

Α.2.1 Διεύθυνση ανέμου θ=0°

Πίνακας 5.3 Συντελεστές εξωτερικής πίεσης για δικλινείς στέγες και θ=0°

Γωνία κλίσης *α*	Ζώνη για διεύθυνση ανέμου Θ = 0°									
	F		G		H		I		J	
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
-45°	-0,6		-0,6		-0,8		-0,7		-1,0	-1,5
-30°	-1,1	-2,0	-0,8	-1,5	-0,8		-0,6		-0,8	-1,4
-15°	-2,5	-2,8	-1,3	-2,0	-0,9	-1,2	-0,5		-0,7	-1,2
-5°	-2,3	-2,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,2	+0,2		+0,2	
							-0,6		-0,6	
5°	-1,7	-2,5	-1,2	-2,0	-0,6	-1,2	-0,6		+0,2	
	+0,0		+0,0		+0,0				-0,6	
15°	-0,9	-2,0	-0,8	-1,5	-0,3		-0,4		-1,0	-1,5
	+0,2		+0,2		+0,2		+0,0		+0,0	+0,0
30°	-0,5	-1,5	-0,5	-1,5	-0,2		-0,4		-0,5	
	+0,7		+0,7		+0,4		+0,0		+0,0	
45°	-0,0		-0,0		-0,0		-0,2		-0,3	
	+0,7		+0,7		+0,6		+0,0		+0,0	
60°	+0,7		+0,7		+0,7		-0,2		-0,3	
75°	+0,8		+0,8		+0,8		-0,2		-0,3	

ΣΗΜΕΙΩΣΗ 1 Για θ = 0° η πίεση μεταβάλλεται γρήγορα από θετικές σε αρνητικές τιμές στην προσήνεμη πλευρά γύρω από γωνία κλίσης α = -5° έως +45°, έτσι δίνονται τόσο οι θετικές όσο και οι αρνητικές τιμές. Για τις στέγες αυτές, τέσσερις περιπτώσεις θα πρέπει να θεωρούνται όπου οι μεγαλύτερες ή οι μικρότερες τιμές όλων των επιφανειών F, G και H συνδυάζονται με τις μεγαλύτερες ή τις μικρότερες τιμές των επιφανειών I και J. Δεν επιτρέπεται ανάμιξη θετικών και αρνητικών τιμών στην ίδια πλευρά.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ 2 Γραμμική παρεμβολή για ενδιάμεσες γωνίες κλίσης του ίδιου πρόσημου μπορεί να χρησιμοποιείται μεταξύ τιμών του ίδιου πρόσημου. (Όχι παρεμβολή μεταξύ α = +5° και α = -5°, αλλά χρήση των δεδομένων για επίπεδες στέγες στην 7.2.3). Οι τιμές ίσες με 0,0 δίνονται για σκοπούς παρεμβολής

Η διάσταση *b* είναι πάντα εγκάρσια στον άνεμο και η διάσταση *d* είναι παράλληλη στον άνεμο.

b = 78m

d = 50,65 m

Το μήκος *e* που αναφέρεται στο σχήμα 5.7 είναι :

e = min {*b* , 2*h*} = min { 78.00 , 2*15.00 } = min { 78.00 , 30.00 } => *e* = 30,0m

- *e*/4 = 30,0 / 4 = 7,5m
- *e*/10 = 30,0 / 10 = 3,0m

Από τον Πίνακα 5.3 και για γωνία κλίσης της στέγης α = 12° έχω τους ακόλουθους συντελεστές εξωτερικής πίεσης, από τους οποίους προκύπτουν οι ανεμοπιέσεις στις αντίστοιχες επιφάνειες με γραμμική παρεμβολή:

- F: $c_{pe,10}$ = -1,14 => $w = q_p(z_e) \cdot c_{pe,10}$ = 1,77 KN/m²*(-1,14) = -2,02KN/m²
- G: $c_{pe,10}$ = -0,92 => *w* = 1,77 KN/m²*(-0,92) = -1,63 KN/m²
- H: $c_{pe,10}$ = -0,39 => *w* = 1,77 KN/m²*(-0,39) = -0,69 KN/m²

- I: $c_{pe,10}$ = -0,46 => w = 1,77 KN/m²*(-0,46) = -0,81 KN/m²
- J: $c_{pe,10}$ = -0,64 => w = 1,77 KN/m²*(-0,64) = -1,13 KN/m²

Α.2.2 Διεύθυνση ανέμου θ=90°

Πίνακας 5.4 Συντελεστές εξωτερικής πίεσης για δικλινείς στέγες και θ=90°

Γωνία κλίσης α	Ζώνη για διεύθυνση ανέμου Θ = 90°							
	F		G		H		I	
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
-45°	-1,4	-2,0	-1,2	-2,0	-1,0	-1,3	-0,9	-1,2
-30°	-1,5	-2,1	-1,2	-2,0	-1,0	-1,3	-0,9	-1,2
-15°	-1,9	-2,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,2	-0,8	-1,2
-5°	-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	-0,6	-1,2
5°	-1,6	-2,2	-1,3	-2,0	-0,7	-1,2	-0,6	
15°	-1,3	-2,0	-1,3	-2,0	-0,6	-1,2	-0,5	
30°	-1,1	-1,5	-1,4	-2,0	-0,8	-1,2	-0,5	
45°	-1,1	-1,5	-1,4	-2,0	-0,9	-1,2	-0,5	
60°	-1,1	-1,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,0	-0,5	
75°	-1,1	-1,5	-1,2	-2,0	-0,8	-1,0	-0,5	

Η διάσταση b είναι πάντα εγκάρσια στον άνεμο και η διάσταση d είναι παράλληλη στον άνεμο.

b = 50,65 m

d = 78,00 m

Το μήκος e που αναφέρεται στο Σχήμα 5.9 είναι :

e = min {b , 2h} = min { 50,65 ; 2*15,00 } = min { 50,65 ; 30,00 } => e = 30,0 m

- e/4 = 30 / 4 = 7,5m
- e/10 = 30 / 10 = 3,0m
- e/2 = 30 / 2 = 15,0m

Από τον Πίνακα 5.4 και για γωνία κλίσης της στέγης α = 12,0° έχω τους ακόλουθους συντελεστές εξωτερικής πίεσης, από τους οποίους προκύπτουν οι ανεμοπιέσεις στις αντίστοιχες επιφάνειες με γραμμική παρεμβολή:

- F : $c_{pe,10}$ = -1,39 => $w = q_p(z_e) \cdot c_{pe,10}$ = 1,77 KN/m²*(-1,39) = -2,46KN/m²
- G: $c_{pe,10}$ = -1,3 => w = 1,77 KN/m²*(-1,30) = -2,3 KN/m²
- H: $c_{pe,10}$ = -0,63 => w = 1,77 KN/m²*(-0,63) = -1,12 KN/m²
- I : $c_{pe,10}$ = -0,53 => w = 1,77 KN/m²*(-0,53) = -0,94 KN/m²

Β. Θύρες Ανοικτές (υπολογισμός εσωτερικών πιέσεων)

Η εσωτερική πίεση δρα ταυτόχρονα με την εξωτερική πίεση και πρέπει στους υπολογισμούς να λαμβάνεται υπόψη μαζί με αυτήν, για κάθε συνδυασμό δυνατών ανοιγμάτων.

Ο συντελεστής εσωτερικής πίεσης c_{pi} εξαρτάται από το μέγεθος και την κατανομή των ανοιγμάτων στη συνολική επιφάνεια του κτιρίου. Όπου ένα εξωτερικό άνοιγμα,

όπως μια πόρτα ή ένα παράθυρο, θα ήταν καθοριστικό εάν ήταν ανοιχτό, αλλά θεωρείται κλειστό στην οριακή κατάσταση αστοχίας, κατά τη διάρκεια ανεμοθύελλας, η κατάσταση με την πόρτα ή το παράθυρο ανοιχτό θα πρέπει να θεωρείται ως τυχηματική.

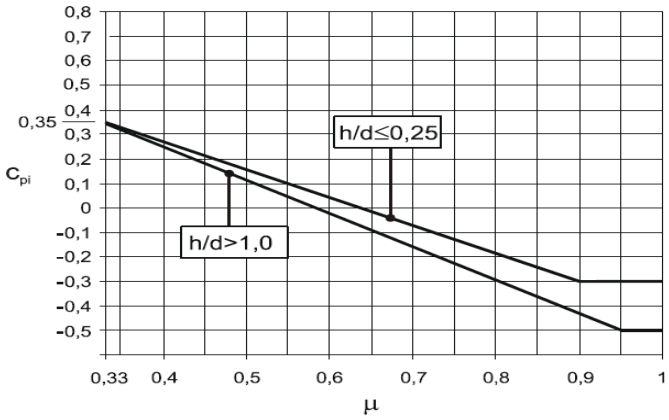
Η πλευρά ενός κτιρίου πρέπει να θεωρείται καθοριστική όταν η επιφάνεια των ανοιγμάτων της είναι τουλάχιστον διπλάσια της επιφάνειας των ανοιγμάτων και σημείων διαρροής στις υπόλοιπες πλευρές του θεωρούμενου κτιρίου.

Σε κτίριο με μια καθοριστική πλευρά, η εσωτερική πίεση θα λαμβάνεται ως ένα κλάσμα της εξωτερικής πίεσης στα ανοίγματα της καθοριστικής πλευράς.

Για κτίρια χωρίς καθοριστική πλευρά, ο συντελεστής εσωτερικής πίεσης c_{pi} θα προσδιορίζεται από το Σχήμα 5.10 και είναι συνάρτηση του λόγου του ύψους προς το βάθος του κτιρίου h/d και του λόγου ανοιγμάτων μ για κάθε διεύθυνση του ανέμου θ, που θα προσδιορίζεται από τη σχέση:

$\mu = (\sum \text{επιφάνεια ανοιγμάτων όπου το } c_{pe} \text{ είναι αρνητικό ή μηδέν})/$
$(\sum \text{επιφάνεια όλων των ανοιγμάτων})$

Αυτό εφαρμόζεται σε πλευρές και στέγες κτιρίων με ή χωρίς εσωτερικά διαχωριστικά.



Σχήμα 5.10 Συντελεστές εσωτερικής πίεσης για ομοιόμορφα κατανεμημένα ανοίγματα

Το υπό μελέτη κολυμβητήριο λόγω της χρήσης του πρακτικά θεωρείται ότι έχει αμελητέα ανοίγματα σε σχέση με τη συνολική του επιφάνεια. Έστω ότι έχει 4 θύρες διαστάσεων 5,5m × 4,5m . Επειδή δε θεωρείται επαρκής η εκτίμηση του μ, το c_{pi} λαμβάνεται ως το πλέον δυσμενές από τα +0,2 και -0,3.

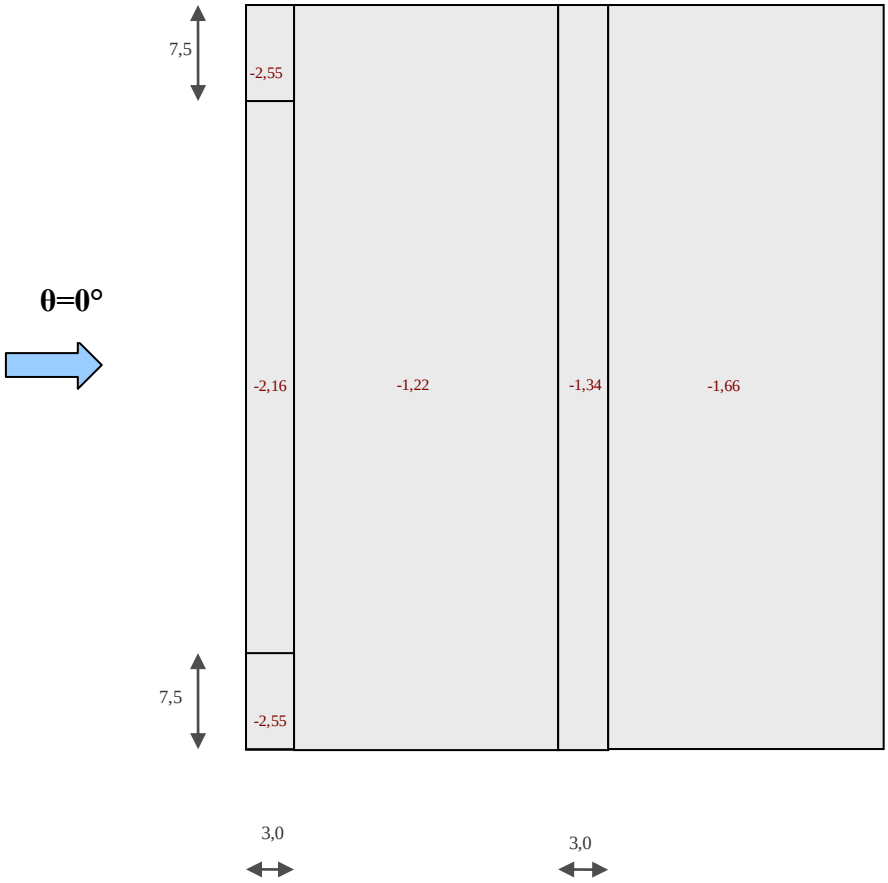
Άρα έχουμε:

- c_{pi} = -0,3 , $w_i = q_p(z_e) \cdot c_{pi}$ = 1,77 * (-0.3) = -0,53 KN/m²
- c_{pi} = +0,2 , $w_i = q_p(z_e) \cdot c_{pi}$ = 1,77 * (+0,2) = +0,36 KN/m²

Γ. Τελικές πιέσεις ανέμου

Για όλες τις περιπτώσεις εξετάσαμε γωνία ανέμου θ=0° και θ=90°. Από όλες τις περιπτώσεις επιλέγουμε τις δυσμενέστερες φορτίσεις για κάθε επιφάνεια χωριστά και με αυτές φορτίζουμε το κτίριο.

Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι συνολικές πιέσεις επί της στέγης του κτιρίου.

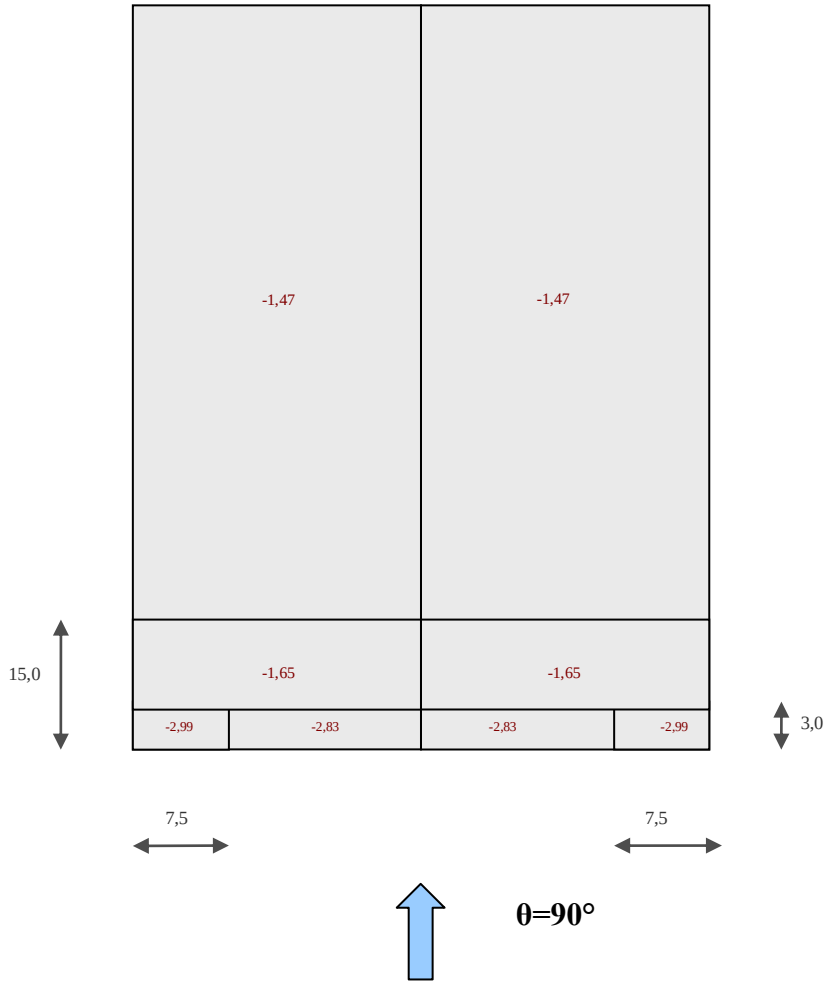


Σχήμα 5.11 Πιέσεις ανέμου στέγης για διεύθυνση ανέμου θ=0°

5.4.4 Θερμοκρασιακή Μεταβολή

Μία κατασκευή υποβάλλεται στη διάρκεια της ζωής της σε θερμοκρασιακές μεταβολές. Οι μεταβολές αυτές είναι μεγαλύτερες για κατασκευές στην ύπαιθρο (πχ. γέφυρες) από άλλες των οποίων τα φέροντα στοιχεία προστατεύονται έναντι θερμοκρασιακών επιρροών από μη φέροντα στοιχεία (πχ κτίρια). Επειδή οι θερμοκρασιακές μεταβολές έχουν μικρή διάρκεια, τα εντατικά μεγέθη λόγω των επιρροών τους δεν υπόκεινται σε ερπυσμό και συνεπώς τα αδρανειακά στοιχεία της διατομής υπολογίζονται για βραχυχρόνια φόρτιση.

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1, Μέρος 1.5, οι δράσεις λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών είναι έμμεσες και κατατάσσονται στις μεταβλητές, ελεύθερες δράσεις και πρέπει να προσδιορίζονται για κάθε κατάσταση σχεδιασμού που προβλέπεται από τον Ευρωκώδικα 1. Για ομοιόμορφη μεταβολή θερμοκρασίας, που οφείλεται στην ολική μεταβολή θερμοκρασίας περιβάλλοντος (πχ. χειμώνας - καλοκαίρι) υπολογίζονται οι χαρακτηριστικές τιμές μέγιστης διακύμανσης της αρνητικής και της θετικής ενεργού θερμοκρασίας. Η διαφορά θερμοκρασίας (ομοιόμορφη αύξηση ή μείωση της θερμοκρασίας ολόκληρου του σκελετού σε σχέση με τη θερμοκρασία συναρμολόγησής του) λήφθηκε στην περίπτωσή μας ίση με 20° C.



Σχήμα 5.12 Πιέσεις ανέμου στέγης για διεύθυνση ανέμου θ=90°

5.5 Συνδυασμοί Δράσεων

5.5.1 Οριακές Καταστάσεις σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1

Ανάλογα με το είδος, τη μορφή και τη θέση της κατασκευής, προσδιορίζονται οι διάφορες χαρακτηριστικές τιμές των δράσεων, οι οποίες επενεργούν επ' αυτής. Οι δράσεις αυτές, πολλαπλασιασμένες με κατάλληλους συντελεστές (επιμέρους συντελεστές ασφαλείας γ), συνδυάζονται μεταξύ τους καταλλήλως (συντελεστές συνδυασμού ψ) για κάθε μία από τις δύο οριακές καταστάσεις και στη συνέχεια εφαρμόζονται επί του φορέα. Είναι προφανές ότι οι δράσεις που υπεισέρχονται στους συνδυασμούς, επενεργούν και εκδηλώνονται ταυτόχρονα.

Οριακές καταστάσεις είναι οι καταστάσεις πέραν των οποίων ο φορέας ή τμήμα αυτού δεν ικανοποιεί πλέον τα κριτήρια σχεδιασμού του. Διακρίνονται στις παρακάτω δύο κατηγορίες:

- Οριακές καταστάσεις Αστοχίας
- Οριακές καταστάσεις Λειτουργικότητας

Οι προβλεπόμενες από τον Ευρωκώδικα 1 τιμές των συντελεστών ασφαλείας των δράσεων συνοψίζονται στον Πίνακα 5.5.

Πίνακας 5.5 Επιμέρους συντελεστές ασφαλείας των δράσεων

	Οριακές καταστάσεις αστοχίας		Οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας	
	Δυσμενής επίδραση	Ευμενής επίδραση	Δυσμενής επίδραση	Ευμενής επίδραση
γG	1,35	1,0	1,0	1,0
γQ	1,5	0	1,0	0

Η πιθανότητα χρονικής σύμπτωσης των μέγιστων τιμών διάφορων ανεξάρτητων δράσεων είναι μικρή. Για το λόγο αυτό κατά την εξέταση των συνδυασμών των μεταβλητών δράσεων εισάγονται συντελεστές συνδυασμού ψ. Οι συντελεστές αυτοί εκφράζουν το ποσοστό της χαρακτηριστικής τιμής μιας δράσης, το οποίο, για την εξεταζόμενη κατάσταση, έχει μεγάλη πιθανότητα χρονικής ταύτισης με άλλες δράσεις.

Οι συντελεστές ψ για τα κτίρια, όπως προτείνονται από τον Ευρωκώδικα δίνονται στον Πίνακα 5.6.

Πίνακας 5.6 Προτεινόμενες τιμές των συντελεστών ψ για κτίρια

	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Επιβαλλόμενα φορτία σε κτίρια, κατηγορία (βλέπε EN 1991-1-1)			
Κατηγορία A: κατοικίες, συνήθη κτίρια κατοικιών	0,7	0,5	0,3
Κατηγορία B: χώροι γραφείων	0,7	0,5	0,3
Κατηγορία C: χώροι συνάθροισης	0,7	0,7	0,6
Κατηγορία D: χώροι καταστημάτων	0,7	0,7	0,6
Κατηγορία E: χώροι αποθήκευσης	1,0	0,9	0,8
Κατηγορία F: χώροι κυκλοφορίας οχημάτων βάρος οχημάτων ≤ 30kN	0,7	0,7	0,6
Κατηγορία G: χώροι κυκλοφορίας οχημάτων 30kN < βάρος οχημάτων ≤ 160kN	0,7	0,5	0,3
Κατηγορία H: στέγες	0	0	0
Φορτία χιονιού επάνω σε κτίρια (βλέπε EN 1991-1-3)*			
Φιλανδία, Ισλανδία, Νορβηγία, Σουηδία	0,70	0,50	0,20
Υπόλοιπα Κράτη Μέλη του CEN για τοποθεσίες που βρίσκονται σε υψόμετρο H > 1000 m	0,70	0,50	0,20
Υπόλοιπα Κράτη Μέλη του CEN για τοποθεσίες που βρίσκονται σε υψόμετρο H ≤ 1000 m	0,50	0,20	0
Φορτία ανέμου σε κτίρια (βλέπε EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Θερμοκρασία (μη-πυρκαϊάς) σε κτίρια (βλέπε EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Οι τιμές ψ μπορούν να καθορισθούν από το Εθνικό Προσάρτημα.			
* Για χώρες οι οποίες δεν αναφέρονται παρακάτω, βλέπε συναφείς τοπικές συνθήκες.			

Το υπό μελέτη μεταλλικό κτίριο ανήκει στην Κατηγορία C : Χώροι συνάθροισης. Οι συντελεστές ψ για φορτία που θα χρησιμοποιηθούν φαίνονται στον Πίνακα 5.7.

Πίνακας 5.7 Συντελεστές ψ που θα χρησιμοποιηθούν

	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Ωφέλιμα	*0,7*	*0,7*	*0,6*
Χιόνι	*0,5*	*0,2*	*0*
Άνεμος	*0,6*	*0,2*	*0*
Θερμοκρασία	*0,6*	*0,5*	*0*

5.5.1.1 Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (Ultimate Limit State)

Οι καταστάσεις αυτές συνδέονται με κατάρρευση ή με ισοδύναμες μορφές αστοχίας του φορέα ή τμήματός του (πλαστικές αντοχές, απώλεια ευστάθειας, θραύση, κόπωση, ανατροπή κ.τ.λ.). Οι συνδυασμοί σχεδιασμού για τον έλεγχο στην οριακή κατάσταση αστοχίας είναι οι ακόλουθοι:

α) Για καταστάσεις διάρκειας ή παροδικές:

$$\Sigma\gamma_{G,j}G_{k,j}"+"\gamma_P P"+"\gamma_{Q,1}Q_{k,1}"+"\Sigma\gamma_{Q,i}\psi_{0,i}Q_{k,i}$$

β)Για τυχηματικές καταστάσεις:

$$\Sigma G_{k,j}"+"P"+"A_d"+"(\psi_{1,1}\acute{\eta}\psi_{2,1})Q_{k,1}"+"\Sigma\psi_{2,i}Q_{k,i}$$

γ)Για καταστάσεις σεισμού:

$$\Sigma G_{k,j}"+"P"+"A_{ED}"+"\Sigma\psi_{2,i}Q_{k,i}$$

5.5.1.2 Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (Serviceability Limit State)

Οι καταστάσεις αυτές συνδέονται με συνθήκες πέραν των οποίων δεν πληρούνται πλέον οι καθορισμένες λειτουργικές απαιτήσεις για το φορέα ή για μέλος αυτού (μετατοπίσεις, ταλαντώσεις, ρηγματώσεις κ.τ.λ.). Ο συνδυασμός σχεδιασμού για τον έλεγχο στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας που χρησιμοποιείται είναι ο χαρακτηριστικός συνδυασμός:

$$E_d = E\{G_{k,j}; P; Q_{k,1}; \psi_{0,i}Q_{k,i}\}j \geq 1; i > 1$$

5.5.2 Συνδυασμοί δράσεων κτιρίου

Τα φορτία που εισέρχονται στους συνδυασμούς δράσεων και οι συμβολισμοί τους στο πρόγραμμα SAP2000 είναι τα ακόλουθα:

1) Ίδιο βάρος φέροντος οργανισμού (χάλυβας, αλουμίνιο). Υπολογίζεται αυτόματα από το πρόγραμμα: DEAD

2) Πρόσθετο μόνιμο φορτίο : SDEAD

3) Κινητό φορτίο στέγης: LIVEST

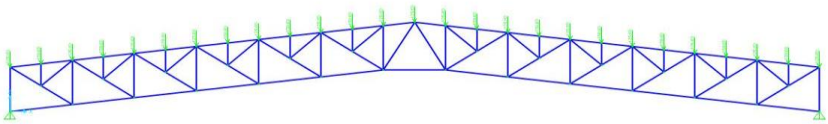
4) Φορτίο χιονιού: SNOW

5) Φορτίο ανέμου κατά διεύθυνση X: WINDX

6) Φορτίο ανέμου κατά διεύθυνση Y: WINDY

7) Θερμοκρασιακή μεταβολή: TEMP

Στο μοντέλο του SAP2000 για τη στέγη του κολυμβητηρίου όλα τα φορτία πέρα του ιδίου βάρους χάλυβα και αλουμινίου αντίστοιχα θεωρώ ότι μεταφέρονται μέσω των τεγίδων στο στέγαστρο, δηλαδή ανά απόσταση 192,5 cm, με ζώνη επιρροής 6m για κάθε ζύγωμα. Για τα φορτία ανέμου λόγω του ότι δεν είναι ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια της στέγης θα μελετηθεί το ζύγωμα με τη δυσμενέστερη φόρτιση ανά κατεύθυνση.



Εικόνα 5.1 Φορτίσεις ζυγώματος

Συνδυασμοί στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας:

- *Για διεύθυνση ανέμου θ=0°*

Α) Δυσμενής συνδυασμός με φορτία προς τα κάτω:
Θεωρώντας κύρια μεταβλητή το LIVEST:
1,35DEAD+1,35SDEAD+1,5LIVEST+1,5*0,6*TEMP
Θεωρώντας κύρια μεταβλητή το SNOW:
1,35DEAD+1,35SDEAD+1,5SNOW +1,5*0,6*TEMP
Θεωρώντας κύρια μεταβλητή το TEMP:
1,35DEAM+1,35SDEAD+1,5TEMP+1,5*0,5*SNOW

Β) Δυσμενής συνδυασμός με φορτία προς τα πάνω:
Θεωρώντας κύρια μεταβλητή το WINDY:
1,0DEAD+1,0SDEAD+1,5WINDY+1,5*0,6*TEMP

- *Για διεύθυνση ανέμου θ=90°*

Α) Δυσμενής συνδυασμός με φορτία προς τα κάτω:
Θεωρώντας κύρια μεταβλητή το LIVEST:
1,35DEAD+1,35SDEAD+1,5LIVEST+1,5*0,6*TEMP

Θεωρώντας κύρια μεταβλητή το SNOW:

1,35DEAD+1,35SDEAD+1,5SNOW +1,5**0,6*TEMP

Θεωρώντας κύρια μεταβλητή το TEMP:

1,35DEAM+1,35SDEAD+1,5TEMP+1,5**0,5*SNOW

Β) Δυσμενής συνδυασμός με φορτία προς τα πάνω:

Θεωρώντας κύρια μεταβλητή το WINDX:

1,0DEAD+1,0SDEAD+1,5WINDX+1,5**0,6*TEMP

Οι παραπάνω συνδυασμοί θα επαναληφθούν και με αρνητική θερμοκρασία.

Σε καμία από τις παραπάνω περιπτώσεις το κινητό φορτίο της στέγης (LIVEST) δεν επαλληλίζεται με το χιόνι.

Συνδυασμοί στην Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας:

- *Για διεύθυνση ανέμου θ=0°*

Α) Δυσμενής συνδυασμός με φορτία προς τα κάτω:

Θεωρώντας κύρια μεταβλητή το LIVEST:

1,0DEAD+1,0SDEAD+1,0LIVEST+*0,6*TEMP

Θεωρώντας κύρια μεταβλητή το SNOW:

1,0DEAD+1,0SDEAD+1,0SNOW +*0,6*TEMP

Θεωρώντας κύρια μεταβλητή το TEMP:

1,0DEAM+1,0SDEAD+1,0TEMP+*0,5*SNOW

Β) Δυσμενής συνδυασμός με φορτία προς τα πάνω:

Θεωρώντας κύρια μεταβλητή το WINDY:

1,0DEAD+1,0SDEAD+1,0WINDY+*0,6*TEMP

- *Για διεύθυνση ανέμου θ=90°*

Α) Δυσμενής συνδυασμός με φορτία προς τα κάτω:

Θεωρώντας κύρια μεταβλητή το LIVEST:

1,0DEAD+1,0SDEAD+1,0LIVEST+*0,6*TEMP

Θεωρώντας κύρια μεταβλητή το SNOW:

1,0DEAD+1,0SDEAD+1,0SNOW +**0,6*TEMP

Θεωρώντας κύρια μεταβλητή το TEMP:

1,0DEAM+1,0SDEAD+1,0TEMP+*0,5*SNOW

Β) Δυσμενής συνδυασμός με φορτία προς τα πάνω:

Θεωρώντας κύρια μεταβλητή το WINDX:

1,0DEAD+1,0SDEAD+1,0WINDX+*0,6*TEMP

Οι παραπάνω συνδυασμοί θα επαναληφθούν και με αρνητική θερμοκρασία.

Σε καμία από τις παραπάνω περιπτώσεις το κινητό φορτίο της στέγης (LIVEST) δεν επαλληλίζεται με το χιόνι.

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω θεωρήθηκαν οι ακόλουθοι συνδυασμοί φορτίσεων:

Πίνακας 5.8 Συνδυασμοί Δράσεων

Συνδυασμοί	DEAD	SDEAD	LIVEST	SNOW	TEMP	WINDX	WINDY
ULS1	1,35	1,35	1,5		0,9		
ULS2	1,35	1,35		1,5	0,9		
ULS3	1,35	1,35		0,75	1,5		
ULS4	1,0	1,0			0,9		1,5
ULS5	1,0	1,0			0,9	1,5	
ULS6	1,35	1,35	1,5		-0,9		
ULS7	1,35	1,35		1,5	-0,9		
ULS8	1,35	1,35		0,75	-1,5		
ULS9	1,0	1,0			-0,9		1,5
ULS10	1,0	1,0			-0,9	1,5	
SLS1	1,0	1,0	1,0		0,6		
SLS2	1,0	1,0		1,0	0,6		
SLS3	1,0	1,0		0,5	1,0		
SLS4	1,0	1,0			0,6		1,0
SLS5	1,0	1,0			0,6	1,0	
SLS6	1,0	1,0	1,0		-0,6		
SLS7	1,0	1,0		1,0	-0,6		
SLS8	1,0	1,0		0,5	-1,0		
SLS9	1,0	1,0			-0,6		1,0
SLS10	1,0	1,0			-0,6	1,0	

6 Προσομοίωμα στο SAP2000

6.1 Παρουσίαση SAP2000

Για την ανάλυση του φορέα χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα SAP2000 version 15, που εδώ και 30 χρόνια είναι διεθνώς αναγνωρισμένο ως το πλέον εξελιγμένο διαθέσιμο λογισμικό στην τεχνολογία της τρισδιάστατης ανάλυσης-διαστασιολόγησης δομικών στοιχείων. Διαθέτει ένα εύκολο στη χρήση γραφικό περιβάλλον, προσφέροντας συγχρόνως τις πιο εξελιγμένες υπολογιστικές τεχνικές με πανίσχυρες δυνατότητες δημιουργίας προσομοιωμάτων. Παρακάτω γίνεται αναφορά σε κάποια βασικά πλεονεκτήματα που προσφέρει το συγκεκριμένο εργαλείο ανάλυσης:

- Το SAP2000 δίνει τη δυνατότητα ταχύτατης παραγωγής προσομοιωμάτων με τη χρήση προτύπων (templates). Η δημιουργία και η τροποποίηση των προσωμοιωμάτων, η εκτέλεση της ανάλυσης, η ανάγνωση των αποτελεσμάτων, και η βελτιστοποίηση της διαστασιολόγησης είναι όλα αλληλένδετα στο ίδιο περιβάλλον χρήσης.
- Επιπλέον, ως προς τις δυνατότητες στατικών φορτίσεων, επιτρέπει την εφαρμογή φορτίων βαρύτητας, πίεσης (ομοιόμορφα κατανεμημένων φορτίων), θερμοκρασιακών φορτίων και φορτίων από προένταση, ενώ επιπλέον μπορούμε να έχουμε επικόμβιες φορτίσεις με προκαθορισμένες δυνάμεις ή μετακινήσεις στους κόμβους. Οι δυναμικές φορτίσεις μπορεί να είναι της μορφής φασματικής απόκρισης πολλαπλής βάσεως ή πολλαπλά χρονικά μεταβαλλόμενων φορτίων και διεγέρσεις βάσης. Το πρόγραμμα υποστηρίζει ανάλυση με ιδιομορφές και ανάλυση Ritz, καθώς και συνδυασμό ιδιομορφών με τις μεθόδους SRSS, CQC ή GMC. Επιπλέον, είναι διαθέσιμα μεταβαλλόμενα φορτία οχημάτων για μεμονωμένα οχήματα, λωρίδες φόρτισης και φορτία συρμών.
- Το πρόγραμμα είναι εφοδιασμένο με όλους τους Διεθνείς κανονισμούς, συμπεριλαμβανομένων των Ευρωκωδίκων και των Αμερικανικών κανονισμών. Έτσι, παρέχει ολοκληρωμένη δυνατότητα διαστασιολόγησης που συμπεριλαμβάνει επιλογές διαστασιολόγησης και βελτιστοποίησης χαλύβδινων διατομών με AISC-ASD, LRFD και EC3, διαστασιολόγηση μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα με Αμερικάνικους κανονισμούς και EC2, καθώς και διαστασιολόγηση επιφανειακών στοιχείων.
- Σε περίπτωση μη γραμμικής πλαστικής ανάλυσης, η στατική pushover ανάλυση εκτελείται με έναν απλό και πρακτικό τρόπο. Μη γραμμικές αρθρώσεις (πλαστικές αρθρώσεις) μπορούν να οριστούν σε οποιαδήποτε θέση των ραβδωτών στοιχείων, ενώ οι ιδιότητές τους μπορούν να οριστούν από τον χρήστη ή να υπολογιστούν αυτόματα από το πρόγραμμα. Οι αναλύσεις μπορεί να ελέγχονται είτε από τις εξωτερικές δυνάμεις είτε από τις παραμορφώσεις και τα αποτελέσματα είναι διαθέσιμα σε γραφική μορφή ή πίνακες. Το ίδιο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για στατική, δυναμική και μη γραμμική ανάλυση με χρονική ολοκλήρωση (Time History Analysis). Τα αποτελέσματα της μη γραμμικής pushover ανάλυσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια από τους επεξεργαστές διαστασιολόγησης του προγράμματος. Τα αποτελέσματα της pushover ανάλυσης απεικονίζονται και είναι διαθέσιμα βήμα - βήμα τόσο σε γραφική μορφή όσο και σε μορφή κειμένου. Οι φασματικές καμπύλες αντοχών

με τις εξαιρετικές ιδιότητες αλληλεπίδρασης που διαθέτουν, επιτρέπουν τη μελέτη των επιπτώσεων στην κατασκευή με άμεση αλλαγή των παραμέτρων.

• Πιο συγκεκριμένα, μερικά πλεονεκτήματα που προσφέρει το SAP2000 για τη διευκόλυνση του χρήστη αναφέρονται παρακάτω:

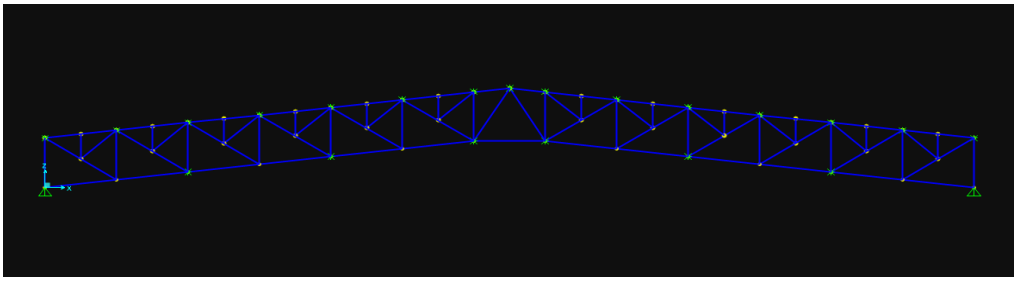
- Σχεδιαστικά εργαλεία AutoCad όπως εργαλεία καθετότητας, έλξης κλπ. για γρήγορη και εύκολη δημιουργία μοντέλων .
- Καρτεσιανό και κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων. Τα μοντέλα μπορούν να έχουν πολλαπλά συστήματα συντεταγμένων τα οποία μπορούν να περιστραφούν προς οποιαδήποτε κατεύθυνση.
- Στο πρόγραμμα είναι διαθέσιμες χαλύβδινες διατομές οποιασδήποτε μορφής όπως διπλού ταυ, κοίλες τετραγωνικές, κοίλες κυκλικές, γωνιακά ψυχρής ή θερμής έλασης καθώς και βιβλιοθήκες πρότυπων διατομών σύμφωνες με τους Ευρωκώδικες, το AISC και άλλους Διεθνείς κανονισμούς.
- Δυνατότητα γραφικού σχεδιασμού από τον χρήστη διατομών οποιοδήποτε σχήματος και ορισμού του υλικού κατασκευής (section designer).
- Δυνατότητα εξαγωγής των αποτελεσμάτων της ανάλυσης στο πρόγραμμα Excel για περαιτέρω επεξεργασία καθώς και αρχείων DXF για τη γεωμετρία του φορέα.
- Τα μέλη του προσομοιώματος στο πρόγραμμα μπορεί να είναι ευθύγραμμα ή καμπύλα.
- Πολλαπλά παράθυρα απεικόνισης του φορέα (3D, xz, xy, yz) για καλύτερη εποπτεία του φορέα.

• Αναλυτικές πληροφορίες για τα μέλη του προσομοιώματος με ένα δεξί κλικ και πλήρης έλεγχος επάρκειας διατομών σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς κλπ.

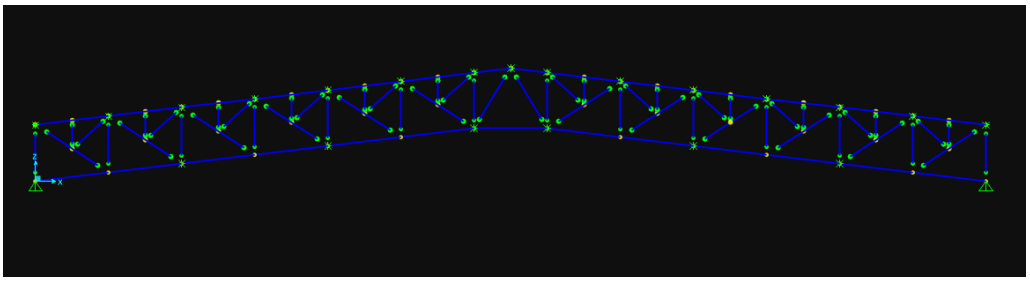
6.2 Μοντέλο προσομοίωσης

Όσον αφορά το μοντέλο με το οποίο προσομοιώθηκε ο πραγματικός φορέας, έγινε προσπάθεια να απεικονίζει όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά και με μεγάλη ακρίβεια τον πραγματικό φορέα. Αρχικά μορφώθηκε το στατικό σύστημα του δικτυωτού ζυγώματος με ένα δισδιάστατο μοντέλο. Στις στηρίξεις του ζυγώματος τοποθετήθηκαν αρθρώσεις όπως επίσης δεσμεύτηκαν στην εγκάρσια διεύθυνση κάποιοι κόμβοι (στα άνω και κάτω πέλματα ανά δεύτερο κόμβο, δηλαδή ανά οριζόντια απόσταση 3,85 m και 7,77 m για το άνω και κάτω πέλμα αντίστοιχα) προσομοιάζοντας την εγκάρσια δέσμευση λόγω των οριζόντιων συνδέσμων δυσκαμψίας. Επιπλέον τοποθετήθηκαν αρθρώσεις στα μέλη του δικτυώματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.2.

Μετά το γεωμετρικό ορισμό του φορέα, σε κάθε μέλος του προσομοιώματος αποδόθηκε η διατομή και το υλικό κατασκευής. Η βασική γεωμετρία του φορέα απεικονίζεται μέσω των κεντροβαρικών αξόνων των μελών και αμελείται η αλληλεπικάλυψη του πραγματικού πλάτους των μελών. Για τις διατομές τόσο του χάλυβα όσο και του αλουμινίου χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη πρότυπων διατομών χάλυβα του προγράμματος σύμφωνα με τα ευρωπαϊκά πρότυπα, καθώς οι διατομές του αλουμινίου θεωρούνται διελασμένες οπότε κάθε είδους διατομή είναι δυνατή και επιπλέον με τον τρόπο αυτό γίνεται μία καλύτερη σύγκριση των δύο κατασκευών.

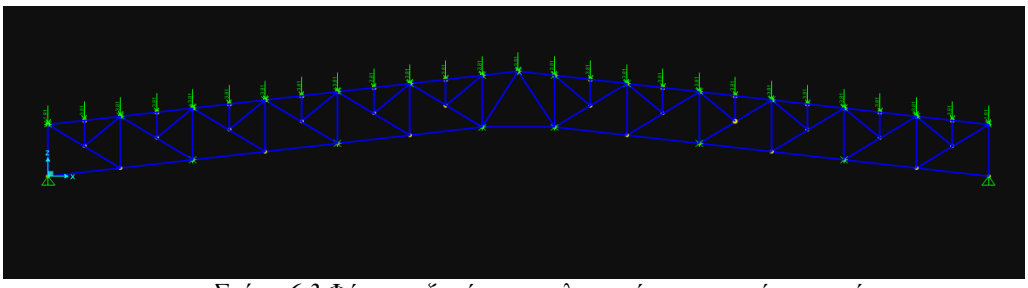


Σχήμα 6.1 Μοντέλο ζυγώματος



Σχήμα 6.2 Μοντέλο ζυγώματος όπου φαίνονται οι απελευθερώσεις των μελών

Τα φορτία που λήφθηκαν υπόψη είναι το ίδιο βάρος του φορέα, το οποίο υπολογίζεται απευθείας από το πρόγραμμα, φόρτιση λόγω θερμοκρασιακής μεταβολής καθώς επίσης το ίδιο βάρος επικάλυψης, το φορτίο λόγω ηλεκτρολογικών και μηχανολογικών εγκαταστάσεων, το χιόνι και ο άνεμος τα οποία τοποθετούνται ως συγκεντρωμένα στο άνω πέλμα στις θέσεις των τεγίδων. Όλα τα φορτία έχουν υπολογιστεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Δεν θεωρήθηκε απαραίτητο να ληφθούν υπόψη σεισμικές δράσεις στα πλαίσια των στόχων αυτής της διπλωματικής εργασίας.



Σχήμα 6.3 Φόρτιση ζυγώματος αλουμινίου με φορτίο χιονιού

Αφού καθορίστηκαν οι συνδυασμοί φόρτισης στο πρόγραμμα (για συνδυασμούς βλ. Κεφάλαιο 5.5), μπορούμε μέσω του προγράμματος να προσδιορίσουμε για ποιούς από αυτούς θέλουμε να γίνει έλεγχος επάρκειας διατομών.

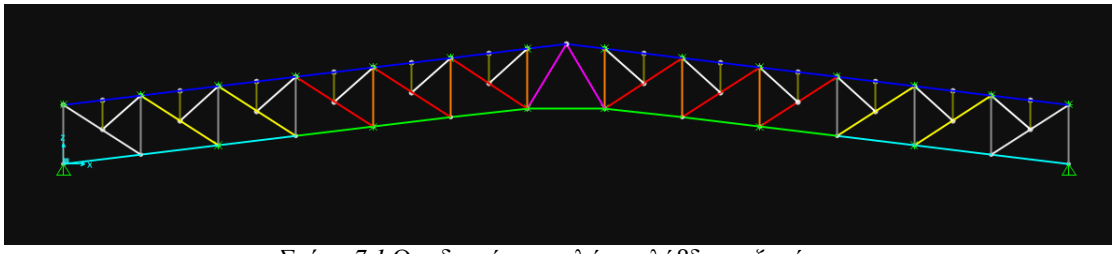
Επιπλέον, όπως αναφέρθηκε το SAP2000 δίνει τη δυνατότητα επιλογής του κανονισμού βάση του οποίου θα γίνει ο έλεγχος επάρκειας των διατομών. Στην περίπτωση της κατασκευής από χάλυβα, επιλέχθηκε ο Eurocode 3-2005. Στην περίπτωση της κατασκευής από αλουμίνιο, καθότι το πρόγραμμα δεν διαθέτει το κανονισμό Ευρωκώδικας 9, επιλέχθηκε ο κανονισμός AA-LRFD 2000 προκειμένου να γίνει μία προκαταρκτική διαστασιολόγηση και εξαγωγή των εντατικών μεγεθών των μελών και στη συνέχεια έγινε έλεγχος των μελών σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 9 χωρίς τη χρήση του προγράμματος. Σε κάθε στάδιο της διαστασιολόγησης αυτής γινόταν χρήση των εντατικών μεγεθών τα οποία εξάγονταν από το πρόγραμμα SAP2000.

7 Διαστασιολόγηση μελών ζυγώματος για χάλυβα και αλουμίνιο

7.1 Διαστασιολόγηση χαλύβδινου ζυγώματος

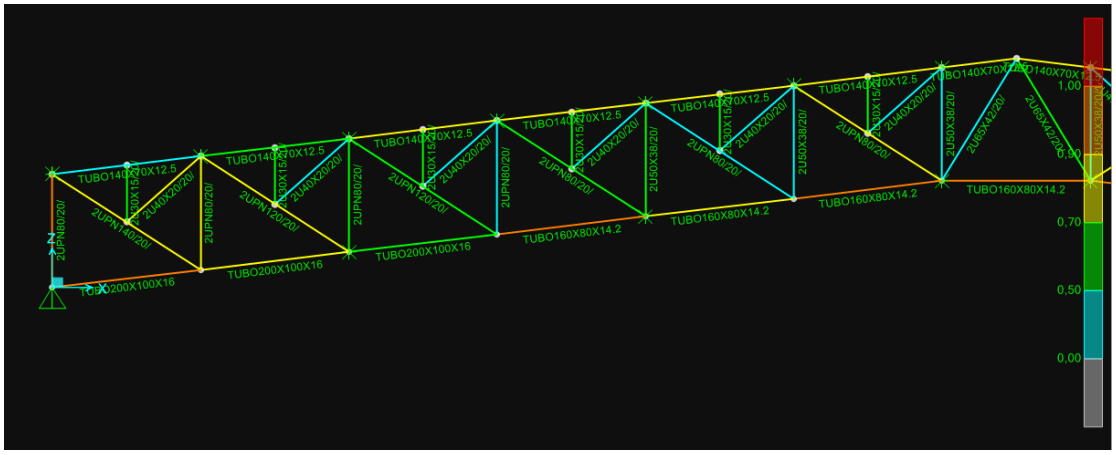
7.1.1 Γενικά

Για την ανάλυση, τα δομικά στοιχεία του ζυγώματος ομαδοποιούνται και διαστασιολογούνται με βάση αυτό που καταπονείται περισσότερο. Η ομαδοποίηση φαίνεται στο Σχήμα 7.1 και στόχο έχει τη μεγαλύτερη οικονομία. Ειδικότερα οι ομάδες (groups) είναι: 1) άνω πέλμα (μπλε), 2) κάτω πέλμα τμήμα 1 (γαλάζιο), 3) κάτω πέλμα τμήμα 2 (πράσινο), 4) κύρια κατακόρυφα τμήμα 1(γκρι), 5) κύρια κατακόρυφα τμήμα 2 (πορτοκαλί), 6) κύρια διαγώνια τμήμα 1 (άσπρο), 7) κύρια διαγώνια τμήμα 2 (κίτρινο), 8) κύρια διαγώνια τμήμα 3 (κόκκινο), 9) κύρια διαγώνια τμήμα 4 (μοβ), 10) δευτερεύοντα διαγώνια (άσπρο) και 11) δευτερεύοντα κατακόρυφα (λαδί).



Σχήμα 7.1 Ομαδοποίηση μελών χαλύβδινου ζυγώματος

Το αποτέλεσμα της διαστασιολόγησης του χαλύβδινου ζυγώματος μέσω του προγράμματος SAP2000 με βάση τον Ευρωκώδικα 3 φαίνεται στο Σχήμα 7.2.



Σχήμα 7.2 Αποτέλεσμα διαστασιολόγησης χαλύβδινου ζυγώματος (χρωματική διαβάθμιση βάσει του συντελεστή εκμετάλλευσης κάθε μέλους)

7.1.2 Άνω πέλμα

Επιλέχθηκε TUBO 140×70×12.5 στραμμένη κατά 90°. Περισσότερη ένταση παρατηρείται στο μέλος του πέμπτου φατνώματος με συντελεστή εκμετάλλευσης 0,896.

Steel Stress Check Data Eurocode 3-2005

File

```
Eurocode 3-2005 STEEL SECTION CHECK  (Summary for Combo and Station)
Units  : KN, m, C

Frame : 24        X Mid: 17,325     Combo: ULS6              Design Type: Brace
Length: 3,878     Y Mid: 0,000      Shape: TUBO140X70X12.5   Frame Type: DCH-MRF
Loc   : 0,969     Z Mid: 5,029      Class: Class 1           Rolled : Yes

Country=CEN Default                 Combination=Eq. 6.10                 Reliability=Class 2
Interaction=Method 2 (Annex B)      MultiResponse=Envelopes              P-Delta Done? No

GammaM0=1,00      GammaM1=1,00      GammaM2=1,25
An/Ag=1,00        RLLF=1,000        PLLF=0,750        D/C Lim=0,950

Aeff=0,005        eNy=0,000         eNz=0,000
A=0,005           Iyy=1,030E-05     iyy=0,047         Wel,yy=1,471E-04    Weff,yy=1,471E-04
It=7,263E-06      Izz=3,128E-06     izz=0,026         Wel,zz=8,937E-05    Weff,zz=8,937E-05
Iw=0,000          Iyz=0,000         h=0,140           Wpl,yy=1,942E-04    Av,z=0,002
E=210000000,0     fy=275000,000     fu=430000,000     Wpl,zz=1,133E-04    Av,y=0,003


STRESS CHECK FORCES & MOMENTS
    Location            Ned      Med,yy      Med,zz      Ved,z      Ved,y        Ted
    0,969           -747,846      0,000      -0,226      0,000      2,182      0,000

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO
    Governing          Total          N      MMajor      MMinor      Ratio     Status
    Equation           Ratio      Ratio       Ratio       Ratio      Limit      Check
    6.3.3(4)-6.61      0,896   =  0,837   +   0,000   +   0,059      0,950         OK

AXIAL FORCE DESIGN
                         Ned      Nc,Rd      Nt,Rd
                       Force   Capacity   Capacity
    Axial           -747,846   1271,875   1271,875

                      Npl,Rd      Nu,Rd      Ncr,T     Ncr,TF      An/Ag
                    1271,875   1431,900  202051,647   1419,795      1,000

                Curve    Alpha       Ncr   LambdaBar        Phi        Chi      Nb,Rd
    Major (y-y)     a    0,210   1419,795       0,946      1,026      0,703    893,742
    MajorB(y-y)     a    0,210   1419,795       0,946      1,026      0,703    893,742
    Minor (z-z)     a    0,210   1724,706       0,859      0,938      0,760    967,222
    MinorB(z-z)     a    0,210   1724,706       0,859      0,938      0,760    967,222
    Torsional TF    a    0,210   1419,795       0,946      1,026      0,703    893,742

MOMENT DESIGN
                         Med   Med,span      Mc,Rd      Mv,Rd      Mn,Rd      Mb,Rd
                      Moment     Moment   Capacity   Capacity   Capacity   Capacity
    Major (y-y)        0,000      0,000     53,405     53,405     29,338     52,134
    Minor (z-z)       -0,226     -2,117     31,158     31,158     14,615

                Curve AlphaLT LambdaBarLT     PhiLT      ChiLT         C1        Mcr
    LTB             d    0,760      0,230      0,538      0,976      1,000   1005,862

                         kyy        kyz        kzy        kzz
    Factors            1,625      0,868      0,975      1,446

SHEAR DESIGN
                         Ved      Vc,Rd     Stress     Status        Ted
                       Force   Capacity      Ratio      Check    Torsion
    Major (z)          0,000    489,545      0,000         OK      0,000
    Minor (y)          2,182    244,772      0,009         OK      0,000

                      Vpl,Rd        Eta  LambdabarW
    Reduction        489,545      1,200      0,115
```

Σχήμα 7.3 Ανάλυση άνω πέλματος

7.1.3 Κάτω πέλμα τμήμα 1

Επιλέχθηκε TUBO 200×100×16 στραμμένη κατά 90°. Περισσότερη ένταση παρατηρείται στο μέλος του πρώτου φατνώματος με συντελεστή εκμετάλλευσης 0,957.

Steel Stress Check Data Eurocode 3-2005

File

```
Eurocode 3-2005 STEEL SECTION CHECK  (Summary for Combo and Station)
Units  : KN, m, C

Frame : 15        X Mid: 1,925      Combo: ULS1              Design Type: Brace
Length: 3,878     Y Mid: 0,000      Shape: TUBO200X100X16    Frame Type: DCH-MRF
Loc   : 0,000     Z Mid: 0,231      Class: Class 1           Rolled : Yes

Country=CEN Default                 Combination=Eq. 6.10                 Reliability=Class 2
Interaction=Method 2 (Annex B)      MultiResponse=Envelopes              P-Delta Done? No

GammaM0=1,00      GammaM1=1,00      GammaM2=1,25
An/Ag=1,00        RLLF=1,000        PLLF=0,750        D/C Lim=0,950

Aeff=0,009        eNy=0,000         eNz=0,000
A=0,009           Iyy=3,980E-05     iyy=0,068         Wel,yy=3,980E-04    Weff,yy=3,980E-04
It=2,852E-05      Izz=1,226E-05     izz=0,038         Wel,zz=2,452E-04    Weff,zz=2,452E-04
Iw=0,000          Iyz=0,000         h=0,200           Wpl,yy=5,202E-04    Av,z=0,003
E=210000000,0     Fy=275000,000     Fu=430000,000     Wpl,zz=3,058E-04    Av,y=0,006

DESIGN MESSAGES
    Error: Section overstressed

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS
    Location            Ned       Med,yy       Med,zz       Ved,z       Ved,y         Ted
    0,000          -1036,840       0,000        0,000       0,000       1,306       0,000

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO
    Governing          Total          N       MMajor       MMinor       Ratio      Status
    Equation           Ratio      Ratio        Ratio        Ratio       Limit       Check
    6.3.3(4)-6.61      0,957   =  0,947   +    0,000   +    0,010       0,950  Overstress

AXIAL FORCE DESIGN
                         Ned       Nc,Rd        Nt,Rd
                       Force    Capacity     Capacity
    Axial          -1036,840    2358,400     2358,400

                     Npl,Rd       Nu,Rd       Ncr,T      Ncr,TF       An/Ag
                   2358,400    2655,130  379468,802    1371,549       1,000

                Curve   Alpha        Ncr   LambdaBar        Phi         Chi       Nb,Rd
    Major (y-y)     a   0,210    1371,549       1,311      1,476       0,464    1094,409
    MajorB(y-y)     a   0,210    1371,549       1,311      1,476       0,464    1094,409
    Minor (z-z)     a   0,210    1689,969       1,181      1,301       0,542    1278,004
    MinorB(z-z)     a   0,210    1689,969       1,181      1,301       0,542    1278,004
    Torsional TF    a   0,210    1371,549       1,311      1,476       0,464    1094,409

MOMENT DESIGN
                         Med    Med,span       Mc,Rd       Mv,Rd       Mn,Rd       Mb,Rd
                      Moment      Moment    Capacity    Capacity    Capacity    Capacity
    Major (y-y)        0,000       0,000     143,055     143,055     106,884     135,402
    Minor (z-z)        0,000       1,587      84,095      84,095      53,971

                Curve AlphaLT LambdaBarLT      PhiLT       ChiLT          C1         Mcr
    LTB             d   0,760       0,269       0,563       0,947       1,000    1973,046

                         kyy         kyz         kzy         kzz
    Factors            1,758       0,533       1,055       0,888

SHEAR DESIGN
                         Ved      Vc,Rd      Stress      Status         Ted
                       Force    Capacity       Ratio       Check     Torsion
    Major (z)          0,000     907,748       0,000          OK       0,000
    Minor (y)          1,306     453,874       0,003          OK       0,000

                     Vpl,Rd         Eta   LambdabarW
    Reduction        907,748       1,200       0,131

BRACE MAXIMUM AXIAL LOADS
                           P           P
                        Comp        Tens
    Axial          -1036,840         N/C
```

Σχήμα 7.4 Ανάλυση κάτω πέλματος τμήμα 1

7.1.4 Κάτω πέλμα τμήμα 2

Επιλέχθηκε TUBO 160×80×14.2 στραμμένη κατά 90°. Περισσότερη ένταση παρατηρείται στο μέλος του μεσαίου φατνώματος με συντελεστή εκμετάλλευσης 0,943.

Steel Stress Check Data Eurocode 3-2005

File

```
Eurocode 3-2005 STEEL SECTION CHECK  (Summary for Combo and Station)
Units  : KN, m, C

Frame : 27        X Mid: 25,025     Combo: ULS1              Design Type: Beam
Length: 3,850     Y Mid: 0,000      Shape: TUBO160X80X14.2   Frame Type: DCH-MRF
Loc   : 3,850     Z Mid: 2,772      Class: Class 1           Rolled : Yes

Country=CEN Default                 Combination=Eq. 6.10                 Reliability=Class 2
Interaction=Method 2 (Annex B)      MultiResponse=Envelopes              P-Delta Done? No

GammaM0=1,00      GammaM1=1,00      GammaM2=1,25
An/Ag=1,00        RLLF=1,000        PLLF=0,750        D/C Lim=0,950

Aeff=0,006        eNy=0,000         eNz=0,000
A=0,006           Iyy=1,751E-05     iyy=0,054         Wel,yy=2,189E-04    Weff,yy=2,189E-04
It=1,235E-05      Izz=5,320E-06     izz=0,030         Wel,zz=1,330E-04    Weff,zz=1,330E-04
Iw=0,000          Iyz=0,000         h=0,160           Wpl,yy=2,886E-04    Av,z=0,002
E=210000000,0     fy=275000,000     fu=430000,000     Wpl,zz=1,684E-04    Av,y=0,004


STRESS CHECK FORCES & MOMENTS
    Location            Ned      Med,yy      Med,zz       Ved,z       Ved,y         Ted
    3,850          -577,474       0,000       0,743       0,000      -1,202       0,000

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO
    Governing          Total          N      MMajor      MMinor       Ratio      Status
    Equation           Ratio      Ratio       Ratio       Ratio       Limit       Check
    6.3.3(4)-6.62      0,943   =  0,928   +   0,000   +   0,015       0,950          OK

AXIAL FORCE DESIGN
                         Ned      Nc,Rd       Nt,Rd
                       Force   Capacity    Capacity
    Axial           -577,474   1652,475    1652,475

                      Npl,Rd      Nu,Rd      Ncr,T     Ncr,TF       An/Ag
                    1652,475   1860,386  262548,292   743,891       1,000

                Curve   Alpha       Ncr   LambdaBar       Phi         Chi      Nb,Rd
    Major (y-y)     a   0,210  2448,408       0,822     0,903       0,783   1294,164
    MajorB(y-y)     a   0,210  2448,408       0,822     0,903       0,783   1294,164
    Minor (z-z)     a   0,210   743,891       1,490     1,746       0,377    622,161
    MinorB(z-z)     a   0,210   743,891       1,490     1,746       0,377    622,161
    Torsional TF    a   0,210   743,891       1,490     1,746       0,377    622,161

MOMENT DESIGN
                         Med   Med,span      Mc,Rd      Mv,Rd      Mn,Rd      Mb,Rd
                      Moment     Moment   Capacity   Capacity   Capacity   Capacity
    Major (y-y)        0,000      0,000     79,365     79,365     68,840     73,081
    Minor (z-z)        0,743      0,743     46,310     46,310     34,309

                Curve AlphaLT LambdaBarLT     PhiLT      ChiLT         C1        Mcr
    LTB             d   0,760       0,304     0,585      0,921      1,000    861,412

                         kyy        kyz        kzy        kzz
    Factors            1,277      0,571      0,766      0,952

SHEAR DESIGN
                         Ved      Vc,Rd     Stress     Status        Ted
                       Force   Capacity      Ratio      Check    Torsion
    Major (z)          0,000    636,038      0,000         OK      0,000
    Minor (y)          1,202    318,019      0,004         OK      0,000

                      Vpl,Rd        Eta  LambdabarW
    Reduction        636,038      1,200      0,116

CONNECTION SHEAR FORCES FOR BEAMS
                      VMajor     VMajor
                        Left      Right
    Major (V2)         0,000      0,000
```

Σχήμα 7.5 Ανάλυση κάτω πέλματος τμήμα 2

7.1.5 Κύρια κατακόρυφα τμήμα 1

Επιλέχθηκε 2UPN80/20. Περισσότερη ένταση παρατηρείται στο πρώτο κατακόρυφο μέλος με συντελεστή εκμετάλλευσης 0,956.

Steel Stress Check Data Eurocode 3-2005

File

```
Eurocode 3-2005 STEEL SECTION CHECK  (Summary for Combo and Station)
Units  : KN, m, C

Frame : 1          X Mid: 0,000      Combo: ULS6              Design Type: Column
Length: 2,950      Y Mid: 0,000      Shape: 2UPN80/20/        Frame Type: DCH-MRF
Loc   : 0,000      Z Mid: 1,475      Class: Class 1           Rolled : Yes

Country=CEN Default                  Combination=Eq. 6.10                 Reliability=Class 2
Interaction=Method 2 (Annex B)       MultiResponse=Envelopes              P-Delta Done? No

GammaM0=1,00       GammaM1=1,00      GammaM2=1,25
An/Ag=1,00         RLLF=1,000        PLLF=0,750        D/C Lim=0,950

Aeff=0,002         eNy=0,000         eNz=0,000
A=0,002            Iyy=2,117E-06     iyy=0,031         Wel,yy=5,293E-05    Weff,yy=5,293E-05
It=0,000           Izz=1,705E-06     izz=0,028         Wel,zz=3,100E-05    Weff,zz=3,100E-05
Iw=0,000           Iyz=0,000         h=0,080           Wpl,yy=6,413E-05    Av,z=0,001
E=210000000,0      fy=275000,000     fu=430000,000     Wpl,zz=5,387E-05    Av,y=9,880E-04

DESIGN MESSAGES
    Error: Section overstressed

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS
    Location            Ned       Med,yy      Med,zz      Ved,z      Ved,y        Ted
    0,000           -245,505       0,000       0,000      0,000      0,000      0,000

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO
    Governing          Total          N      MMajor      MMinor      Ratio     Status
    Equation           Ratio      Ratio       Ratio       Ratio      Limit      Check
    6.3.3(4)-6.62      0,956   =  0,956   +   0,000   +   0,000      0,950  Overstress

AXIAL FORCE DESIGN
                         Ned      Nc,Rd      Nt,Rd
                       Force   Capacity   Capacity
    Axial           -245,505    606,100    606,100

                      Npl,Rd      Nu,Rd      Ncr,T     Ncr,TF      An/Ag
                     606,100    682,358   1968,586   1968,586      1,000

                Curve   Alpha        Ncr  LambdaBar        Phi        Chi      Nb,Rd
    Major (y-y)     c   0,490    504,192      1,096      1,321      0,486    294,661
    MajorB(y-y)     c   0,490    504,192      1,096      1,321      0,486    294,661
    Minor (z-z)     c   0,490    406,069      1,222      1,497      0,424    256,705
    MinorB(z-z)     c   0,490    406,069      1,222      1,497      0,424    256,705
    Torsional TF    c   0,490   1968,586      0,555      0,741      0,812    492,031

MOMENT DESIGN
                         Med   Med,span      Mc,Rd      Mv,Rd      Mn,Rd      Mb,Rd
                      Moment     Moment   Capacity   Capacity   Capacity   Capacity
    Major (y-y)       0,000      0,000     17,636     17,636     17,636     11,478
    Minor (z-z)       0,000      0,000     14,814     14,814     14,814

                Curve AlphaLT LambdaBarLT     PhiLT      ChiLT         C1        Mcr
    LTB             d   0,760      0,688      0,922      0,651      1,000     37,232

                         kyy        kyz        kzy        kzz
    Factors            1,667      1,059      0,872      1,765

SHEAR DESIGN
                         Ved      Vc,Rd     Stress     Status        Ted
                       Force   Capacity      Ratio      Check    Torsion
    Major (z)          0,000    156,866      0,000         OK      0,000
    Minor (y)          0,000    227,996      0,000         OK      0,000

                      Vpl,Rd        Eta  LambdabarW
    Reduction        156,866      1,200      0,134
```

Σχήμα 7.6 Ανάλυση κύριων κατακόρυφων τμήμα 1

7.1.6 Κύρια κατακόρυφα τμήμα 2

Επιλέχθηκε 2U50×38/20. Περισσότερη ένταση παρατηρείται στο πέμπτο κατακόρυφο μέλος με συντελεστή εκμετάλλευσης 0,572.

Steel Stress Check Data Eurocode 3-2005

File

```
Eurocode 3-2005 STEEL SECTION CHECK  (Summary for Combo and Station)
Units  : KN, m, C

Frame : 5          X Mid: 15,400     Combo: ULS6              Design Type: Column
Length: 2,950      Y Mid: 0,000      Shape: 2U50X38/20/       Frame Type: DCH-MRF
Loc   : 0,000      Z Mid: 3,323      Class: Class 1           Rolled : Yes

Country=CEN Default                  Combination=Eq. 6.10                 Reliability=Class 2
Interaction=Method 2 (Annex B)       MultiResponse=Envelopes              P-Delta Done? No

GammaM0=1,00       GammaM1=1,00      GammaM2=1,25
An/Ag=1,00         RLLF=1,000        PLLF=0,750        D/C Lim=0,950

Aeff=0,001         eNy=0,000         eNz=0,000
A=0,001            Iyy=0,000         iyy=0,019         Wel,yy=2,118E-05     Weff,yy=2,118E-05
It=0,000           Izz=0,000         izz=0,026         Wel,zz=2,033E-05     Weff,zz=2,033E-05
Iw=0,000           Iyz=0,000         h=0,050           Wpl,yy=2,612E-05     Av,z=0,001
E=210000000,0      fy=275000,000     fu=430000,000     Wpl,zz=3,360E-05     Av,y=5,270E-04

Rot= 90 deg        Imax=0,000        Imin=0,000        imax=0,026           imin=0,019


STRESS CHECK FORCES & MOMENTS
    Location            Ned       Med,yy       Med,zz       Ved,z       Ved,y        Ted
    0,000            -54,426       0,000        0,000       0,000       0,000      0,000

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO
    Governing          Total          N       MMajor      MMinor       Ratio      Status
    Equation           Ratio      Ratio        Ratio       Ratio       Limit       Check
    6.3.3(4)-6.61      0,572   =  0,572   +    0,000   +   0,000       0,950          OK

AXIAL FORCE DESIGN
                          Ned      Nc,Rd       Nt,Rd
                        Force   Capacity    Capacity
    Axial            -54,426    391,325     391,325

                      Npl,Rd      Nu,Rd      Ncr,T     Ncr,TF      An/Ag
                     391,325     440,561   1590,879   1590,879      1,000

                Curve   Alpha        Ncr   LambdaBar        Phi        Chi      Nb,Rd
    Major (y-y)     c   0,490    126,084       1,762      2,434      0,243     95,106
    MajorB(y-y)     c   0,490    126,084       1,762      2,434      0,243     95,106
    Minor (z-z)     c   0,490    232,424       1,298      1,611      0,390    152,557
    MinorB(z-z)     c   0,490    232,424       1,298      1,611      0,390    152,557
    Torsional TF    c   0,490   1590,879       0,496      0,696      0,845    330,765

MOMENT DESIGN
                          Med   Med,span      Mc,Rd      Mv,Rd     Mn,Rd      Mb,Rd
                       Moment     Moment   Capacity   Capacity  Capacity   Capacity
    Major (y-y)         0,000      0,000      7,183      7,183     7,183      5,087
    Minor (z-z)         0,000      0,000      9,240      9,240     9,240

                Curve AlphaLT LambdaBarLT     PhiLT      ChiLT        C1        Mcr
    LTB             d   0,760      0,603      0,835      0,708     1,000     19,777

                          kyy        kyz        kzy        kzz
    Factors             1,458      0,771      0,952      1,285

SHEAR DESIGN
                          Ved      Vc,Rd     Stress     Status       Ted
                        Force   Capacity      Ratio      Check   Torsion
    Major (z)           0,000     83,672      0,000         OK     0,000
    Minor (y)           0,000    168,774      0,000         OK     0,000

                       Vpl,Rd        Eta  LambdabarW
    Reduction          83,672      1,200      0,090
```

Σχήμα 7.7 Ανάλυση κύριων κατακόρυφων τμήμα 2

7.1.7 Κύρια διαγώνια τμήμα 1

Επιλέχθηκε 2UPN140/20. Περισσότερη ένταση παρατηρείται στο πρώτο κύριο διαγώνιο μέλος με συντελεστή εκμετάλλευσης 0,873.

Steel Stress Check Data Eurocode 3-2005

File

```
Eurocode 3-2005 STEEL SECTION CHECK  (Summary for Combo and Station)
Units  : KN, m, C

Frame : 54        X Mid: 1,925      Combo: ULS4            Design Type: Brace
Length: 4,584     Y Mid: 0,000      Shape: 2UPN140/20/     Frame Type: DCH-MRF
Loc   : 2,292     Z Mid: 1,706      Class: Class 1         Rolled : Yes

Country=CEN Default                 Combination=Eq. 6.10                 Reliability=Class 2
Interaction=Method 2 (Annex B)      MultiResponse=Envelopes              P-Delta Done? No

GammaM0=1,00      GammaM1=1,00      GammaM2=1,25
An/Ag=1,00        RLLF=1,000        PLLF=0,750        D/C Lim=0,950

Aeff=0,004        eNy=0,000         eNz=0,000
A=0,004           Iyy=1,209E-05     iyy=0,054         Wel,yy=1,727E-04    Weff,yy=1,727E-04
It=0,000          Izz=4,324E-06     izz=0,033         Wel,zz=6,177E-05    Weff,zz=6,177E-05
Iw=0,000          Iyz=0,000         h=0,140           Wpl,yy=2,064E-04    Av,z=0,002
E=210000000,0     fy=275000,000     fu=430000,000     Wpl,zz=1,119E-04    Av,y=0,002


STRESS CHECK FORCES & MOMENTS
    Location            Ned      Med,yy      Med,zz      Ved,z      Ved,y        Ted
    2,292           -245,603     -3,123       0,000     -1,664      0,000      0,000

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO
    Governing          Total          N     MMajor     MMinor      Ratio     Status
    Equation           Ratio      Ratio      Ratio      Ratio      Limit      Check
    6.3.3(4)-6.62      0,873   =  0,787   +  0,086   +  0,000      0,950         OK

AXIAL FORCE DESIGN
                         Ned      Nc,Rd      Nt,Rd
                       Force   Capacity   Capacity
    Axial           -245,603   1119,800   1119,800

                      Npl,Rd      Nu,Rd      Ncr,T     Ncr,TF      An/Ag
                    1119,800    1260,691   2330,247   2330,247      1,000

                Curve   Alpha        Ncr   LambdaBar        Phi        Chi      Nb,Rd
    Major (y-y)     c   0,490   4770,069       0,485      0,687      0,852    953,631
    MajorB(y-y)     c   0,490   4770,069       0,485      0,687      0,852    953,631
    Minor (z-z)     c   0,490    426,505       1,620      2,161      0,279    311,905
    MinorB(z-z)     c   0,490    426,505       1,620      2,161      0,279    311,905
    Torsional TF    c   0,490   2330,247       0,693      0,861      0,729    816,204

MOMENT DESIGN
                         Med   Med,span      Mc,Rd      Mv,Rd      Mn,Rd      Mb,Rd
                      Moment     Moment   Capacity   Capacity   Capacity   Capacity
    Major (y-y)       -3,123     -3,123     56,760     56,760     56,760     32,024
    Minor (z-z)        0,000      0,000     30,773     30,773     30,773

                Curve AlphaLT LambdaBarLT     PhiLT      ChiLT         C1        Mcr
    LTB             d   0,760       0,826      1,078      0,564      1,316     83,282

                         kyy        kyz        kzy        kzz
    Factors            1,073      0,978      0,879      1,630

SHEAR DESIGN
                         Ved      Vc,Rd     Stress     Status        Ted
                       Force   Capacity      Ratio      Check    Torsion
    Major (z)          1,664    319,448      0,005         OK      0,000
    Minor (y)          0,000    379,781      0,000         OK      0,000

                      Vpl,Rd        Eta  LambdabarW
    Reduction        319,448      1,200      0,215
```

Σχήμα 7.8 Ανάλυση κύριων διαγωνίων τμήμα 1

7.1.8 Κύρια διαγώνια τμήμα 2

Επιλέχθηκε 2UPN120/20. Περισσότερη ένταση παρατηρείται στο δεύτερο κύριο διαγώνιο μέλος με συντελεστή εκμετάλλευσης 0,891.

Steel Stress Check Data Eurocode 3-2005

File

```
Eurocode 3-2005 STEEL SECTION CHECK  (Summary for Combo and Station)
Units  : KN, m, C

Frame : 55        X Mid: 5,775      Combo: ULS4              Design Type: Brace
Length: 4,584     Y Mid: 0,000      Shape: 2UPN120/20/       Frame Type: DCH-MRF
Loc   : 2,292     Z Mid: 2,168      Class: Class 1           Rolled : Yes

Country=CEN Default                 Combination=Eq. 6.10                 Reliability=Class 2
Interaction=Method 2 (Annex B)      MultiResponse=Envelopes              P-Delta Done? No

GammaM0=1,00      GammaM1=1,00      GammaM2=1,25
An/Ag=1,00        RLLF=1,000        PLLF=0,750        D/C Lim=0,950

Aeff=0,003        eNy=0,000         eNz=0,000
A=0,003           Iyy=7,281E-06     iyy=0,046         Wel,yy=1,214E-04    Weff,yy=1,214E-04
It=0,000          Izz=3,156E-06     izz=0,030         Wel,zz=4,855E-05    Weff,zz=4,855E-05
Iw=0,000          Iyz=0,000         h=0,120           Wpl,yy=1,463E-04    Av,z=0,002
E=210000000,0     fy=275000,000     fu=430000,000     Wpl,zz=8,824E-05    Av,y=0,002


STRESS CHECK FORCES & MOMENTS
    Location            Ned      Med,yy      Med,zz      Ved,z      Ved,y        Ted
    2,292           -188,269     -2,196       0,000     -1,210      0,000      0,000

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO
    Governing          Total          N     MMajor     MMinor      Ratio     Status
    Equation           Ratio      Ratio      Ratio      Ratio      Limit      Check
    6.3.3(4)-6.62      0,891   =  0,807   +  0,084   +  0,000      0,950         OK

AXIAL FORCE DESIGN
                         Ned      Nc,Rd      Nt,Rd
                       Force   Capacity   Capacity
    Axial           -188,269    933,900    933,900

                      Npl,Rd      Nu,Rd     Ncr,T     Ncr,TF      An/Ag
                     933,900   1051,402  2137,623   2137,623      1,000

                Curve   Alpha       Ncr  LambdaBar       Phi        Chi      Nb,Rd
    Major (y-y)     c   0,490  2872,694      0,570     0,753      0,803    749,847
    MajorB(y-y)     c   0,490  2872,694      0,570     0,753      0,803    749,847
    Minor (z-z)     c   0,490   311,297      1,732     2,375      0,250    233,423
    MinorB(z-z)     c   0,490   311,297      1,732     2,375      0,250    233,423
    Torsional TF    c   0,490  2137,623      0,661     0,831      0,749    699,198

MOMENT DESIGN
                         Med   Med,span      Mc,Rd      Mv,Rd     Mn,Rd      Mb,Rd
                      Moment     Moment   Capacity   Capacity  Capacity   Capacity
    Major (y-y)       -2,196     -2,196     40,233     40,233    40,233     22,778
    Minor (z-z)        0,000      0,000     24,266     24,266    24,266

                Curve AlphaLT LambdaBarLT     PhiLT      ChiLT        C1        Mcr
    LTB             d   0,760      0,822      1,075      0,566     1,316     59,504

                         kyy        kyz        kzy        kzz
    Factors            1,093      0,987      0,876      1,645

SHEAR DESIGN
                         Ved      Vc,Rd     Stress     Status       Ted
                       Force   Capacity      Ratio      Check   Torsion
    Major (z)          1,210    270,546      0,004         OK     0,000
    Minor (y)          0,000    312,462      0,000         OK     0,000

                      Vpl,Rd        Eta  LambdabarW
    Reduction        270,546      1,200      0,182
```

Σχήμα 7.9 Ανάλυση κύριων διαγωνίων τμήμα 2

7.1.9 Κύρια διαγώνια τμήμα 3

Επιλέχθηκε 2UPN80/20. Περισσότερη ένταση παρατηρείται στο έκτο κύριο διαγώνιο μέλος με συντελεστή εκμετάλλευσης 0,880.

Steel Stress Check Data Eurocode 3-2005

File

```
Eurocode 3-2005 STEEL SECTION CHECK  (Summary for Combo and Station)
Units   : KN, m, C

Frame : 59        X Mid: 21,175     Combo: ULS1            Design Type: Brace
Length: 4,584     Y Mid: 0,000      Shape: 2UPN80/20/      Frame Type: DCH-MRF
Loc   : 0,000     Z Mid: 4,016      Class: Class 1         Rolled : Yes

Country=CEN Default                 Combination=Eq. 6.10                 Reliability=Class 2
Interaction=Method 2 (Annex B)      MultiResponse=Envelopes              P-Delta Done? No

GammaM0=1,00      GammaM1=1,00      GammaM2=1,25
An/Ag=1,00        RLLF=1,000        PLLF=0,750        D/C Lim=0,950

Aeff=0,002        eNy=0,000         eNz=0,000
A=0,002           Iyy=2,117E-06     iyy=0,031         Wel,yy=5,293E-05    Weff,yy=5,293E-05
It=0,000          Izz=1,705E-06     izz=0,028         Wel,zz=3,100E-05    Weff,zz=3,100E-05
Iw=0,000          Iyz=0,000         h=0,080           Wpl,yy=6,413E-05    Av,z=0,001
E=210000000,0     fy=275000,000     fu=430000,000     Wpl,zz=5,387E-05    Av,y=9,880E-04


STRESS CHECK FORCES & MOMENTS
    Location            Ned      Med,yy      Med,zz      Ved,z      Ved,y        Ted
    0,000          -111,323       0,000       0,000     -0,347      0,000      0,000

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO
    Governing          Total          N     MMajor     MMinor      Ratio     Status
    Equation           Ratio      Ratio      Ratio      Ratio      Limit      Check
    6.3.3(4)-6.62      0,880  =   0,857  +   0,023  +   0,000      0,950         OK

AXIAL FORCE DESIGN
                         Ned      Nc,Rd      Nt,Rd
                       Force   Capacity   Capacity
    Axial           -111,323    606,100    606,100

                     Npl,Rd      Nu,Rd     Ncr,T     Ncr,TF      An/Ag
                    606,100    682,358  1905,127   1905,127      1,000

                Curve   Alpha       Ncr  LambdaBar       Phi        Chi      Nb,Rd
    Major (y-y)     c   0,490   835,255      0,852     1,023      0,630    381,643
    MajorB(y-y)     c   0,490   835,255      0,852     1,023      0,630    381,643
    Minor (z-z)     c   0,490   168,175      1,898     2,718      0,214    129,970
    MinorB(z-z)     c   0,490   168,175      1,898     2,718      0,214    129,970
    Torsional TF    c   0,490  1905,127      0,564     0,748      0,806    488,812

MOMENT DESIGN
                         Med   Med,span      Mc,Rd      Mv,Rd     Mn,Rd      Mb,Rd
                      Moment     Moment   Capacity   Capacity  Capacity   Capacity
    Major (y-y)        0,000      0,290     17,636     17,636    17,636     10,729
    Minor (z-z)        0,000      0,000     14,814     14,814    14,814

                Curve AlphaLT LambdaBarLT     PhiLT      ChiLT        C1        Mcr
    LTB             d  0,760      0,754      0,995      0,608     1,316     31,015

                         kyy        kyz        kzy        kzz
    Factors            1,190      1,011      0,868      1,685

SHEAR DESIGN
                         Ved      Vc,Rd     Stress     Status       Ted
                       Force   Capacity      Ratio      Check   Torsion
    Major (z)          0,347    156,866      0,002         OK     0,000
    Minor (y)          0,000    227,996      0,000         OK     0,000

                      Vpl,Rd        Eta  LambdabarW
    Reduction        156,866      1,200      0,134

BRACE MAXIMUM AXIAL LOADS
                           P          P
                        Comp       Tens
    Axial           -111,323        N/C
```

Σχήμα 7.10 Ανάλυση κύριων διαγωνίων τμήμα 3

7.1.10 Κύρια διαγώνια τμήμα 4

Επιλέχθηκε 2U65×42/20. Ίδια ένταση παρατηρείται και στα δύο κύρια διαγώνια με συντελεστή εκμετάλλευσης 0,621.

```
Steel Stress Check Data  Eurocode 3-2005
File

Eurocode 3-2005 STEEL SECTION CHECK  (Summary for Combo and Station)
Units   : KN, m, C

Frame : 82          X Mid: 25,988      Combo: ULS5              Design Type: Brace
Length: 3,716       Y Mid: 0,000       Shape: 2U65X42/20/       Frame Type: DCH-MRF
Loc   : 3,716       Z Mid: 4,361       Class: Class 1           Rolled : Yes

Country=CEN Default                    Combination=Eq. 6.10                  Reliability=Class 2
Interaction=Method 2 (Annex B)         MultiResponse=Envelopes               P-Delta Done? No

GammaM0=1,00        GammaM1=1,00       GammaM2=1,25
An/Ag=1,00          RLLF=1,000         PLLF=0,750          D/C Lim=0,950

Aeff=0,002          eNy=0,000          eNz=0,000
A=0,002             Iyy=1,151E-06      iyy=0,025           Wel,yy=3,542E-05    Weff,yy=3,542E-05
It=0,000            Izz=1,338E-06      izz=0,027           Wel,zz=2,573E-05    Weff,zz=2,573E-05
Iw=0,000            Iyz=0,000          h=0,065             Wpl,yy=4,310E-05    Av,z=0,001
E=210000000,0       fy=275000,000      fu=430000,000       Wpl,zz=4,370E-05    Av,y=7,420E-04

Rot= 90 deg         Imax=1,338E-06     Imin=1,151E-06      imax=0,027          imin=0,025


STRESS CHECK FORCES & MOMENTS
    Location            Ned       Med,yy       Med,zz       Ved,z       Ved,y         Ted
    3,716            -77,129       0,000        0,000       0,134       0,000       0,000

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO
    Governing          Total          N      MMajor      MMinor       Ratio      Status
    Equation           Ratio      Ratio       Ratio       Ratio       Limit       Check
    6.3.3(4)-6.61      0,621   =  0,600   +   0,022   +   0,000       0,950          OK

AXIAL FORCE DESIGN
                         Ned       Nc,Rd       Nt,Rd
                       Force    Capacity    Capacity
    Axial           -77,129     496,925     496,925

                      Npl,Rd       Nu,Rd       Ncr,T      Ncr,TF       An/Ag
                     496,925     559,447    1752,647    1752,647       1,000

                Curve   Alpha         Ncr   LambdaBar         Phi         Chi      Nb,Rd
    Major (y-y)     c   0,490     172,802       1,696       2,304       0,259    128,587
    MajorB(y-y)     c   0,490     172,802       1,696       2,304       0,259    128,587
    Minor (z-z)     c   0,490     200,876       1,573       2,073       0,292    145,131
    MinorB(z-z)     c   0,490     200,876       1,573       2,073       0,292    145,131
    Torsional TF    c   0,490    1752,647       0,532       0,723       0,825    409,792

MOMENT DESIGN
                         Med    Med,span       Mc,Rd       Mv,Rd       Mn,Rd       Mb,Rd
                      Moment      Moment    Capacity    Capacity    Capacity    Capacity
    Major (y-y)        0,000       0,124      11,853      11,853      11,853       8,098
    Minor (z-z)        0,000       0,000      12,018      12,018      12,018

                Curve AlphaLT LambdaBarLT      PhiLT      ChiLT          C1         Mcr
    LTB             d   0,760       0,640       0,872      0,683       1,316      28,976

                         kyy         kyz         kzy        kzz
    Factors            1,406       0,855       0,924      1,425

SHEAR DESIGN
                         Ved      Vc,Rd      Stress     Status         Ted
                       Force    Capacity       Ratio      Check     Torsion
    Major (z)          0,134     117,808       0,001         OK       0,000
    Minor (y)          0,000     199,575       0,000         OK       0,000

                      Vpl,Rd         Eta   LambdabarW
    Reduction        117,808       1,200       0,114

BRACE MAXIMUM AXIAL LOADS
                           P           P
                        Comp        Tens
    Axial                N/C     -77,129
```

Σχήμα 7.11 Ανάλυση κύριων διαγωνίων τμήμα 4

7.1.11 Δευτερεύοντα διαγώνια

Επιλέχθηκε 2U40×20/20. Περισσότερη ένταση παρατηρείται στο πρώτο δευτερεύον διαγώνιο μέλος με συντελεστή εκμετάλλευσης 0,703.

Steel Stress Check Data Eurocode 3-2005

File

```
Eurocode 3-2005 STEEL SECTION CHECK  (Summary for Combo and Station)
Units  : KN, m, C

Frame : 67        X Mid: 2,888      Combo: ULS10            Design Type: Brace
Length: 2,572     Y Mid: 0,000      Shape: 2U40X20/20/      Frame Type: DCH-MRF
Loc   : 2,572     Z Mid: 2,559      Class: Class 1          Rolled : Yes

Country=CEN Default                 Combination=Eq. 6.10                Reliability=Class 2
Interaction=Method 2 (Annex B)      MultiResponse=Envelopes             P-Delta Done? No

GammaM0=1,00      GammaM1=1,00      GammaM2=1,25
An/Ag=1,00        RLLF=1,000        PLLF=0,750        D/C Lim=0,950

Aeff=7,309E-04    eNy=0,000         eNz=0,000
A=7,309E-04       Iyy=0,000         iyy=0,014         Wel,yy=7,580E-06    Weff,yy=7,580E-06
It=0,000          Izz=0,000         izz=0,018         Wel,zz=7,537E-06    Weff,zz=7,537E-06
Iw=0,000          Iyz=0,000         h=0,040           Wpl,yy=9,693E-06    Av,z=4,409E-04
E=210000000,0     fy=275000,000     fu=430000,000     Wpl,zz=1,219E-05    Av,y=4,009E-04

Rot= 90 deg       Imax=0,000        Imin=0,000        imax=0,018          imin=0,014


STRESS CHECK FORCES & MOMENTS
    Location            Ned      Med,yy      Med,zz      Ved,z      Ved,y        Ted
    2,572           -25,417       0,000       0,000      0,054      0,000      0,000

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO
    Governing         Total          N      MMajor      MMinor      Ratio     Status
    Equation          Ratio      Ratio       Ratio       Ratio      Limit      Check
    6.3.3(4)-6.61     0,703   =  0,677   +   0,026   +   0,000      0,950         OK

AXIAL FORCE DESIGN
                        Ned      Nc,Rd      Nt,Rd
                      Force   Capacity   Capacity
    Axial           -25,417    200,998    200,998

                      Npl,Rd      Nu,Rd      Ncr,T     Ncr,TF      An/Ag
                     200,998    226,287   1091,736   1091,736      1,000

                Curve   Alpha       Ncr   LambdaBar        Phi        Chi      Nb,Rd
    Major (y-y)     c   0,490    47,492       2,057      3,071      0,187     37,559
    MajorB(y-y)     c   0,490    47,492       2,057      3,071      0,187     37,559
    Minor (z-z)     c   0,490    70,830       1,685      2,283      0,262     52,578
    MinorB(z-z)     c   0,490    70,830       1,685      2,283      0,262     52,578
    Torsional TF    c   0,490  1091,736       0,429      0,648      0,882    177,246

MOMENT DESIGN
                        Med   Med,span      Mc,Rd      Mv,Rd      Mn,Rd      Mb,Rd
                     Moment     Moment   Capacity   Capacity   Capacity   Capacity
    Major (y-y)       0,000      0,035      2,666      2,666      2,666      1,955
    Minor (z-z)       0,000      0,000      3,352      3,352      3,352

                Curve AlphaLT LambdaBarLT     PhiLT      ChiLT         C1        Mcr
    LTB             d  0,760      0,566      0,799      0,733      1,316      8,318

                        kyy        kyz        kzy        kzz
    Factors           1,464      0,832      0,931      1,387

SHEAR DESIGN
                        Ved      Vc,Rd     Stress     Status        Ted
                      Force   Capacity      Ratio      Check    Torsion
    Major (z)         0,054     63,651      0,001         OK      0,000
    Minor (y)         0,000     70,002      0,000         OK      0,000

                     Vpl,Rd        Eta  LambdabarW
    Reduction        63,651      1,200      0,073

BRACE MAXIMUM AXIAL LOADS
                          P          P
                       Comp       Tens
    Axial               N/C    -25,417
```

Σχήμα 7.12 Ανάλυση δευτερευόντων διαγωνίων

7.1.12 Δευτερεύοντα κατακόρυφα

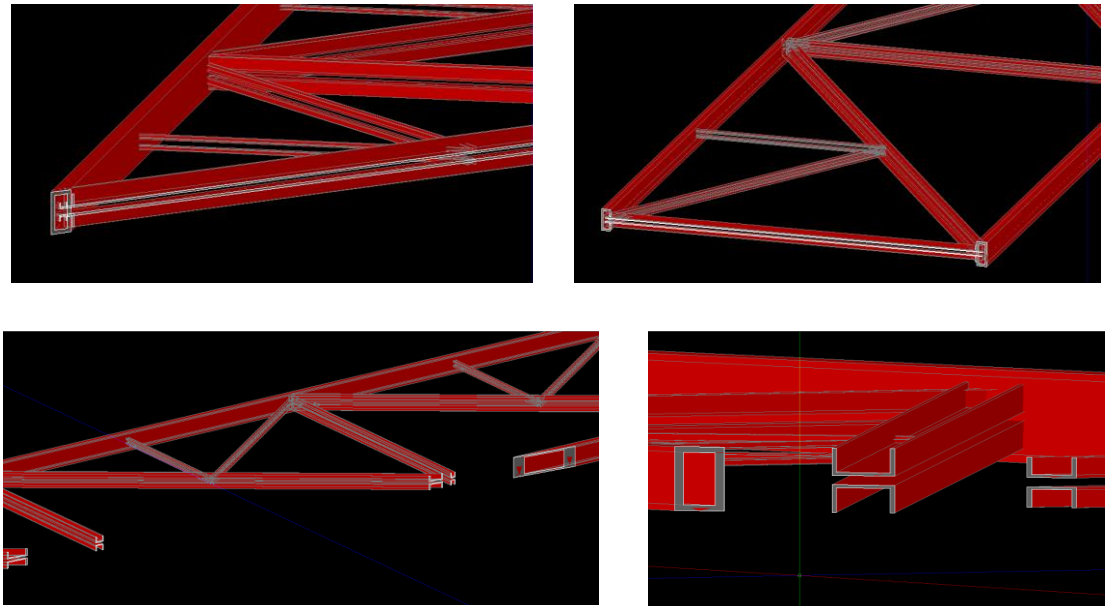
Επιλέχθηκε 2U30×15/20. Περισσότερη ένταση παρατηρείται στο έκτο δευτερεύον κατακόρυφο μέλος με συντελεστή εκμετάλλευσης 0,637.

Steel Stress Check Data Eurocode 3-2005

File

```
Eurocode 3-2005 STEEL SECTION CHECK  (Summary for Combo and Station)
Units   : KN, m, C

Frame : 88        X Mid: 21,175     Combo: ULS1              Design Type: Column
Length: 1,475     Y Mid: 0,000      Shape: 2U30X15/20/       Frame Type: DCH-MRF
Loc   : 0,000     Z Mid: 4,754      Class: Class 1           Rolled : Yes

Country=CEN Default                 Combination=Eq. 6.10                 Reliability=Class 2
Interaction=Method 2 (Annex B)      MultiResponse=Envelopes              P-Delta Done? No

GammaM0=1,00      GammaM1=1,00      GammaM2=1,25
An/Ag=1,00        RLLF=1,000        PLLF=0,750        D/C Lim=0,950

Aeff=4,414E-04    eNy=0,000         eNz=0,000
A=4,414E-04       Iyy=0,000         iyy=0,011         Wel,yy=3,363E-06    Weff,yy=3,363E-06
It=0,000          Izz=0,000         izz=0,016         Wel,zz=4,344E-06    Weff,zz=4,344E-06
Iw=0,000          Iyz=0,000         h=0,030           Wpl,yy=4,325E-06    Av,z=2,734E-04
E=210000000,0     fy=275000,000     fu=430000,000     Wpl,zz=6,676E-06    Av,y=2,479E-04

Rot= 90 deg       Imax=0,000        Imin=0,000        imax=0,016          imin=0,011


STRESS CHECK FORCES & MOMENTS
    Location            Ned      Med,yy      Med,zz      Ved,z      Ved,y        Ted
    0,000            -22,205      0,000       0,000      0,000      0,000      0,000

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO
    Governing          Total          N      MMajor      MMinor      Ratio     Status
    Equation           Ratio      Ratio       Ratio       Ratio      Limit      Check
    6.3.3(4)-6.61      0,637   =  0,637   +   0,000   +   0,000      0,950         OK

AXIAL FORCE DESIGN
                         Ned      Nc,Rd       Nt,Rd
                       Force   Capacity    Capacity
    Axial           -22,205    121,385     121,385

                      Npl,Rd      Nu,Rd       Ncr,T      Ncr,TF      An/Ag
                     121,385    136,657     637,895     637,895      1,000

                Curve   Alpha       Ncr   LambdaBar         Phi         Chi      Nb,Rd
    Major (y-y)     c   0,490    48,052       1,589       2,103       0,287     34,868
    MajorB(y-y)     c   0,490    48,052       1,589       2,103       0,287     34,868
    Minor (z-z)     c   0,490   103,458       1,083       1,303       0,493     59,875
    MinorB(z-z)     c   0,490   103,458       1,083       1,303       0,493     59,875
    Torsional TF    c   0,490   637,895       0,436       0,653       0,878    106,575

MOMENT DESIGN
                         Med   Med,span      Mc,Rd      Mv,Rd      Mn,Rd      Mb,Rd
                      Moment     Moment   Capacity   Capacity   Capacity   Capacity
    Major (y-y)        0,000      0,000      1,189      1,189      1,189      0,932
    Minor (z-z)        0,000      0,000      1,836      1,836      1,836

                Curve AlphaLT LambdaBarLT     PhiLT      ChiLT         C1        Mcr
    LTB             d   0,760      0,494      0,734      0,784      1,000      4,876

                         kyy        kyz        kzy        kzz
    Factors            1,509      0,778      0,951      1,297

SHEAR DESIGN
                         Ved      Vc,Rd     Stress     Status        Ted
                       Force   Capacity      Ratio      Check    Torsion
    Major (z)          0,000     39,359      0,000         OK      0,000
    Minor (y)          0,000     43,408      0,000         OK      0,000

                      Vpl,Rd        Eta  LambdabarW
    Reduction         39,359      1,200      0,066
```

Σχήμα 7.13 Ανάλυση δευτερευόντων κατακόρυφων

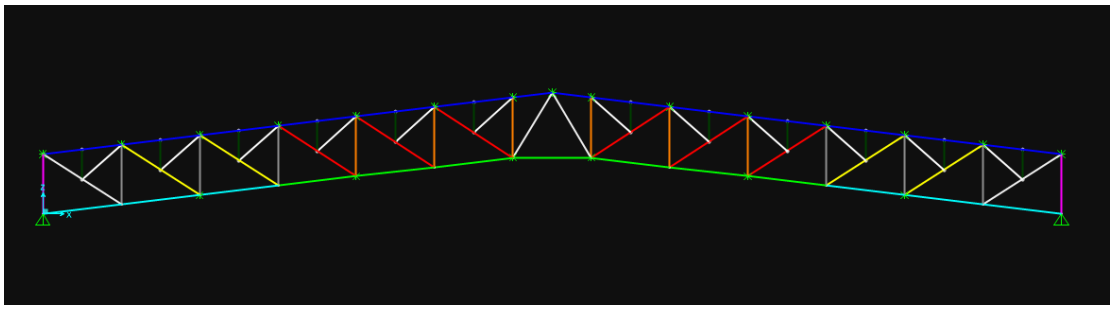


Εικόνα 7.1 Τομές χαλύβδινου ζυγώματος

7.2 Διαστασιολόγηση ζυγώματος αλουμινίου

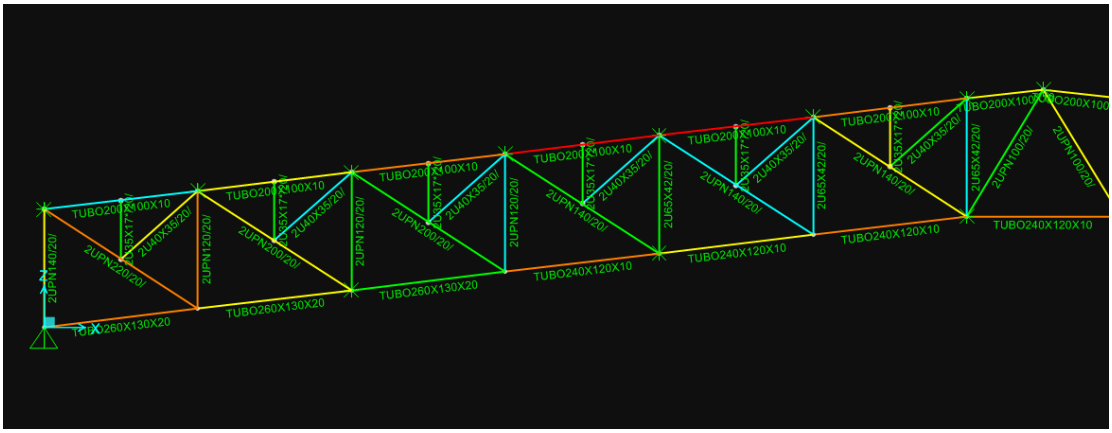
7.2.1 Γενικά

Για την ανάλυση, τα δομικά στοιχεία του ζυγώματος ομαδοποιούνται και διαστασιολογούνται με βάση αυτό που καταπονείται περισσότερο. Η ομαδοποίηση φαίνεται στο Σχήμα 7.14 και στόχο έχει τη μεγαλύτερη οικονομία. Ειδικότερα οι ομάδες (groups) είναι: 1) άνω πέλμα (μπλε), 2) κάτω πέλμα τμήμα 1 (γαλάζιο), 3) κάτω πέλμα τμήμα 2 (πράσινο), 4) κύρια κατακόρυφα τμήμα 1(μοβ), 5) κύρια κατακόρυφα τμήμα 2 (γκρι), 6)κύρια κατακόρυφα τμήμα 3 (πορτοκαλί), 7) κύρια διαγώνια τμήμα 1 (άσπρο), 8) κύρια διαγώνια τμήμα 2 (κίτρινο), 9) κύρια διαγώνια τμήμα 3 (κόκκινο), 10) κύρια διαγώνια τμήμα 4 (άσπρο), 11) δευτερεύοντα διαγώνια (άσπρο) και 12) δευτερεύοντα κατακόρυφα (λαδί).



Σχήμα 7.14 Ομαδοποίηση μελών ζυγώματος αλουμινίου

Το αποτέλεσμα της διαστασιολόγησης του ζυγώματος αλουμινίου μέσω του προγράμματος SAP2000 και υπολογισμών οι οποίοι παρουσιάζονται παρακάτω με βάση τον Ευρωκώδικα 9 φαίνεται στο Σχήμα 7.15.



Σχήμα 7.15 Αποτέλεσμα διαστασιολόγησης ζυγώματος αλουμινίου (χρωματική διαβάθμιση βάσει του συντελεστή εκμετάλλευσης κάθε μέλους με το κανονισμό AA-LRFD 2000)

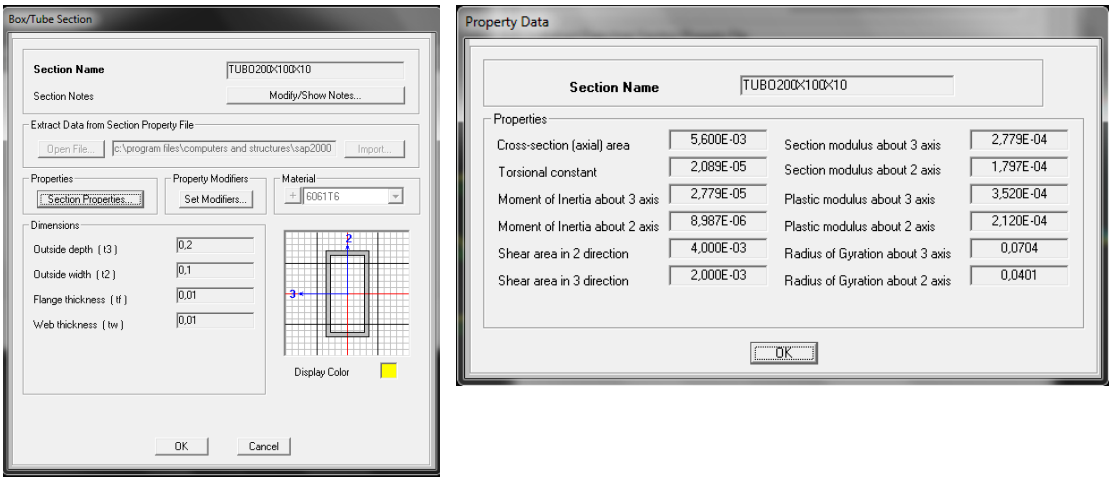
Για τη διαστασιολόγηση όλων των μελών του ζυγώματος αλουμινίου χρησιμοποιούνται τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών τα οποία εξάγονται από την ανάλυση του SAP2000 για τις επιλεγμένες διατομές και οι έλεγχοι που γίνονται είναι αξονικής δύναμης απομειωμένης διατομής και καμπτικού λυγισμού μέλους, αφού αποτελούν μέλη δικτυώματος και η κύρια καταπόνησή τους είναι η αξονική. Από τον Πίνακα 3.2β του EN 1999-1-1 έχουμε ότι για το κράμα που επιλέξαμε AW-6061 T6 έχουμε: $f_{o,2} = 240\ MPa$, $f_u = 260\ MPa$ για $t \leq 20\ mm$, $f_{o,haz} = 115\ MPa$, $f_{u,haz} = 175\ MPa$, $\rho_{o,haz} = 0{,}48$, $\rho_{u,haz} = 0{,}67$, $BC = A$ και $n_p = 55$.

7.2.2 Διαστασιολόγηση μελών

Παρουσιάζεται ο τρόπος διαστασιολόγησης ενός μέλους (άνω πέλματος) και τα αποτελέσματα της διαστασιολόγησης των υπόλοιπων μελών παρουσιάζονται σε πίνακες. Διευκρινίζεται ότι απομειωμένη διατομή λόγω επιρροής των συγκολλήσεων των ελασμάτων έχουμε μόνο στα άνω και κάτω πέλματα, αφού οι υπόλοιπες συνδέσεις γίνονται με κοχλιώσεις.

7.2.2.1 Άνω πέλμα

Επιλέχθηκε TUBO 200×100×10 στραμμένη κατά 90° με χαρακτηριστικά που φαίνονται στην Εικόνα 7.2. Περισσότερη ένταση παρατηρείται στο μέλος του τέταρτου φατνώματος με $N_{Ed} = -658{,}54$ KN για το συνδυασμό φόρτισης ULS6.



Εικόνα 7.2 Χαρακτηριστικά εστραμμένης διατομής TUBO 200×100×10 από το SAP2000

Κατηγορία διατομής

Κορμοί (internal parts)

$\frac{\beta_1}{\varepsilon} = 11$ $\frac{\beta_2}{\varepsilon} = 16$ $\frac{\beta_3}{\varepsilon} = 22$ (διατομή κατηγορίας Α χωρίς συγκολλήσεις)

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_o}} = \sqrt{\frac{250}{240}} = 1{,}021$$

Οπότε :

$\beta_1 = 11{,}23$ $\beta_2 = 16{,}34$ $\beta_3 = 22{,}46$

$$\beta = \frac{d}{t_w} = \frac{h - 2t_f}{t_w} = \frac{100 - 2 \cdot 10}{10} = 8 < \beta_1$$

Άρα οι κορμοί είναι κατηγορίας 1

Πέλματα (internal parts)

$$\beta = \frac{b}{t_f} = \frac{b - 2t_w}{t_f} = \frac{200 - 2 \cdot 10}{10} = 18 < \beta_3$$

Άρα τα πέλματα είναι κατηγορίας 3

Οπότε η διατομή είναι κατηγορίας 3 και δεν απαιτείται απομείωση.

Μήκος λυγισμού

$l_{cr,y} = 193{,}9\ cm$

$l_{cr,z} = 387{,}8\ cm$

όπου άξονας y θεωρείται ο κατακόρυφος άξονας του ζυγώματος ενώ z άξονας ο άξονας της εγκάρσιας διεύθυνσης.

Έλεγχος λυγισμού διατομής

Πρέπει να ισχύει:

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

-Άξονας y

$$N_{b,Rd,y} = \frac{\kappa \cdot \chi_y \cdot A_{eff} \cdot f_u}{\gamma_{M1}}$$

όπου

$\kappa = 1{,}0$ αφού η διατομή δεν είναι συγκολλητή

$$N_{\mathrm{cr,y}} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{\mathrm{yy}}}{l_{\mathrm{cr,y}}{}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 70 \cdot 10^6 KN/m^2 \cdot 8{,}987 \cdot 10^{-6} m^4}{1{,}939^2 m^2} = 1651{,}42 KN$$

$$\bar{\lambda}_{\mathrm{y}} = \sqrt{\frac{A_{\mathrm{eff}} f_{\mathrm{o}}}{N_{\mathrm{cr,y}}}} = \sqrt{\frac{56{,}0 cm^2 \cdot 24 kN/cm^2}{1651{,}42 KN}} = 0{,}902$$

$$\phi_{\mathrm{y}} = 0{,}5(1 + \alpha(\bar{\lambda}_{\mathrm{y}} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_{\mathrm{y}}{}^2)$$

όπου από Πίνακα 4.3 για θερμικά επεξεργασμένο αλουμίνιο $\alpha = 0{,}20$ και $\bar{\lambda}_0 = 0{,}10$. Οπότε:

$$\phi_{\mathrm{y}} = 0{,}5(1 + 0{,}20 \cdot (0{,}902 - 0{,}10) + 0{,}902^2) = 0{,}987$$

$$\chi_{\mathrm{y}} = \frac{1}{\phi_{\mathrm{y}} + \sqrt{\phi_{\mathrm{y}}{}^2 - \bar{\lambda}_{\mathrm{y}}{}^2}} = \frac{1}{0{,}987 + \sqrt{0{,}987^2 - 0{,}902^2}} = 0{,}721$$

Οπότε :

$$N_{\mathrm{b,Rd,y}} = \frac{\kappa \cdot \chi_{\mathrm{y}} \cdot A_{\mathrm{eff}} \cdot f_{\mathrm{u}}}{\gamma_{\mathrm{M1}}} = \frac{0{,}701 \cdot 56{,}0 cm^2 \cdot 24 kN/cm^2}{1{,}1} = 880\ KN$$
$$> 658{,}54\ KN = N_{\mathrm{Ed}}$$

Άρα η διατομή επαρκεί σε λυγισμό κατά τον άξονα y.

-*Άξονας z*

$$N_{\mathrm{b,Rd,z}} = \frac{\kappa \cdot \chi_{\mathrm{z}} \cdot A_{\mathrm{eff}} \cdot f_{\mathrm{u}}}{\gamma_{\mathrm{M1}}}$$

όπου

$\kappa = 1{,}0$ αφού η διατομή δεν είναι συγκολλητή

$$N_{\mathrm{cr,z}} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{\mathrm{zz}}}{l_{\mathrm{cr,z}}{}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 70 \cdot 10^6 KN/m^2 \cdot 2{,}779 \cdot 10^{-6} m^4}{3{,}878^2 m^2} = 1276{,}65\ KN$$

$$\bar{\lambda}_{\mathrm{z}} = \sqrt{\frac{A_{\mathrm{eff}} f_{\mathrm{o}}}{N_{\mathrm{cr,z}}}} = \sqrt{\frac{56{,}0 cm^2 \cdot 24 kN/cm^2}{1276{,}65\ KN}} = 1{,}026$$

$$\phi_{\mathrm{z}} = 0{,}5(1 + \alpha(\bar{\lambda}_{\mathrm{z}} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_{\mathrm{z}}{}^2)$$

όπου από Πίνακα 4.3 για θερμικά επεξεργασμένο αλουμίνιο $\alpha = 0{,}20$ και $\bar{\lambda}_0 = 0{,}10$. Οπότε:

$$\phi_{\mathrm{z}} = 0{,}5(1 + 0{,}20 \cdot (1{,}026 - 0{,}10) + 1{,}026^2) = 1{,}12$$

$$\chi_{\mathrm{z}} = \frac{1}{\phi_{\mathrm{z}} + \sqrt{\phi_{\mathrm{z}}{}^2 - \bar{\lambda}_{\mathrm{z}}{}^2}} = \frac{1}{1{,}12 + \sqrt{1{,}12^2 - 1{,}026^2}} = 0{,}637$$

Οπότε :

$$N_{\mathrm{b,Rd,y}} = \frac{\kappa \cdot \chi_{\mathrm{y}} \cdot A_{\mathrm{eff}} \cdot f_{\mathrm{u}}}{\gamma_{\mathrm{M1}}} = \frac{0{,}637 \cdot 56{,}0cm^2 \cdot 24kN/cm^2}{1{,}1} = 778{,}67\ KN$$
$$> 658{,}54\ KN = N_{\mathrm{Ed}}$$

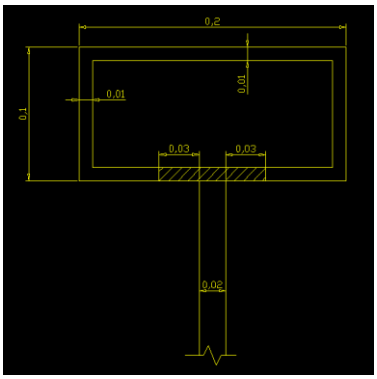
Άρα η διατομή επαρκεί σε λυγισμό κατά τον άξονα z.

Έλεγχος θλίψης στις περιοχές των κόμβων (επιρροή ΖΘΕ) όπου έχουμε συγκολλήσεις ελασμάτων

Πρέπει να ισχύει:

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

Είναι: $N_{\mathrm{c,Rd}} = A_{\mathrm{eff}} f_{\mathrm{o}} / \gamma_{\mathrm{M1}}$ όπου A_{eff} είναι η ενεργός επιφάνεια που βασίζεται στο μειωμένο πάχος λόγω Ζ.Θ.Ε. (Ζώνης Θερμικής Επιρροής), αλλά αγνοεί τις οπές.



Εικόνα 7.3 Ζώνη θερμικής επιρροής

Έστω τύπος συγκόλλησης MIG με ενδοστρωματική ψύξη στους 60°C και η συγκόλληση πραγματοποιείται σε πολλαπλές στρώσεις. Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 9 για $6 < t \leq 12\ mm : b_{\mathrm{haz}} = 30\ mm$. Οπότε θα έχουμε:

$$A_{\mathrm{eff}} = A - b_{\mathrm{haz}} \cdot t_{\mathrm{f}} \cdot (1 - \rho_{\mathrm{haz}}) = 56cm^2 - 8{,}0cm \cdot 1{,}0cm \cdot (1 - 0{,}48) = 51{,}84cm^2$$

$$N_{\mathrm{c,Rd}} = \frac{51{,}84cm^2 \cdot 24KN/cm^2}{1{,}1} = 1131{,}05KN > 658{,}54KN = N_{\mathrm{Ed}}$$

Οπότε η διατομή επαρκεί.

7.2.2.2 Υπόλοιπα μέλη

Παρουσιάζονται σε πίνακες όλα τα αποτελέσματα της διαστασιολόγησης των υπολοίπων μελών του ζυγώματος.

Πίνακας 7.1 Διαστασιολόγηση άνω πέλματος, κάτω πέλματος και κύριων κατακόρυφων

Μέλος		Άνω πέλμα	Κάτω πέλμα		Κύρια κατακόρυφα		
			τμήμα 1	τμήμα 2	τμήμα 1	τμήμα 2	τμήμα 3
Διατομή		TUBO 200×100×10	TUBO 260×130×20	TUBO 240×120×10	2UPN140/20	2UPN120/20	2U65×42/20
N_{Ed} (KN)		-658,54	-932,57	-430,67	-219,45	-188,51	-47,25
Συνδυασμός φόρτισης		ULS6	ULS1	ULS1	ULS6	ULS6	ULS6
Κατηγορία διατομής		3	1	3	3	1 ή 2	3
Μήκος λυγισμού (m)	άξονας y	1,939	3,878	3,878	2,95	2,95	2,95
	άξονας z	3,878	7,756	7,756	2,95	2,95	2,95
Έλεγχος λυγισμού							
Άξονας y	$N_{cr,y}$ (KN)	1651,42	1572,95	745,59	959,8	578,02	91,38
	$\bar{\lambda}_y$	0,902	1,462	1,479	1,01	1,187	2,179
	Φ_y	0,987	1,694	1,732	1,101	1,303	3,082
	χ_y	0,721	0,392	0,38	0,65	0,543	0,19
	$N_{b,Rd,y}$ (KN)	880	1197,69	563,63	577,22	402,56	74,91
	Επάρκεια	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Άξονας z	$N_{cr,z}$	1276,65	1269,07	568,61	343,27	250,55	106,22
	$\bar{\lambda}_z$	1,026	1,627	1,694	1,687	1,804	2,021
	Φz	1,12	1,976	2,094	2,082	2,298	2,734
	χ_z	0,637	0,323	0,3	0,303	0,269	0,219
	$N_{b,Rd,z}$ (KN)	778,67	986,62	445,09	269,19	199,31	86,34
	Επάρκεια	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Έλεγχος θλίψης στις περιοχές με επιρροή ΘΕΖ							
	A_{eff} (cm^2)	51,84	130,64	63,84			
	$N_{c,Rd}$ (KN)	1131,05	2850,33	1392,87			
	Επάρκεια	OK	OK	OK			

Πίνακας 7.2 Διαστασιολόγηση κύριων διαγωνίων, δευτερευόντων διαγωνίων και δευτερευόντων κατακορύφων

Μέλος		Κύρια διαγώνια				Δευτερεύοντα διαγώνια	Δευτερεύοντα κατακόρυφα
		τμήμα 1	τμήμα 2	τμήμα 3	τμήμα 4		
Διατομή		2UPN220/20	2UPN200/20	2UPN140/20	2UPN100/20	2U40×35/20	2U35×17*/20
N_{Ed} (KN)		-262,59	-192,85	-101,25	-78,54	-20,91	-18,87
Συνδυασμός φόρτισης		ULS4	ULS4	ULS1	ULS5	ULS10	ULS1
Κατηγορία διατομής		3	3	1 ή 2	1 ή 2	1 ή 2	1
Μήκος λυγισμού (m)	άξονας y	2,292	2,292	2,292	3,716	2,572	1,475
	άξονας z	4,584	4,584	4,584	3,716	2,572	1,475
Έλεγχος λυγισμού							
Άξονας y	$N_{cr,y}$ (KN)	7076,71	5025,11	1598,99	205,48	29,48	30,14
	$\bar{\lambda}_y$	0,504	0,554	0,784	1,773	3,179	2,26
	Φ_y	0,667	0,699	0,876	2,24	5,861	3,27
	χ_y	0,905	0,889	0,789	0,277	0,093	0,178
	$N_{b,Rd,y}$ (KN)	1478,74	1248,54	700,98	162,63	25,18	24,99
	Επάρκεια	OK	OK	OK	OK	OK	OK
Άξονας z	$N_{cr,z}$	371,52	288,87	142,17	116,47	83,93	55,76
	$\bar{\lambda}_z$	2,199	2,313	2,62	2,355	1,884	1,66
	Φz	3,128	3,396	4,184	3,5	2,453	2,034
	χ_z	0,187	0,17	0,134	0,164	0,249	0,312
	$N_{b,Rd,z}$ (KN)	305,55	238,75	119,05	96,29	67,28	43,81
	Επάρκεια	OK	OK	OK	OK	OK	OK

7.3 Έλεγχος βελών στην Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας

Στην παράγραφο αυτή θα ελεγχθούν τα βέλη του υπό μελέτη ζυγώματος στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας τόσο για το χάλυβα όσο και για το αλουμίνιο και θα συγκριθούν με τις αντίστοιχες αποδεκτές τιμές βελών του Πίνακα 4.9. Τα βέλη υπολογίζονται από το SAP2000 για ανάλυση με τους συνδυασμούς σε οριακή κατάσταση λειτουργικότητας.

7.3.1 Έλεγχος σε κατακόρυφα βέλη κάμψης

$\delta_{\max} = \delta_1 + \delta_2$ (αντιβέλος $\delta_o = 0$)

όπου

δ_1 είναι το βέλος λόγω μόνιμων φορτίων

δ_2 είναι το βέλος λόγω μεταβλητών φορτίων

Χάλυβας

$\delta_{\max} = L/200 = 5005/200 = 25{,}03\ cm$

$\delta_{2,\max} = L/250 = 5005/250 = 20{,}02\ cm$

$\delta = 6{,}07\ cm < 25{,}03\ cm$

$\delta_2 = 1{,}68\ cm < 20{,}02\ cm$

Αλουμίνιο

$\delta_{\max} = L/200 = 5005/200 = 25{,}03\ cm$

$\delta_{2,\max} = L/250 = 5005/250 = 20{,}02\ cm$

$\delta = 12{,}29\ cm < 25{,}03\ cm$

$\delta_2 = 7{,}95\ cm < 20{,}02\ cm$

7.3.2 Έλεγχος σε οριζόντια μετατόπιση

Αφού γίνει ανάλυση του ζυγώματος με τους συνδυασμούς σε οριακή κατάσταση λειτουργικότητας, εντοπίζεται η μέγιστη μετακίνηση κατά τη διαμήκη έννοια του ζυγώματος. Σύμφωνα με την παράγραφο 4.4 πρέπει: $u \leq H/150$ όπου u η οριζόντια μετατόπιση και H το ύψος της κατασκευής. Άρα $u_{x,\max} = 2{,}95/150 = 0{,}0196\ m = 1{,}96 cm$.

Χάλυβας

$u_{x,\max} = 0{,}77\ cm < 1{,}96\ cm$

Αλουμίνιο

$u_{x,\max} = 1{,}72\ cm < 1{,}96\ cm$

8 Συμπεράσματα

Μέσα από την παρούσα διπλωματική εργασία μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

Όσον αφορά το αλουμίνιο, αποτελεί υλικό εξαιρετικής ανακύκλωσης με ελάχιστες απώλειες βάρους και υποβάθμιση της ποιότητάς του κατά τη διαδικασία αυτή. Η δευτερογενής παραγωγή του αναμένεται να μειώσει την εξόρυξη του βωξίτη τα επόμενα χρόνια, αν και η χρήση του θα αυξηθεί. Η χρήση του αλουμινίου συμβάλει επιπλέον στην εξοικονόμηση ενέργειας λόγω του μειωμένου βάρους του αλλά και της μικρής ποσότητας ενέργειας που απαιτείται για την επανάτηξή του, παρόλο το μεγάλο ποσό ενέργειας που απαιτείται για την πρωτογενή παραγωγή του. Οι κύριοι λόγοι χρήσης του σε δομικές κατασκευές είναι:

- Η *ελαφρότητά* του, καθώς έχει ειδικό βάρος περίπου το 1/3 του ειδικού βάρους του χάλυβα, οπότε οι κατασκευές του έχουν μεγαλύτερο ωφέλιμο φορτίο, μικρότερο κόστος λειτουργίας αλλά και μικρότερες σεισμικές δυνάμεις.
- Η *ανθεκτικότητά* του στη διάβρωση, καθώς στις περισσότερες περιβαλλοντικές συνθήκες δεν απαιτείται αντιδιαβρωτική επένδυση.
- Η *λειτουργικότητα* των κατασκευαστικών σχημάτων του, καθώς είναι ειδικά σχεδιασμένες για συγκεκριμένες κατασκευές με γνώμονα την πλήρη εκμετάλλευσή τους.

Επίσης, παρόλη τη χαμηλή αντοχή του ως καθαρό μέταλλο, μέσω της κραματοποίησης και άλλων μεθόδων σκλήρυνσης αποκτά αντοχή ανταγωνίσιμη του χάλυβα. Διαθέτει μεγάλη ποικιλία κραμάτων και καταστάσεων σκλήρυνσης κατάλληλα για κάθε είδος κατασκευής, αναφορικά με την αντοχή και την αντιδιαβρωτική συμπεριφορά. Όλα αυτά καθιστούν τη χρήση αλουμινίου σε δομικές κατασκευές πλήρως ανταγωνίσιμη έναντι του χάλυβα και προμηνύουν αύξηση της χρήσης του για τέτοιου είδους κατασκευές τα επόμενα χρόνια. Αναφορικά με την Ελλάδα, δημιουργείται η ανάγκη για τεχνογνωσία και εμπειρία στη χρήση του αλουμινίου σε μεγάλου μεγέθους μεταλλικές κατασκευές, μιας και δεν είναι διαδεδομένη, παρόλο που στο εξωτερικό χρησιμοποιείται εδώ και αρκετά χρόνια.

Παρόλα αυτά, μειονεκτήματα αποτελούν η μικρή διαθεσιμότητα σε διατομές και κράματα στην αγορά, αφού απαιτούνται ειδικές παραγγελίες με συγκεκριμένες ελάχιστες ποσότητες παραγωγής των διελασμένων διατομών που κυρίως χρησιμοποιούνται στις δομικές κατασκευές, όπως επίσης και η μεγάλη μείωση της αντοχής των διατομών και των μελών στις περιοχές των συγκολλήσεων, γεγονός που οδηγεί στην αποφυγή των συγκολλήσεων και στη χρήση κοχλιώσεων.

Όσον αφορά το συγκριτικό σχεδιασμό κατασκευών από χάλυβα και αλουμίνιο βάσει των Ευρωκωδίκων 3 και 9 αντίστοιχα, παρατηρούμε μία μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στο σχεδιασμό των κατασκευών αλουμινίου, η οποία οφείλεται στη φύση του μετάλλου, ενώ απαιτεί και τη λύση δύσκολων προβλημάτων καθώς και προσεκτικής ανάλυσης.

Ειδικότερα, η κατάταξη των στοιχείων της διατομής γίνεται βάσει της παραμέτρου λυγηρότητας *β/ε* με μία προσέγγιση ποιοτικά παρόμοια με αυτή του χάλυβα, αλλά με διαφορετική έκταση των πεδίων συμπεριφοράς. Για διατομές κατηγορίας 4 ο έλεγχος για τοπικό λυγισμό γίνεται με βάση τη χρησιμοποίηση μιας ενεργούς διατομής, καθώς και ενός συντελεστή τοπικού λυγισμού για τη μείωση του πάχους. Το αλουμίνιο επηρεάζεται ιδιαίτερα από την ύπαρξη συγκολλήσεων, οπότε στον Ευρωκώδικα 9 δίνεται μεγάλη σημασία στην απομείωση των ιδιοτήτων αντοχής στην

περιοχή των συγκολλήσεων καθώς και στην έκταση της ζώνης θερμικής επιρροής. Για τους ελέγχους των οριακών καταστάσεων αντοχής διατομών και μελών από χάλυβα και αλουμίνιο συμπεραίνουμε τα εξής:

- Για την περίπτωση εφελκυσμού, εάν δεν υπάρχει συγκόλληση στα μέλη οι αντοχές είναι σχεδόν ίσες για ίδιες διατομές (εξαρτάται από την ποιότητα των υλικών).
- Για την περίπτωση θλιβόμενων μελών, όπου είναι κρίσιμος ο έλεγχος σε λυγισμό, σημαντικό μέγεθος είναι η ανηγμένη λυγηρότητα, η οποία εξαρτάται από την αντοχή διαρροής και το μέτρο ελαστικότητας *E*. Το μέτρο ελαστικότητας του αλουμινίου είναι τρεις φορές πιο μικρό από αυτό του χάλυβα, με αποτέλεσμα η αντοχή του αλουμινίου να είναι σημαντικά χαμηλή σε σχέση με αυτή του χάλυβα.

Όσον αφορά τη συγκριτική μελέτη του δικτυωτού ζυγώματος στέγης από χάλυβα και αλουμίνιο, εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα:

- Αναφορικά με τους κρίσιμους συνδυασμούς φόρτισης για το σχεδιασμό των μελών, είναι κοινοί και στις δύο κατασκευές για τα αντίστοιχα μέλη. Οι φορτικοί συνδυασμοί με κύρια μεταβλητή τον άνεμο είναι κρίσιμοι μόνο στα κύρια και δευτερεύοντα διαγώνια (εκτός των κύριων διαγωνίων στο τμήμα 3), ενώ αυτοί με κύρια μεταβλητή το χιόνι δεν είναι κρίσιμοι σε κανένα μέλος.
- Κρίσιμος έλεγχος σε όλα τα μέλη και στις δύο κατασκευές είναι ο έλεγχος καμπτικού λυγισμού μελών υπό θλίψη, πράγμα λογικό, μιας και αποτελούν μέλη δικτυωτού ζυγώματος. Οπότε και η επιλογή των τύπων των διατομών των μελών, που είναι κοινή για τα αντίστοιχα μέλη στη περίπτωση και των δύο υλικών, π.χ. άνω πέλμα στο χάλυβα TUBO 140×70×12,5 και στο αλουμίνιο TUBO 200×100×10, έγινε με γνώμονα την καλύτερη εκμετάλλευσή τους για τον έλεγχο αυτό, αλλά και την αποφυγή κατά το δυνατό των συγκολλήσεων (μεγάλο πρόβλημα στο σχεδιασμό με αλουμίνιο). Σημειώνεται πως έχουμε ίδιες πλευρικές εξασφαλίσεις για το δικτυωτό ζύγωμα και στις δύο περιπτώσεις, οπότε τα μήκη λυγισμού για τον έλεγχο λυγισμού των αντίστοιχων μελών και στις δύο περιπτώσεις είναι το ίδιο. Παρατίθεται ενδεικτικά πίνακας με συγκεντρωμένες τις διατομές των αντίστοιχων μελών των κατασκευών (Πίνακας 8.1):

Πίνακας 8.1 Συγκριτική παράθεση αποτελεσμάτων διαστασιολόγησης του δικτυωτού ζυγώματος με χάλυβα και αλουμίνιο

Μέλος		Χάλυβας	Αλουμίνιο
Άνω πέλμα		TUBO 140×70×12,5	TUBO 200×100×10
Κάτω πέλμα	τμήμα 1	TUBO 200×100×16	TUBO 260×130×20
	τμήμα 2	TUBO 160×80×14,2	TUBO 240×120×10
Κύρια κατακόρυφα	τμήμα 1	2UPN80/20	2UPN140/20
	τμήμα 2	2UPN80/20	2UPN120/20
	τμήμα 3	2U50×38/20	2U65×42/20
Κύρια διαγώνια	τμήμα 1	2UPN140/20	2UPN220/20
	τμήμα 2	2UPN120/20	2UPN200/20
	τμήμα 3	2UPN80/20	2UPN140/20
	τμήμα 4	2U65×42/20	2UPN100/20
Δευτερεύοντα διαγώνια		2U40×20/20	2U40×35/20
Δευτερεύοντα κατακόρυφα		2U35×15/20	2U35×17*/20

- Παρατηρούμε ακόμα τη διαφορά βάρους (αντιδράσεις στήριξης) των δύο δικτυωτών ζυγωμάτων όσων αφορά τα μόνιμα φορτία ιδίου βάρους ζυγώματος και τεγίδων. Συγκεκριμένα:
  Χάλυβας: $W = 90{,}03\ KN$
  Αλουμίνιο: $W = 47{,}48\ KN$

  Οπότε έχουμε εξοικονόμηση βάρους στη κατασκευή αλουμινίου σε σχέση με τη χαλύβδινη όσον αφορά μόνο το ι.β. ζυγώματος και τεγίδων 47,26%. Η εξοικονόμηση αυτή έχει αντίκτυπο και στα σεισμικά φορτία του στεγάστρου που στην περίπτωση του αλουμινίου θα είναι μικρότερα.

9 Βιβλιογραφία

1. Ερμόπουλος Ι. (2005). «Ευρωκώδικας 1, Βάσεις σχεδιασμού και δράσεις επί των κατασκευών. Ερμηνευτικά σχόλια και παραδείγματα εφαρμογής», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
2. Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ. (1999). «Σιδηρές κατασκευές, παραδείγματα εφαρμογής του Ευρωκώδικα 3, Τόμος ΙΙ». Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
3. Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ. (2005α). «Σχεδιασμός δομικών έργων από χάλυβα, 2η έκδοση», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
4. Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ. (2005β). «Σιδηρές κατασκευές, παραδείγματα εφαρμογής του Ευρωκώδικα 3, Τόμος Ι». Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
5. Βάγιας Ι. (2003). «Σιδηρές Κατασκευές Ανάλυση και Διαστασιολόγηση», Κλειδάριθμος, Αθήνα.
6. Eurocode 0 «Eurocode - Basis of structural design», European Standard EN 1990
7. Eurocode 1 «Basis of design and actions on structures», European Standard EN 1991
8. Eurocode 3 «Design of steel structures», European Standard EN 1993
9. Eurocode 9 «Design of aluminium structures», European Standard EN 1999
10. Περατικός Α. (2011). «Μελέτη μεταλλικού βιομηχανικού κτιρίου με εσωτερικό ημιώροφο γραφείων», Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
11. Βαλεώρας Γ. (2008) «Ευρωκώδικας 9 Σχεδιασμός κατασκευών από αλουμίνιο», Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
12. Ιστοσελίδα εταιρείας CSI (Computers and Structures, Inc.) για εγχειρίδια προγράμματος SAP2000: http://www.csiberkeley.com/support/watch-and-learn
13. Wald F. «Design of aluminium and stainless steel structures»: http://steel.fsv.cvut.cz/suscos/PP/2E14_01_Design%20of%20aluminium%20structures.pdf
14. Mazzolani F. «Design criteria for aluminium alloy structures»: http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/WS2008/EN1999_2_Mazzolani.pdf
15. Gitter R. (2008). «Design of Aluminium structures: Selection of Structural Alloys»: http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/estructuras_aluminio/Gitter_2008.pdf